

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – UTFPR
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

ANDERSON MIGUEL LENZ
WELDER SIENA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR LVDT E *DATALOGGER*
PARA O *PHYTOMONITORING*.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA
2013

ANDERSON MIGUEL LENZ
WELDER SIENA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR LVDT E *DATALOGGER*
PARA O *PHYTOMONITORING*.**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Medianeira.

Orientador: Prof Me. Yuri Ferruzzi

MEDIANEIRA

2013



TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR LVDT E *DATALOGGER* PARA O *PHYTOMONITORING*

Por:

Anderson Miguel Lenz

Welder Siena

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 15:30 h do dia 05 de abril de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Medianeira. Os acadêmicos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.¹

Prof. Me Yuri Ferruzzi
UTFPR – *Câmpus* Medianeira
(Orientador)

Prof. Me. . Alberto Noboru Myiadaira
UTFPR – *Câmpus* Medianeira
(Convidado)

Prof. Me. Me. Filipe Marangoni
UTFPR – *Câmpus* Medianeira
(Convidado)

Prof. Yuri Ferruzzi
UTFPR – *Câmpus* Medianeira
(Responsável pelas atividades de TCC)

¹ Nota: A versão deste termo de aprovação com as assinaturas encontra-se na secretaria de coordenação de cursos.

RESUMO

LENZ, Anderson Miguel e SIENA, Welder. Projeto desenvolvimento de um sensor LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) e sistemas de: alimentação, adequação e aquisição de sinal do dispositivo (Tecnologia em Manutenção Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2012.

O sensoriamento representa um importante papel na agricultura, devido a crescente demanda na alimentação e a dificuldade de mensurar ou diagnosticar comportamentos que designem um problema, ou otimizem o desenvolvimento de culturas. A agricultura de precisão proporciona a evolução nesse conceito, pois este modelo de cultivo aborda a inserção de sistemas capazes de estimar parâmetros de controle. Contudo o propósito desse trabalho é apresentar a construção de um transdutor LVDT, junto ao seu princípio de funcionamento e informações relativas ao processo de desenvolvimento, modelagem de ensaio e resposta de sinais de posicionamento do núcleo do LVDT.

Palavras-chaves: Agricultura de precisão, Desenvolvimento de culturas, Sistemas Eletrônicos, *Phytomonitoring*,

ABSTRACT

LENZ, Miguel Anderson and SIENA, Welder. Project development of a sensor LVDT (Linear Variable Differential Transformer) and systems: signal acquisition device (Technology in Industrial Maintenance) - Federal Technological University of Paraná. Medianeira 2012.

Nowadays sensors represents an important role in agriculture, due to growing demand in feed and the difficulty of measuring behavior that designate or diagnose a problem or optimize the development of cultures. Precision agriculture provides the evolution of this concept, because this model addresses the growing integration of systems capable of estimating control parameters. However the purpose of this paper is to present the construction of an transducer LVDT, with its principle of operation and information relating to the process of development, testing and modeling of response signals for positioning the core of the LVDT.

Keywords: Prec Agriculture, Development of growing, Electronic Systems, Phytomonitoring

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EXPOSIÇÃO DA FORMA FUNCIONAL DO SENSO	13
FIGURA 2. ENCAPSULAMENTO E ELEMENTO DE INSERÇÃO DE RESINA PARA PROTEÇÃO DE CONEXÕES.....	15
FIGURA 3. ILUSTRAÇÃO DO ELEMENTO CARRETEL.....	16
FIGURA 4. EXPOSIÇÃO DOS CIRCUITOS MAGNÉTICOS	17
FIGURA 5. CARRETEL DO LVDT APÓS ENROLAMENTO DOS CIRCUITOS MAGNÉTICOS	18
FIGURA 6. MODELO DE FIXAÇÃO UTILIZADO	19
FIGURA 7. COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE FIXAÇÃO	19
FIGURA 8. CIRCUITO OSCILADOR UTILIZADO PARA ALIMENTAÇÃO DO SENSOR.....	21
FIGURA 9. COMPARAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA.....	22
FIGURA 10. CIRCUITO DE EXCITAÇÃO PARA O TRANSDUTOR.....	23
FIGURA 11. DIAGRAMA DE BLOCOS PARA CONDICIONAMENTO DE SINAL	24
FIGURA 12. CIRCUITO DE ACOPLAMENTO E AMPLIFICAÇÃO DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE SINAL	26
FIGURA 13. ILUSTRAÇÃO DAS FORMAS PASSO A PASSO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE SINAL (CONDICIONADOR)	27
FIGURA 14. CONFIGURAÇÃO SUBTRATORA	27
FIGURA 15. CIRCUITO DE ADEQUAÇÃO DE SINAL	29
FIGURA 16. COMPLEMENTO DO CIRCUITO DE ADEQUAÇÃO DE SINAL	29
FIGURA 17. CONFIGURAÇÕES DE <i>HARDWARE</i> PARA DESENVOLVIMENTO DO <i>DATALOGGER</i>	31
FIGURA 18. CONFIGURAÇÃO DE <i>HARDWARE</i> PARA MEMÓRIAS DE DADOS ..	32
FIGURA 19. SAÍDAS OPTO-ACOPLADAS.....	32
FIGURA 20. <i>HARDWARE</i> DO <i>DATALOGGER</i>	33
FIGURA 21. AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO MICROCHIP MPLAB	35
FIGURA 22. ESTRUTURA ELABORADA PARA AFERIÇÃO DO SENSOR.....	38
FIGURA 23. ESTRUTURA DE APOIO PARA AVALIAÇÃO DE CULTURAS AINDA JOVENS.....	41
FIGURA 24. SISTEMA UTILIZADO NO RESGUARDO DO SENSOR PARA ATUAÇÃO EM CAMPO	42
FIGURA 25. PLANTA EM ESTADO DE STRESS HÍDRICO.....	44
FIGURA 26. REESTRUTURAÇÃO DO GIRASSOL.....	44

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1. MODELO CARACTERÍSTICO DE RESPOSTA DE UM SENSOR LVDT	14
GRÁFICO 2. REPETIÇÃO COM AS REGIÕES EXTREMAS NÃO LINEARES	38
GRÁFICO 3. PLOTAGEM DE ANÁLISES.....	39
GRÁFICO 4. VARIAÇÃO DO DIÂMETRO DO CAULE CONFORME ACOMPANHAMENTO	43

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. ELEMENTOS UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR.....	37
TABELA2. DADOS DE VERIFICAÇÃO DO ERRO PERCENTUAL.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	11
2.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	11
3 LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER (LVDT)	12
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	12
3.2 ENCAPSULAMENTO	15
3.3 CARRETEL.....	16
3.4 CIRCUITOS MAGNÉTICOS – EMISSOR E RECEPTOR.....	16
3.5 CATARACTERISTICA CONSTRUTIVA DAS BOBINAS	17
3.6 NÚCLEO.....	18
3.7 FIXAÇÃO	18
4 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO – EXCITAÇÃO	20
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS.....	20
4.2 CIRCUITO DE EXCITAÇÃO DO LVDT - OSCILADOR	20
4.3 CIRCUITO DE EXCITAÇÃO DO LVDT – SEGUIDOR DE TENSÃO.....	22
5 CIRCUITO DE ADEQUAÇÃO DE SINAL	24
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	24
5.2 CARACTERÍSTICA DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ADEQUAÇÃO DE SINAL	25
5.3 SISTEMA DE ACOPLAMENTO E AMPLIFICAÇÃO	25
5.4 SISTEMA DE RETIFICAÇÃO, FILTRAGEM E SUBTRAÇÃO	26
5.5 SISTEMA OFFSET, AMPLIFICAÇÃO E FILTRAGEM.....	28
6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	30
6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	30
6.2 5.2 MICROCONTROLADOR PIC 18F4550	30
6.3 DESENVOLVIMENTO DO SAD – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	31
6.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	34
7 TESTE DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR	36
7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	36
7.2 METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO	36

8 AVALIAÇÕES DO SISTEMA DE MONITORAMENTO POR LVDT, APLICADO A UM GIRASSOL.	41
9 CONCLUSÃO	45
10REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

A obtenção de dados através de sensores proporcionam a expansão das formas de aquisição das informações de caráter avaliativo, o que possibilita a otimização de recursos e processos. Com base nessa tendência e necessidade de automatizar processos, o presente trabalho tem como objetivo demonstrar a construção e análise de um transformador diferencial variável linear (LVDT, do inglês *Linear Variable Differential Transformer*) para avaliar o desenvolvimento de culturas, caracterizado como *phytomonitoring*.

O *phytomonitoring* segundo JORAS, J.S.D.(2003) deriva-se em um dos casos como manejo adequado e eficiente da irrigação, onde se necessita dispor de informações sobre as condições hídricas do solo. Essas condições podem ser obtidas por meio de um sensor LVDT que capta a contração radial da planta conforme as condições a qual esta submetida. Estas contrações para HINCKLEY T.M and BRIKERHOFF D.N. (1975) advêm do comportamento do caule das plantas, que tem seu diâmetro reduzido durante o dia, devido à transpiração não ser compensada pela absorção de água, e durante a noite há o aumento do caule devido à absorção hídrica e pouca transpiração. Essa variação advinda da mudança do potencial matricial proporciona a utilização de sensores que captem a movimentação.

Segundo DONGWON, Y. (2011) a utilização de sensores de reatância variável advêm das vantagens, as quais se tratam da boa linearidade e ganho de tensão, o que proporciona a mensuração de eventos. Assim o dispositivo de deslocamento magnético permite mensurar precisamente posições, fazendo deste um dos mais difundidos sensores de posicionamento usado em modo geral, devido forma de aquisição, boa linearidade, e robustez. Estes atributos proporcionam ao sensor uma variedade de aplicações, como na indústria agrícola e mecânica, em centros de pesquisa SPEZIA (2011).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um sistema funcional de monitoramento do diâmetro do caule de plantas, que seja capaz de avaliar o desenvolvimento de culturas através do armazenamento de dados da variação do diâmetro do caule.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Estudar a aplicabilidade do sensor LVDT na agricultura e desenvolvê-lo em conjunto com circuito de alimentação, adequação e aquisição de sinal. Particionando o sistema LVDT para desenvolver e avaliar cada etapa, integrando-os num projeto final, que possibilite a funcionalidade do sensor e, por conseguinte a análise de culturas através de metodologias como o phito monitoramento.

2.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi estruturado de acordo com a sequencia de montagem dos sistemas, onde primeiramente se faz o embasamento teórico que sérvio de base, para que se fizesse a escolha dos materiais, as formas e o processo de fabricação da parte mecânica, após isso partiu-se para o desenvolvimento dos sistemas de alimentação e ajuste do sensor, e seguindo com o sistema de aquisição, e com todas as etapas anteriores concluídas o teste em campo do sensor.

3 LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORMER (LVDT)

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A eficiente gestão das culturas conforme YUNSEOP (2011) é uma preocupação em muitos sistemas de cultivo, entretanto como uma forma de apoio a eficiência agrícola, a utilização de sensores vem se difundindo para permitir o controle do sistema de irrigação e desenvolvimento, de forma a maximizar a produção, otimizando o uso dos recursos agrícolas.

Como forma de otimização de recursos, a obtenção de dados pelo sistema LVDT, através da variação de caule vem sendo considerada uma ferramenta em potencial no manejo de culturas, pois possibilita uma resposta imediata, consistente e confiável do estado hídrico da planta. O controle do sistema de modo geral ocorre devido às culturas, em maior ou menor grau, respondem às condições variáveis de umidade do solo retraindo ou dilatando seu caule. Essa variação anatômica proporcionada pelo déficit hídrico é analisada por sensores de contato, que medem a variação radial do caule em resposta ao potencial matricial do solo, JORAS, J.S.D. (2003).

Segundo CORREIA (2005), atualmente, cada vez mais a eletrônica assume um papel importante em diversas áreas tecnológicas. Na agricultura também se verifica este fato, uma vez que existe um aumento da inclusão de sistemas eletrônicos. Isto acontece devido a estes sistemas apresentarem muitas vantagens em comparação aos mecânicos, como por exemplo, uma dimensão física do sistema menor, um tempo de vida maior e maior facilidade de controle.

Uma razão para a crescente utilização da eletrônica na agricultura é a busca pela otimização de recursos e produtividade, assim sistemas sensoriais são aplicados visando à melhoria do processo agrícola.

Os sistemas sensoriais são compostos por transdutores, os quais segundo MARTINO (2010), convertem grandezas físicas em sinais elétricos que são enviados posteriormente para a unidade de controle correspondente ao sistema a ser medido. Atualmente encontram-se diversos tipos de sensores no processo agrícola para a realização de medições como a posição, velocidade, umidade e temperatura. No

caso do sensor aqui apresentado o LVDT, esse se caracteriza por um transdutor de deslocamento ou de posição.

Este tipo sensor possui características indutivas baseado em mudanças mútua na indutância, autoindutância ou da resistência magnética. Conforme exposto por SPEZIA (2010) este sensor geralmente é encapsulado em aço inoxidável, ou em polímeros, tornando-o insensível à interferência mecânica, elétrica. A Figura 1 expõe o funcionamento do sensor.

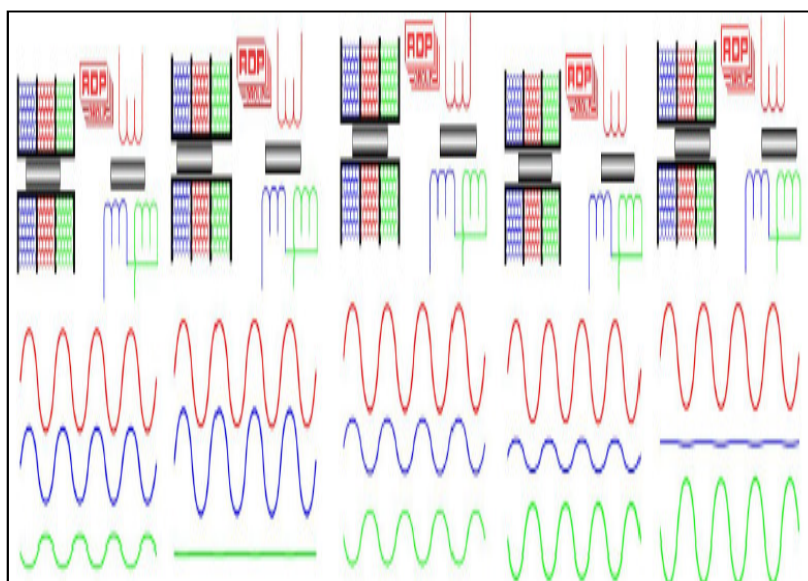


Figura 1. Exposição da forma funcional do senso
Fonte: Pedro Filipe Alhais Lopes

Conforme visualizado na Figura 1, a forma de onda vermelha e a bobina de cor vermelha representa o sinal de alimentação alternado, a forma de onda azul e a bobina azul representa a 1ª bobina secundária e a verde a 2ª, assim quando o núcleo representado pela cor cinza estiver com sua maior parte inserida no campo da 1ª bobina haverá a maior amplitude do sinal nesta bobina como visualizado na segunda coluna de formas de onda, quando o núcleo estiver posicionado de maneira uniforme entre as duas bobinas os dois sinais serão do mesmo valor visualizado na 3ª coluna, e quando estiver com a maior parte do núcleo posicionado na 2ª bobina haverá maior amplitude do sinal nesta bobina, assim o sensor LVDT trabalha com variação de saída proporcional ao posicionamento do núcleo, o que acarreta a este sensor, muitos campos de utilização, devido à boa linearidade e fácil implementação MAZI (2010).

Referente à sua constituição física, segundo LOSITO (2011), o LVDT contém três bobinas concêntricas e coaxiais envolvidas por um encapsulamento, a bobina central trata-se do circuito magnético emissor, sendo este alimentado em corrente alternada de alta frequência. Ao entorno da bobina emissora aloca-se os enrolamentos secundários. A parte móvel, isto é, o núcleo, que é feito de um material de alta permeabilidade magnética, Aço com níquel e cromo, que é inserido na bobina. Quando o núcleo se move da posição central, onde o mesmo resulta em zero de tensão de saída, a intensidade da tensão nos secundários em determinada direção do movimento do núcleo aumenta, enquanto que o movimento oposto do núcleo faz com que reduza essa tensão elétrica. O 1 Gráfico 1 exposto por MEYDAN (1992) exemplifica a característica de trabalho do transdutor conforme a posição do núcleo



Gráfico 1. Modelo característico de resposta de um sensor LVDT
Fonte: MEYDAN (1992)

Como se observa no Gráfico 1, o sensor apresenta uma chamada faixa nominal que vai de -100% a +100% da posição do núcleo, que segundo MEYDAN (1992), se refere à área de captação de maior linearidade do sinal de saída de tensão em (V). Com isso o sensor quando projetado, deve conter uma medida um pouco maior que a requerida. Pois como característica intrínseca deste sensor, há perda de linearidade nas extremidades dos enrolamentos.

Além dos enrolamentos, o LVDT é particionado em vários outros elementos que serão detalhados adiante, juntamente com as características do projeto. Tais elementos que constituem esse tipo de dispositivo consistem em: encapsulamento, carretel, núcleo, fixação, alimentação, adequação e aquisição de sinais.

3.2 ENCAPSULAMENTO

O encapsulamento do sensor conforme CRESCINI (1995) consiste na proteção do circuito magnético contra choques mecânicos ou intempéries. Com intuito de tornar o dispositivo mais leve e resistente, o mesmo foi desenvolvido em material nylon technyl, que proporciona características físicas relevantes, pois o polímero utilizado possui baixa densidade e alta resistência à intempérie. Estes requisitos são fundamentais na escolha do material devido à aplicação do sensor, a qual requer um sistema que interfira o menos possível no desenvolvimento da cultura. A Figura 2 demonstra a característica física do encapsulamento desenvolvido para o sensor.

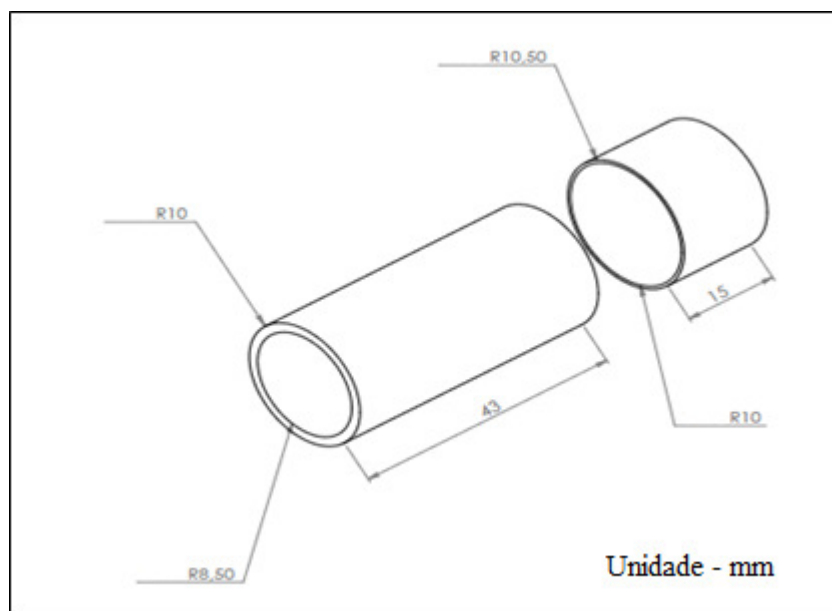


Figura 2. Encapsulamento e elemento de inserção de resina para proteção de conexões.

O encapsulamento visto na Figura 2 foi desenvolvido em torno mecânico até a obtenção da forma visualizada.

3.3 CARRETEL

No LVDT o carretel é o elemento responsável pela alocação das bobinas. Como característica, segundo BALBINOT (2006), este particionamento do sensor consiste num elemento mecânico com formato cilíndrico e três rebaixos coaxiais e concêntricos e geralmente de mesmas dimensões.

Para o desenvolvimento do dispositivo de alocação de enrolamentos, utilizou-se do mesmo polímero mencionado anteriormente, com o intuito de facilitar a construção e proporcionar uma redução de massa do sensor, para que possa ser aplicado a culturas em fase inicial de desenvolvimento. A Figura 3 demonstra a forma física e dimensões do projeto do carretel.

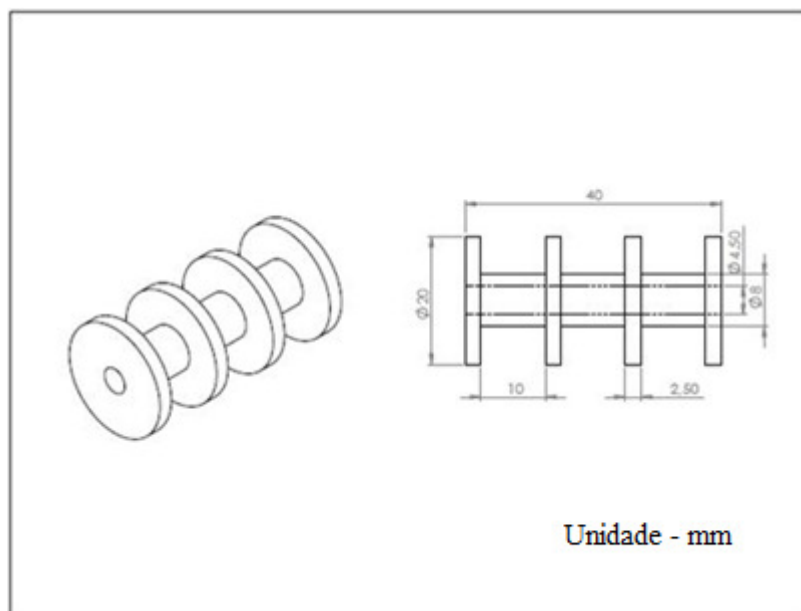


Figura 3. Ilustração do elemento carretel

3.4 CIRCUITOS MAGNÉTICOS – EMISSOR E RECEPTOR

Em sua constituição física, um sensor LVDT apresenta dois circuitos magnéticos justapostos entre si. Sobre o carretel alocado centralmente, estará o enrolamento primário, que consiste no circuito emissor do dispositivo. Nas demais partições do carretel aloca-se o circuito secundário, SPEZIA (2010).

Quanto ao circuito primário, segundo MARTINO (2011) sua alimentação pode variar de 1kHz a 20kHz em tensão alternada. Essa variação na frequência de

trabalho apresenta um ganho na densidade magnética do sensor, tornando-o mais sensível e com maiores amplitudes de respostas.

O circuito secundário do LVDT é alocado ao entorno da bobina emissora, ligados em série entre si, mas com defasagem em seus enrolamentos de 180° e espaçados de forma simétrica com relação à bobina primária e entre os mesmos. A Figura 4 demonstra o circuito magnético emissor e receptor do LVDT.

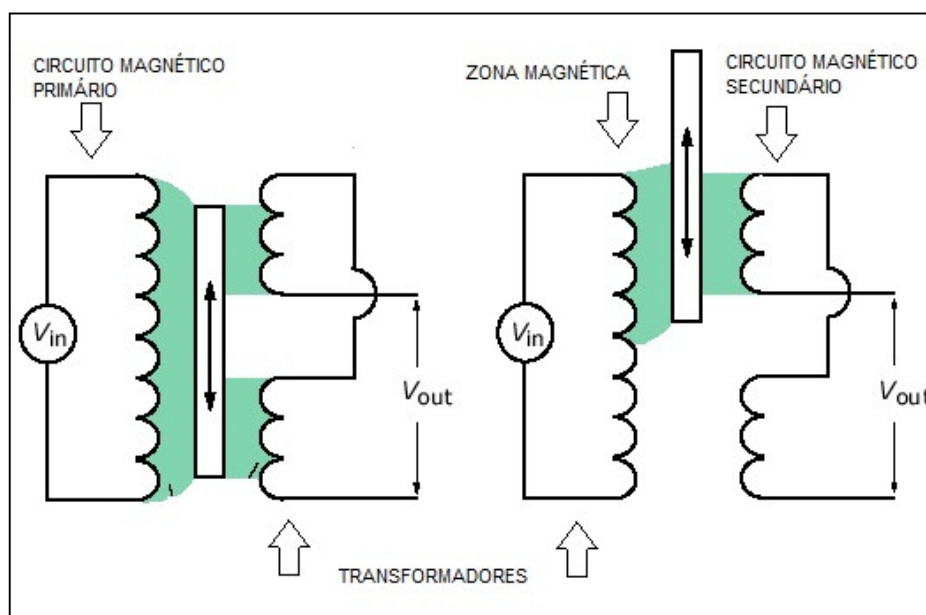


Figura 4. exposição dos circuitos magnéticos
Fonte: Meydan (1992)

A parte secundária dos enrolamentos vistos na Figura 4, consiste no elemento de indutância mútua, que sofre este fenômeno conforme um dos conceitos de magnetismo em que a exposição de uma bobina em uma região de fluxo magnético pulsante induz uma tensão nesta. No caso do sensor, o circuito magnético primário fornece o fluxo pulsante, devido a sua alimentação C.A de alta frequência. Assim, o circuito secundário por estar imerso neste fluxo magnético pulsante sofre o fenômeno de indutância mútua, acarretando nos sinais de saída.

3.5 CARACTERÍSTICA CONSTRUTIVA DAS BOBINAS

Segundo BALBINOT (2006), um sensor LVDT, contém espiras de acordo com o projeto, sabendo-se que acima de 1000 espiras por bobinas encontram-se sensores de maiores capacidades.

Entretanto, devido à aplicação do dispositivo desenvolvido, este não pode apresentar grandes dimensões, assim conforme visto na Figura 3, as dimensões do carretel, sobre este se desenvolveu os enrolamentos primário e secundário com fio AWG32 com 600 espiras em cada uma das partições do carretel. A Figura 5 demonstra a resultado final do carretel com os circuitos magnéticos.

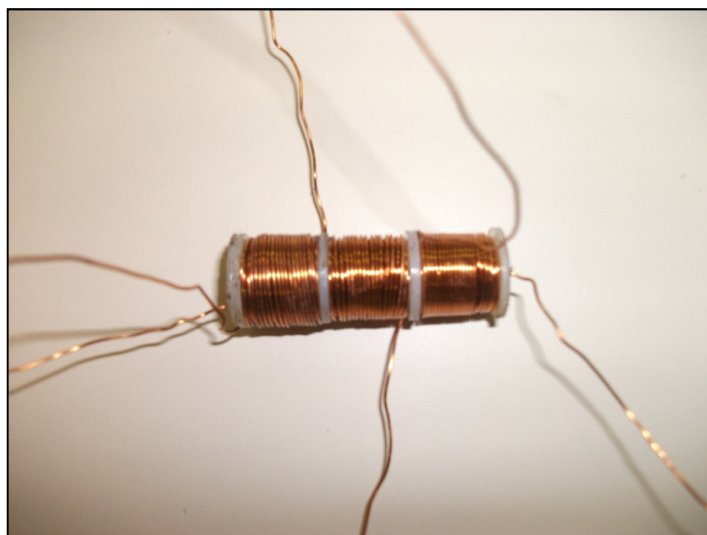


Figura 5. Carretel do LVDT após enrolamento dos circuitos magnéticos

3.6 NÚCLEO

Este elemento é responsável pela variação do sinal de saída, pois o mesmo provoca a concentração do fluxo magnético conforme seu movimento, que intensifica ou reduz o sinal proporcionalmente ao seu posicionamento, sua constituição para este trabalho foi uma liga de Aço de Níquel com Cromo. A concentração de fluxo magnético pode ser visualizada na Figura 4.

3.7 FIXAÇÃO

Este trabalho expõe um sensor LVDT para *phytomonitoring*, e com base nesse foco a fixação do sensor foi desenvolvida de modo a atender o acoplamento em plantas, do modo mais adequado possível. Assim segundo KANO (1998), desenvolveu-se a fixação, a qual se constitui de duas partes, uma placa plana superior e uma placa angular inferior, estas placas são utilizadas para fixar o LVDT e

acoplar o conjunto a planta. A Figura 6 demonstra a característica desses elementos.



Figura 6. Modelo de fixação utilizado

Como visto na Figura 6, a placa angular do LVDT foi desenvolvida de modo que seja acoplada a espécie (planta) com uma boa fixação, pois o elemento desenvolvido se apresenta como um triângulo. Assim a instalação do sensor possui maior área de contato, em relação a fixação com duas chapas planas. A Figura 7 demonstra as situações de fixação mencionadas aqui.

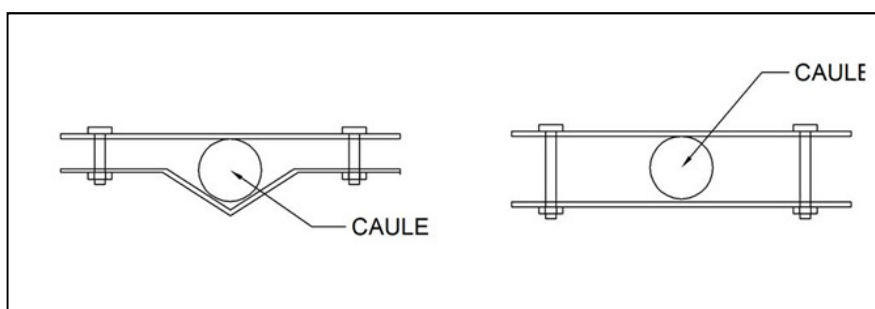


Figura 7. Comparação entre os sistemas de fixação

O dispositivo de fixação com base angular apresenta-se como melhor solução de aplicação, pois consiste num dos tipos de acoplamentos mais utilizados no nicho sensorial agrícola.

4 CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO – EXCITAÇÃO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS

O circuito de alimentação de um sensor LVDT se baseia na excitação sinusoidal de alta frequência, o que define essa alimentação como circuito oscilador. Segundo SEDRA (2004), um oscilador é uma etapa amplificadora que gera determinada frequência, condicionada pelo valor de seus componentes, e a mantém dentro de certos limites. Nesse tipo de circuito se utiliza de realimentação positiva, com intuito de compensar a perda de potência durante a geração de cada ciclo. Conforme VARGAS (2002), as propriedades elétricas dos transistores permitem que este seja utilizado em osciladores. Assim para que um transistor atue num circuito sinusoidal de alta frequência o mesmo deve operar no seu ponto quiescente, faixa caracterizadora de operação de amplificação.

Existe uma vasta gama de osciladores, como: oscilador em ponte de wien, oscilador hartley, oscilador de colpitts, oscilador de bloqueio, oscilador duplo T e o oscilador de deslocamento de fase (usado no desenvolvimento do sensor). O circuito será detalhado adiante.

4.2 CIRCUITO DE EXCITAÇÃO DO LVDT - OSCILADOR

Na construção do sensor em questão se utilizou de um oscilador por rotação de fase transistorizado. Esse tipo de oscilador segundo VARGAS (2002) opera sob a relação reatância-capacitância, onde as resistências atribuídas ao circuito junto aos capacitores, acarretaram na oscilação e mudança de fase, produzindo sinais que se encontram em frequências de 15Hz a 20kHz. A Figura 8 demonstra o circuito oscilador utilizado na alimentação do sensor.

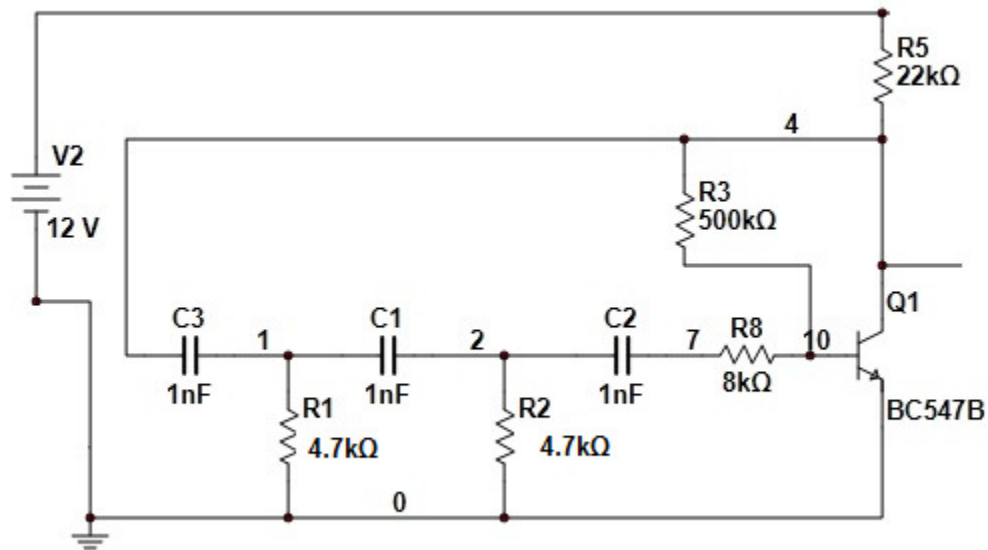


Figura 8. Circuito oscilador utilizado para alimentação do sensor.

Os componentes utilizados na confecção do circuito são visualizados na Figura 8. Segundo VARGAS (2002) os elementos do circuito podem ser definidos conforme a frequência desejada pela Equação 1.

$$f = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}} \quad (1)$$

f = frequência requerida.

R = valor da resistência.

C = valor da capacitância.

Entretanto, na construção do circuito oscilador utilizou-se do circuito oscilador de deslocamento de fase conforme exposto por BRAGA (1998). Apesar da utilização do circuito desenvolvido por Braga, foi necessário realizar algumas alterações para compatibilizá-lo ao LVDT. As alterações ocorreram sobre o complemento do circuito onde se introduziu no oscilador o circuito acoplador de impedância e amplificador de corrente, para assim adequar o funcionamento do circuito, de alimentação ao transdutor.

4.3 CIRCUITO DE EXCITAÇÃO DO LVDT – SEGUIDOR DE TENSÃO

Um amplificador operacional, ou amp op, é um amplificador diferencial de ganho muito alto com alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. Normalmente utilizado em circuitos osciladores, filtros e sistemas de instrumentação.

Segundo WENDLING (2004) umas das formas de se utilizar os amplificadores remete-se a configuração seguidora, a qual possui como característica o ganho unitário, mesma amplitude e polaridade. A configuração de seguidor unitário opera normalmente como isolador de estágios, reforçador de correntes e acoplador de impedâncias. A configuração emissora proporciona aos amplificadores aplicações essenciais em inúmeros projetos para que haja a máxima transferência de energia entre dois circuitos, sejam eles amplificadores, osciladores, etc.

A Figura 9 expõe dois circuitos (a) e (b). o circuito (a), a tensão V_o segundo COUGHLIN (2001), quando ligada diretamente a carga, a resistência interna produz um divisor resistivo, afetando diretamente na tensão entregue. Entretanto, a fonte e a carga quando intercalada por um circuito seguidor mantém a tensão.

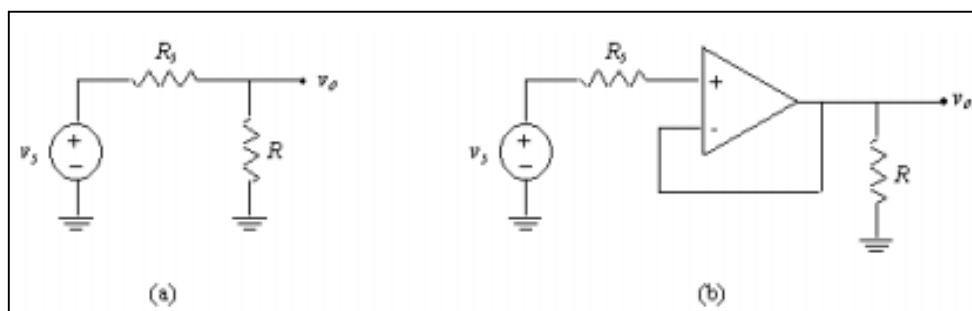


Figura 9. comparação de transferência de potência

Assim, com o intuito de manter a máxima transferência de potência entre circuitos, utilizou-se de um Circuito integrado LM324 em configuração seguidor de emissor. A Figura 10 expõe o circuito de alimentação do sensor completo.

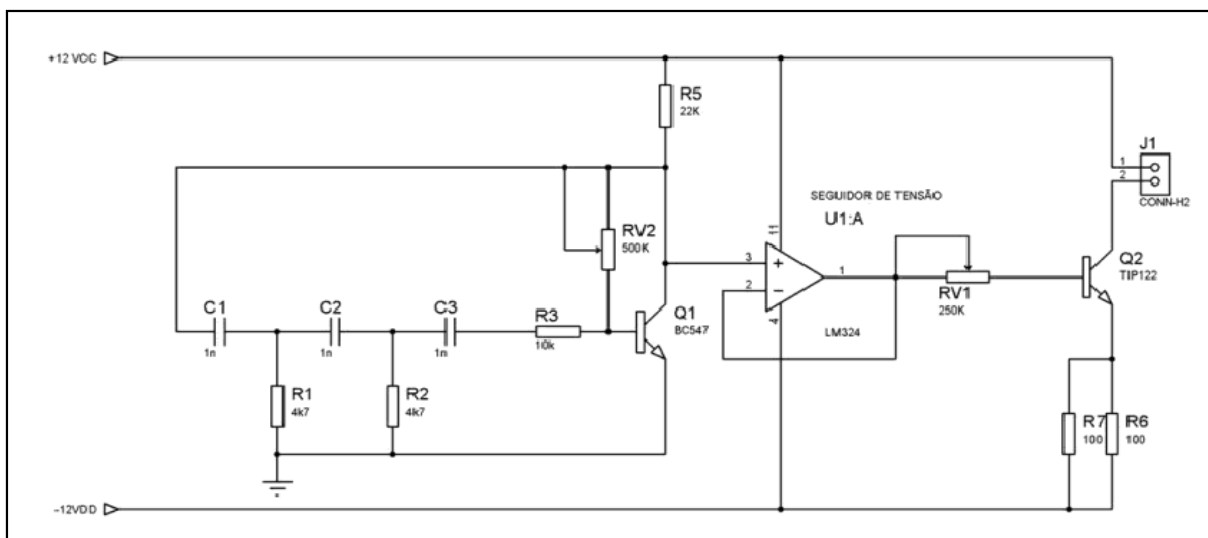


Figura 10. Circuito de excitação para o transdutor

Como se visualiza na Figura 10, o circuito de excitação é composto de circuito oscilador, circuito seguidor e amplificador de corrente (TIP-122), inserido para proporcionar um campo magnético de maior densidade ao sensor. A partir dessa premissa, o LVDT é inserido nos terminais do conector J1.

5 CIRCUITO DE ADEQUAÇÃO DE SINAL

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo NATALE (2007), geralmente a grandeza elétrica de saída de um transdutor não é diretamente manipulável. Por exemplo, a faixa de tensão de saída não é desejada, a potência do sinal é baixa ou a tipo de grandeza não é o requerido. Por esses motivos, os transdutores necessitam de um sistema que manipule o sinal do modo mais adequado, e essa manipulação do sinal é denominada condicionamento.

O condicionador de sinal, segundo NATALE (2007), é um equipamento que converte uma grandeza elétrica em outra, também elétrica, mas adaptada à aplicação específica. Em grande parte dos casos a grandeza elétrica de saída é constituída por tensão. A Figura 11 ilustra o diagrama de blocos de um sensor com sistema de condicionamento.

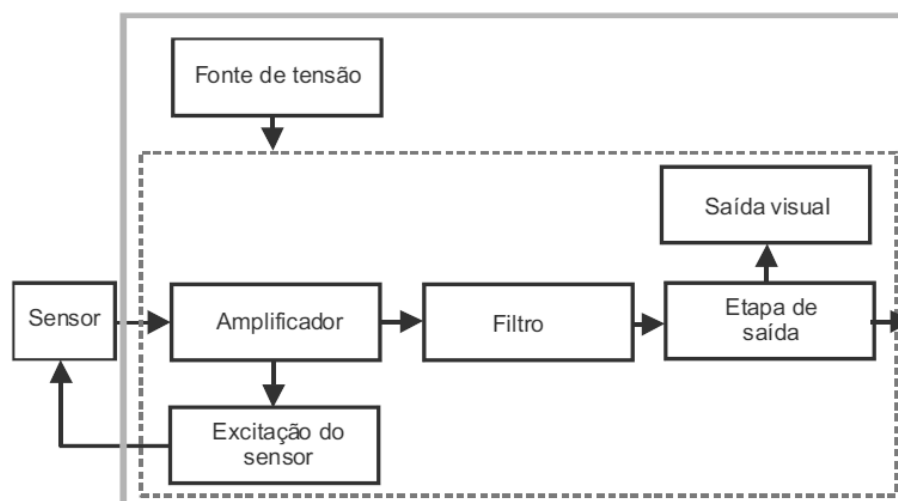


Figura 11. Diagrama de blocos para condicionamento de sinal
Fonte: NATALE (2007)

Conforme ilustrado na Figura 11, o sistema de excitação alimentará o sensor e a partir disso ao ser influenciada pelo meio o qual está monitorando o dispositivo emitirá um sinal proporcional a influência sofrida. O sinal emitido pelo sensor passará pelo amplificador, filtro e por fim irá para o sistema de aquisição, gerando

assim medidas de controle ou avaliação. O trajeto do sinal desde a excitação até aquisição é denominado sistema de condicionamento de sinal.

5.2 CARACTERÍSTICA DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE ADEQUAÇÃO DE SINAL

Para o transdutor aqui demonstrado, necessitou-se de um condicionamento no valor de tensão dos secundários, para que fosse possível por meio de um conversor analógico digital de um microcontrolador, analisar esse valor representante do curso medido. O ADC (*Analog to Digital Converter*) do microcontrolador escolhido, o PIC 18F4550, é limitado em alcance entre 0 e 5V, em resolução cerca de 4,8 mV.

O sinal de saída dos enrolamentos secundários, como característica do sensor tem a mesma frequência que o sinal de excitação, $f = 9,7$ kHz, este valor advém de vários testes, onde ao variar a frequência da alimentação verificamos que nesta frequência, o sinal de saída apresentou o menor nível de ruído e amplitude adequada para o sistema de ajuste. Com o intuito de aplicar uma variação linear no sensor se utilizou do sistema eletrônico para conversão analógica digital, adequando assim o sensor as características do sistema de aquisição conforme as medidas de variação do sensor, as quais representam de 0 a 10 mm de deslocamento.

Para a análise do sistema de condicionamento de sinal, subdividiu-se este em 4 blocos: acoplamento e amplificação, Retificação, filtragem e subtração e por fim Offset.

5.3 SISTEMA DE ACOPLAMENTO E AMPLIFICAÇÃO

Conforme já mencionado, neste fragmento do sistema utilizou-se de um LM324 para configuração seguidora, a qual se responsabiliza pelo acoplamento das impedâncias dos sistemas, no caso a saída do LVDT e a entrada do condicionador de sinal, conforme Figura 12.

Como complemento desse sistema utilizou-se de uma das portas do LM324 para a configuração de amplificação não inversora. Esta etapa foi utilizada devido à baixa amplitude de saída fornecida pelo LVDT, sinal esse situado em milivolts. Assim a utilização do amplificador elevou a saída para 5 volts. A Figura 12 ilustra este fragmento do circuito condicionador de sinal.

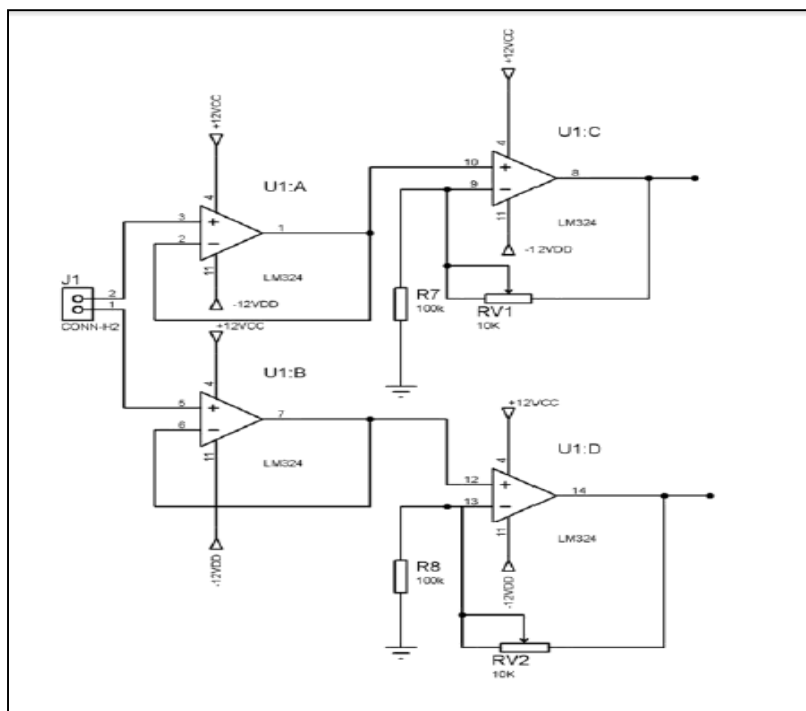


Figura 12. Circuito de acoplamento e amplificação do sistema de condicionamento de sinal

Como visto na Figura 12, o sinal do LVDT advém pelo conector J1. A partir desse ponto os amplificadores em configuração seguidor de emissor, operaram em cada uma das polaridades do sensor, acoplando as impedâncias entre sensor e circuito. Após o acoplamento, ocorre a amplificação do sinal que seguirá adiante, sendo condicionado pelo circuito.

5.4 SISTEMA DE RETIFICAÇÃO, FILTRAGEM E SUBTRAÇÃO

O sistema referido neste subitem condiz com a retificação necessária para o tratamento do sinal. Nesse tratamento, o diodo transforma o sinal ainda CA de alta frequência em onda pulsante. Devido à característica do sensor LVDT, após a retificação segundo ALHAIS (2008), a expressão gráfica que demonstra essa ação (retificação) conterà dois domínios. A Figura 13 demonstra as expressões gráficas do sensor conforme a retificação.

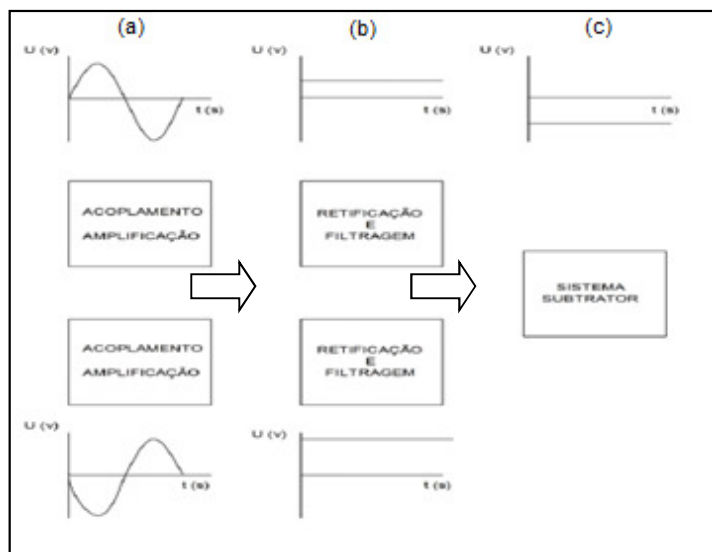


Figura 13. Ilustração das formas passo a passo do sistema de tratamento de sinal (condicionador)

Fonte: Vilhais

Na Figura 13 verifica-se o comportamento do sinal do LVDT sob o condicionador. As saídas do secundário do sensor são visualizadas nos dois primeiros gráficos, os quais apresentam um sinal senoidal com defasagem de 180° . Como já discutido, este sinal é amplificado e depois retificado, por conseguinte utiliza-se o circuito de subtração. Esse circuito consiste numa montagem típica de um subtrator não inversor. Segundo ALHAIS (2008), o amplificador subtrator consiste numa configuração que possibilite obter na saída um sinal de tensão igual à diferença entre os sinais aplicados. A Figura 14 demonstra a configuração subtratora de um amplificador operacional.

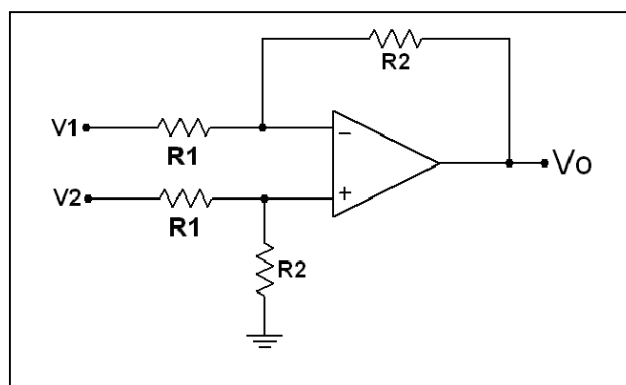


Figura 14. Configuração subtratora

Fonte: Wedling

O resultado de saída de um circuito em configuração subtratora possui característica conforme a Equação 2 exposta por WEDLING (2010), em que a tensão V_o depende da razão entre R_1 e R_2 integrados a um produto da diferença de sinal adicionados aos terminas positivo e negativos do amplificador operacional.

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad [2]$$

A partir dessa configuração, obtém-se o gráfico (c) da Figura 13, em que as tensões que formavam duas imagens são subtraídas em um único sinal que varie apenas no ciclo positivo com base no offset que será detalhado adiante.

5.5 SISTEMA OFFSET, AMPLIFICAÇÃO E FILTRAGEM.

Este particionamento do sistema de condicionamento de sinal, o Offset, se faz necessário, segundo ALHAIS (2008), devido à subtração resultar num sinal negativo para uma metade do deslocamento. Como o sistema de aquisição será efetuado por um microcontrolador, este não permite a leitura de sinais negativos de tensão, acarretando na necessidade de realizar um offset ao valor de diferença.

Referente à amplificação, como a diferença de amplitude é muito pequena deve-se amplificar o sinal para leitura do ADC e para que se tenha uma maior gama de tensão em todo o curso. No caso do sensor, essa amplificação resulta num valor de tensão máxima de 3,3volts, dimensionada para evitar possíveis danos à porta do microcontrolador por picos de tensão. As Figuras 15 e 16 expõe o circuito global de condicionamento de sinal, onde estão os circuitos de oscilação, acoplamento, amplificação, retificação, filtragem, subtração e offset.

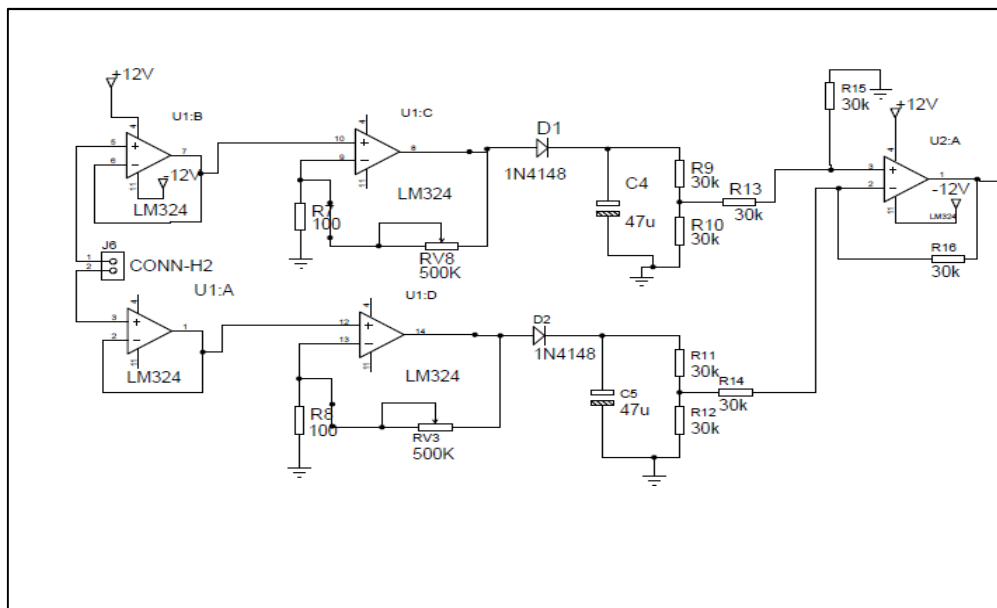


Figura 15. Circuito de adequação de sinal

A Figura 15 expressa à configuração partindo do sinal enviado pelo LVDT, o qual é processado mediante acoplador de impedância, amplificador, retificador; divisor de tensão (para readequação da tensão) e subtrator. Após estes passos, o sinal é dirigido ao restante do circuito responsável pela adequação do sinal.

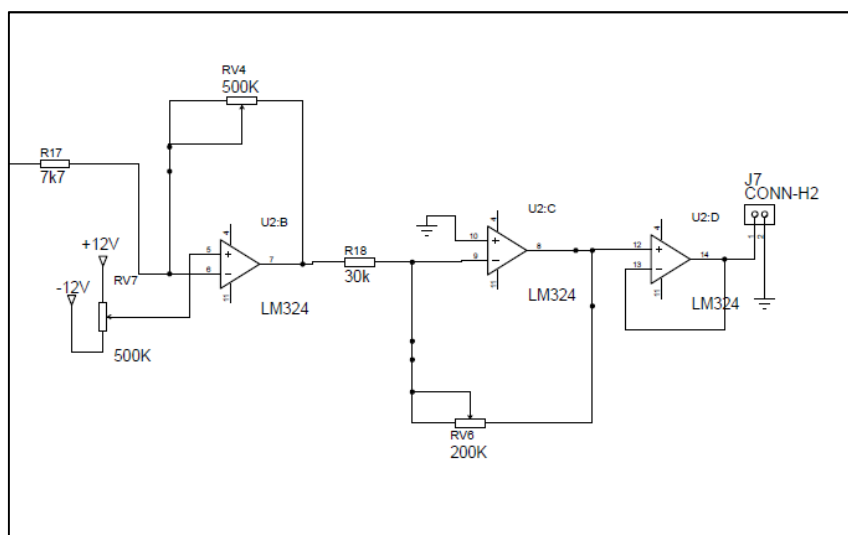


Figura 16. Complemento do circuito de adequação de sinal

As Figuras 15 e 16 representam o circuito de adequação de sinal em que após todo tratamento do sinal na figura 15, o mesmo entra no circuito da figura 16 para complementar o tratamento necessário para utilização do sinal no *datalogger*.

6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A evolução crescente nos ramos de gerenciamento e controladoria de processos, acarretaram no desenvolvimento da informática para fins agrícolas através das décadas, possibilitando a utilização de ferramentas de precisão para a análise e aquisição de dados. Segundo PARK (2003), em todo tipo de tecnologia e ciência, a aquisição de dados é uma atividade essencial. Devido o sistema de aquisição ter como finalidade apresentar ao observador os valores das variáveis que estão sendo mensuradas. Assim o desempenho de uma determinada cultura quanto à fertirrigação e irrigação é amplamente estudado em suas diversas configurações, objetivando entre outros aspectos a obtenção de um desempenho equilibrado e a diminuição de custos operacionais. Com base nessas premissas, neste capítulo será detalhado o sistema de aquisição do sensor, um *data logger* que consiste num dispositivo que recebe dados de um ou vários sensores, processa esses dados e armazena num formato digital. O sistema em questão será desenvolvido sobre o microcontrolador PIC 18F4550.

6.2 5.2 MICROCONTROLADOR PIC 18F4550

Os microcontroladores se caracterizam internamente por um sistema computacional, no qual estão incluídas uma CPU (*Central Processor Unit*) memória de dados e programa, um sistema de clock, portas de I/O (Input/Output), além de outros possíveis periféricos. Segundo MIYADAIRA (2011) o microcontrolador 18F4550 consiste num sistema baseado na arquitetura Harvard onde o processador acessa memórias de dados e instruções através de dois barramentos distintos. O conjunto de instruções desse tipo de máquina (PIC18F4550) ocorre sobre arquitetura RISC (computador com conjunto de instruções reduzidas). Essa máquina também se caracteriza por ser de 8 bits dotado de 32 kbytes de memória de programa e 2,048 kbytes de memória RAM (Random access memory). A alimentação desse dispositivo pode variar entre 4 e 5,5 Volts e operações sob frequências até 48 MHz, ou 12 MIPS (Milhões De Instruções Por Segundo).

O modelo utilizado apresenta 40 pinos, dos quais 35 podem ser configurados com I/O's (input – Output). Diversos periféricos podem ser utilizados nesse microcontrolador, como por exemplo: EEPROM de 256 Bytes ou de outra capacidade, dois módulos CCP (Capture, Compare or PWM) e ECCP (Enhanced, Capture, Compare or PWM), treze módulos de analógico e digitais (A/D) com resolução de 10 bits com tempo de aquisição programável, dois comparadores analógicos, uma comunicação EUSART, um TIMER de 8 bits entre outros.

6.3 DESENVOLVIMENTO DO SAD – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

No desenvolvimento do sistema de aquisição utilizou-se de configuração de circuito conforme MIYADAIRA (2011), tais configurações podem ser visualizadas na Figura 17.

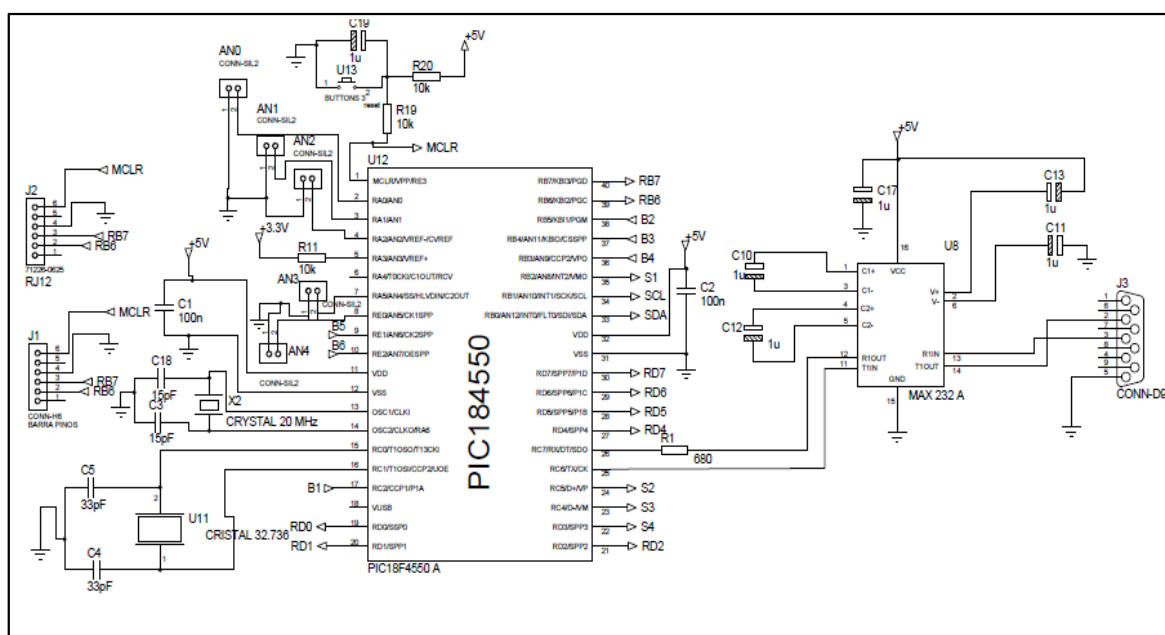


Figura 17. Configurações de hardware para desenvolvimento do datalogger
Fonte: Miyadaira (2011)

Nessa configuração exposta na figura 17 observam-se os periféricos necessários para utilização do PIC 18F4550, como cristal oscilador, capacitores inibidores de ruídos acoplados as portas Vcc e Vss do microcontrolador, circuito integrado Max 232 para comunicação serial e terminais utilizados para o acesso aos canais analógicos (AN1, AN2, AN3, AN4).

Como pode ser visualizado no esquemático do circuito utilizado, o *hardware* do *datalogger* contém 4 memórias CMOS Serial EEPROM de 256 kbytes, com comunicação I2C™, de acordo com a figura 18.

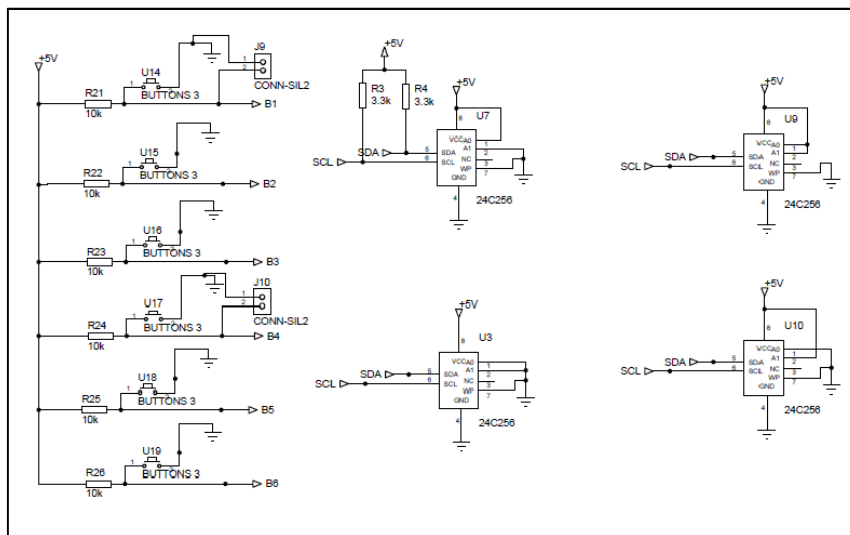


Figura 18. Configuração de *hardware* para memórias de dados

Outras características de *hardware* pertencentes ao *datalogger* são: 4 saídas a relé opto-acopladas Figura 19; Display Lcd 2x16; 5 entradas analógicas; e acesso ao CCP1 e ao CCP2.

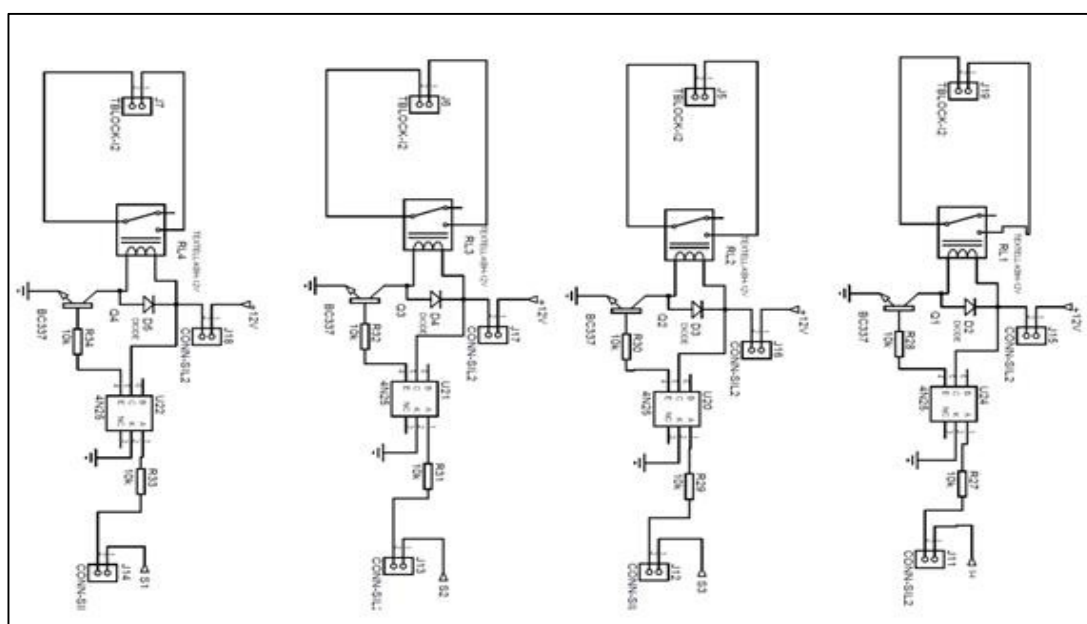


Figura 19. Saídas opto-acopladas

Se o núcleo estiver exposto ao campo magnético do primário por um longo tempo, este perderá sua característica de alta permeabilidade magnética, pois seus domínios internos se alinharão permanentemente, assim se transformando em um ímã, visando evitar isto foi adicionado no *hardware* relés para acionar o LVDT 15 minutos antes da aquisição, que é o tempo suficiente para magnetizar o núcleo e fazer a medição, assim estando exposta ao fluxo magnético metade do tempo, vai aumentar a sua vida útil, e vai consumir metade da energia se comparado caso estivesse operando continuamente. A Figura 19 mostra o esquemático das quatro saídas à relé para o acionamento do LVDT 15. O objetivo de quatro relés advém de aplicações futuras onde um mesmo *datalogger* aquisitará os dados de quatro LVDT's. Para a gravação do programa no microcontrolador foi escolhido o modo *in-circuit* (ICSP – *In-Circuit Serial Programming*), que é mais prático, uma vez que não há necessidade de retirar o microcontrolador do circuito eletrônico para realizar a gravação do chip. Todas as características até aqui apresentadas são demonstradas num resultado final do projeto de *hardware* do *datalogger*, o qual é visualizado na figura 20.

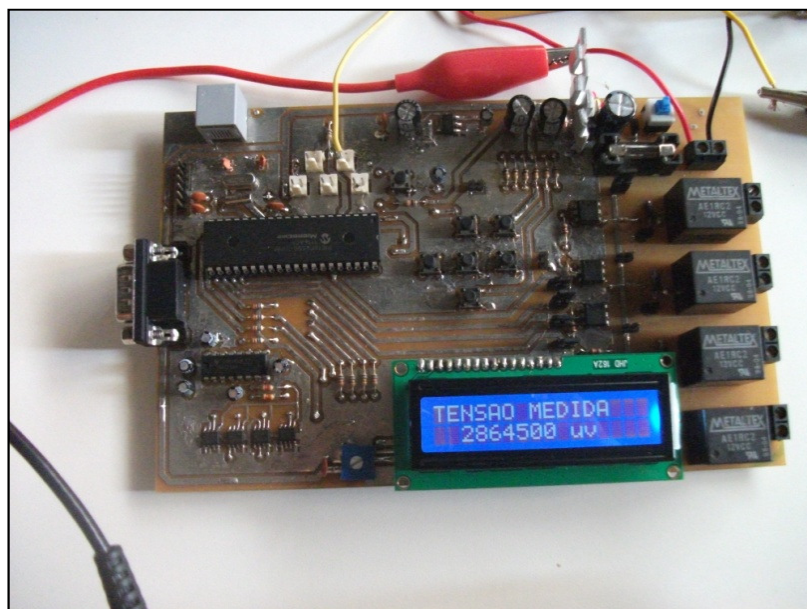


Figura 20. *Hardware* do datalogger

6.4 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Segundo COELHO (2009), no desenvolvimento de um *software*, são necessárias etapas que antecedem esse processo, a qual se apresenta de diferentes formas, podendo ser organizado em textos e comentários, utilizando ferramentas como dicionários, diagramas e fluxogramas. Um fluxograma apresenta figuras geométricas com breve descrição do processo, linhas e setas descrevendo a sequência das atividades, demonstrando o caminho da informação de modo estruturado, contribuindo para manter a organização na documentação do processo e programação. Desse modo no desenvolvimento do *datalogger*, se utilizou de um fluxograma de estrutura do programa, o qual é apresentado no Apêndice A.

Após a definição do comportamento da monitoração (fluxograma) se desenvolveu o *software*. O sistema de manipulação do *hardware (software)* foi desenvolvido em linguagem C padrão ANSI. O tipo de linguagem foi definido conforme exposto por JUNIOR (1999) que apresenta como a principal vantagem de se usar linguagens de alto nível (no caso a linguagem C) o fato de esta fornecer uma menor interação do projetista com o *hardware*, no que diz respeito ao controle do mesmo (ajuste de bancos de registradores e sequências de inicialização). Desta forma o projetista dedica seu tempo basicamente à lógica do problema e não aos detalhes internos do chip.

Assim, para o desenvolvimento do programa em C utilizou-se do ambiente de programação MPLAB da Microchip. A plataforma em questão permite acesso ao compilador C18 que transforma linguagem de alto nível em linguagem de máquina, também gerencia o projeto, “*debuga*” (depura ou confere) e grava o chip. A Figura 21 demonstra o ambiente de desenvolvimento utilizado.

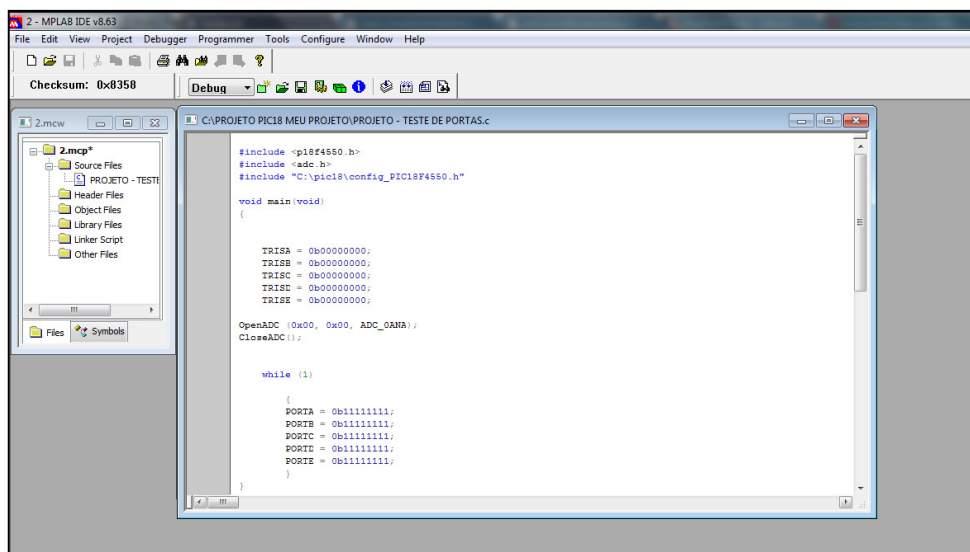


Figura 21. Ambiente de desenvolvimento Microchip MPLAB

A Figura 21 demonstra a área de trabalho do *software* onde criou-se o projeto de controle para a gravação num microcontrolador.

Além do *software* de criação de programa, o *datalogger* utilizou de vários módulos disponibilizados em *hardware* PIC. Assim para o desenvolvimento do controle utilizou-se basicamente do Conversor Analógico-Digital, Comunicação I²C para gravação na memória EEPROM, TIMERS, Display LCD 2X16, sendo que o uso de todos esses módulos se baseou em MIYADAIRA (2011).

Sobre os módulos citados, foi desenvolvido o programa, o qual possui como função principal gravar em EEPROM externa os valores de tensão lidos pelo canal analógico AD1, com tempos definidos pela configuração de uma variável global chamada “tempoaqui”.

Sobre o *software* no menu do programa, tem-se a possibilidade de se editar vários parâmetros do programa, e verificar indicadores do estado de funcionamento do programa, como exemplo: se esta ligado ou desligado, o valor de tensão lido no momento, e a leitura dos dados gravados na EEPROM. Para mais informações sobre a lógica de funcionamento ver Apêndice A o *software Datalogger Dendrometer 1.0*.

7 TESTE DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR

7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Um sistema de medição (SM) de boa qualidade deve ser capaz de operar com pequenos erros. Seus princípios construtivos e operacionais devem ser projetados para minimizar erros sistemáticos e aleatórios ao longo da sua faixa de medição, nas suas condições de operação nominais. Entretanto, por melhores que sejam as características de um SM, este sempre apresentará erros, seja por fatores internos, seja por ação das grandezas de influência externas. A perfeita caracterização das incertezas associadas a estes erros é de grande importância para que o resultado da medição possa ser estimado de maneira segura. Embora, em alguns casos, os erros de um sistema de medição possam ser analítica ou numericamente estimados, na prática são utilizados procedimentos experimentais quase que exclusivamente. Através do procedimento experimental denominado calibração é possível correlacionar os valores indicados pelo sistema de medição e sua correspondência com a grandeza sendo medida. Assim, este capítulo apresenta, em linhas gerais, aspectos característicos da calibração do sensor LVDT.

7.2 METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO

Após a construção do conjunto, oscilador e condicionamento, em placa de circuito impresso, procede-se a caracterização do sensor ligado ao circuito final. A caracterização só é feita nesta altura para que os sinais sejam lidos diretamente pelo seu sistema de aquisição, obtendo assim os valores reais medidos pelo LVDT, com todas as impedâncias envolvidas acopladas.

No ensaio em questão foi extraída a relação deslocamento por tensão de saída através da medição da tensão por etapa. Essa caracterização de calibração do sensor se desenvolveu conforme o exposto por BALBINOT(2006) em que uma forma de aquisição e levantamento da reta de calibração, se constitui na submissão do sensor a um suporte estático, para que a movimentação de seu núcleo seja efetuada por um dispositivo de medição de alta precisão, como exemplo:

micrômetro. Os itens para a realização da calibração do sensor encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Elementos utilizados na calibração do transdutor

Itens	Função
estrutura em chapa	suporte para sensor
micrometro	deslocamento de núcleo
sistema de alimentação	alimentação do sensor
sistema de aquisição de sinal	leitura de variação

Através dos elementos expostos na Tabela 1 realizou-se o procedimento de calibração, onde a variação do sinal de tensão foi verificada com deslocamento do micrometro a cada 0,5mm. Assim, os sinais provenientes da saída do sensor eram lidos pelo canal ADC do microcontrolador que demonstrava, mediante a lógica de programação, os valores de tensão no display.

A Figura 22, demonstra a montagem física da metodologia exposta por BALBINOT (2006) para obtenção da reta de calibração do sensor LVDT. Com base nesta metodologia, o dispositivo foi submetido, a um acoplamento de 10V de pico-a-pico (alimentação do sistema) e frequência de 10kHz (Quilo-Hertz) todos os valores fornecidos pelo sistema de alimentação. A leitura dos valores foi obtida no *datalogger* desenvolvido. Na figura em questão observa-se entre a estrutura metálica o LVDT e sobre esta (estrutura indicada pela seta azul) o micrometro responsável pela variação de aferição (seta vermelha).

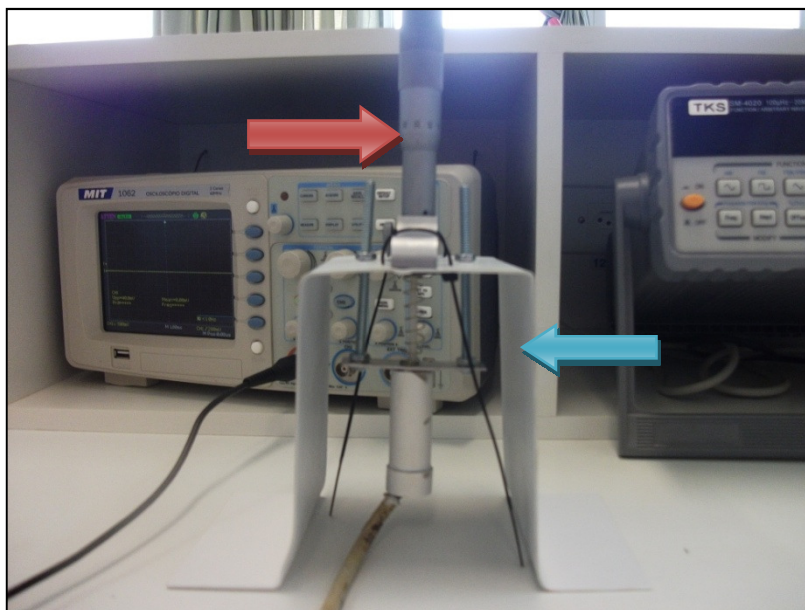


Figura 22. Estrutura elaborada para aferição do sensor

Através da metodologia aplicada realizaram-se os testes sobre o sensor para o levantamento da reta de calibração. O gráfico 2 mostra uma das repetições com os dados além da região linear de 1 a 9 mm, mostrando o abaulamento ou perca da linearidade da tensão de saída nas extremidade, que mostra que o sensor apresentou característica de LVDT. As Repetições 1, 2, 3 e 4 são referentes às análises de tensão em função do deslocamento. Estes, são resultados dos quatros testes realizados sobre o sensor, e o gráfico 3 mostra os 4 testes sobrepostos para avaliar o comportamento de histerese, o que resultaria dependendo da magnitude desta, erros significantes de medida.

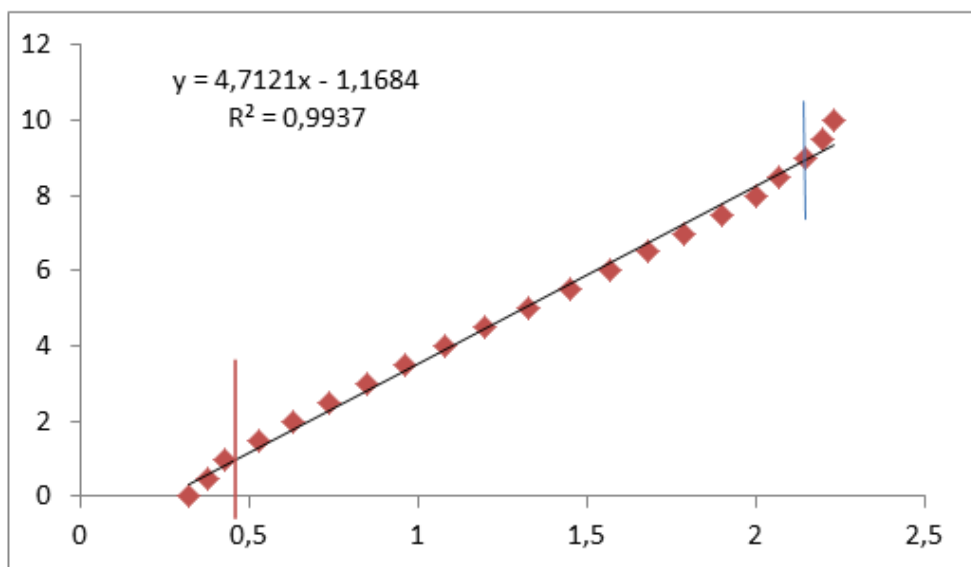


Gráfico 2. Repetição com as regiões extremas não lineares

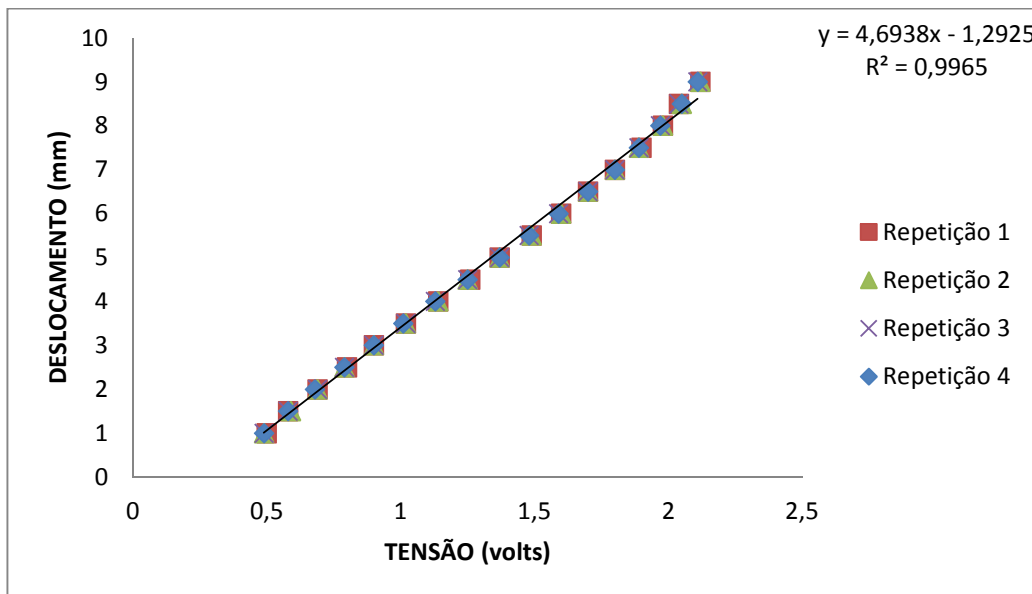


Gráfico 3. plotagem de análises

O Gráfico 3, serviu para verificação da existência de histerese no sensor por carga residual magnética no núcleo, onde ao observar os pontos é possível identificar que por quase não haver diferença entre um ponto e outro não há histerese.

Após a realização das quatro repetições obteve-se a equação da reta do sensor, a qual retorna o deslocamento ocorrido a partir da variação da tensão. A Equação 3, obteve um coeficiente de correlação de Pearson de 0,996 que indica uma correlação com alto grau de confiabilidade entre tensão e deslocamento. A Equação 3 é demonstrada abaixo:

$$Y(\text{mm}) = 4,6938x(\text{V}) - 1,2925 \quad [3]$$

Por conseguinte à obtenção da equação passou-se a calcular o erro percentual médio, entre o valor previsto pela equação aplicado a tensão lida pelo microcontrolador e o deslocamento conhecido. O cálculo executado resultou num erro médio de 1,69%. A Tabela 2 demonstra os valores calculados pela Equação 3.

Tabela2. Dados de verificação do erro percentual

Verificação do erro						
Tensão	deslocamento	y Previsto	Erro (mm)	Erro (mm)	Erro %	
0,49	1,0	1,007	0,007	0,007	0,7	
0,6	1,5	1,524	0,024	0,024	1,6	
0,68	2,0	1,899	-0,101	0,101	5,0	
0,79	2,5	2,416	-0,084	0,084	3,4	
0,92	3,0	3,026	0,026	0,026	0,9	
1,01	3,5	3,448	-0,052	0,052	1,5	
1,13	4,0	4,011	0,011	0,011	0,3	
1,24	4,5	4,528	0,028	0,028	0,6	
1,36	5,0	5,091	0,091	0,091	1,8	
1,45	5,5	5,514	0,014	0,014	0,2	
1,53	6,0	5,889	-0,111	0,111	1,8	
1,67	6,5	6,546	0,046	0,046	0,7	
1,8	7,0	7,156	0,156	0,156	2,2	
1,89	7,5	7,579	0,079	0,079	1,1	
1,97	8,0	7,954	-0,046	0,046	0,6	
2,05	8,5	8,330	-0,170	0,170	2,0	
2,11	9,0	8,611	-0,389	0,389	4,3	
Erro médio					1,69 %	

Conforme visualizado na Tabela 2, os erros oscilaram numa diferença entre 0,2 a 5% de erro, e o erro médio se situou em 1,69%, isto mostra que na região linear do sensor que vai de 1 a 9mm, o sensor apresentará medidas confiáveis, que é adequado para uma boa medição.

8 AVALIAÇÕES DO SISTEMA DE MONITORAMENTO POR LVDT, APLICADO A UM GIRASSOL.

Para testar o equipamento em campo, optou-se pela instalação em um tipo de planta com crescimento rápido, de característica comercial e ainda cujo seu caule não fosse do tipo colmo, o qual é facilmente danificado. Baseado nessas condições optou-se pela utilização do girassol.

A cultura escolhida apresenta grande adaptabilidade a vários tipos de climas, tolera baixas temperaturas e tem relativa resistência à seca. As características citadas, proporcionam ao girassol uma relevante adaptabilidade para o cultivo safrinha na região Centro-oeste, ou sucessor ao milho safrinha na Região sul, CAMPOS(2007). O cultivo do girassol proporciona derivações em sua utilização, como a alimentação animal, extração de óleo e sua utilização na elaboração de biocombustíveis conforme estudo realizado pela (SAVANACHI, 2008).

Foram plantadas em um recipiente algumas sementes de girassol, a uma profundidade de 5 cm, no dia 01 de fevereiro de 2013, e após certo período de vegetação instalou-se o LVDT em seu caule. Antes de instalar o transdutor mediou-se o diâmetro inicial do caule, o qual resultou em 12,26 mm. O sensor foi instalado com um apoio da parte traseira conforme a seta vermelha na Figura 23, para evitar o tombamento da planta, E também adequar o ângulo de contato da haste do sensor. Desta forma, garante-se que o sensor esteja sempre em contato com a cultura formando 90°, evitando inclinações indesejadas, que acarretariam numa deformação da planta e erro de medida da variação no caule.



Figura 23. Estrutura de apoio para avaliação de culturas ainda jovens

Referente à instalação em campo, utilizou-se a alimentação proveniente de uma fonte de computador, que quando ligada pela rede fornece +12V e -12 V, necessários para o funcionamento do sistema. Devido o sensor atuar em campo sujeito a variabilidade de estados climáticos, o dispositivo foi inserido em proteção polimérica para resguardá-lo. A Figura 24 expõe o modo de acomodação do *datalogger* em campo.

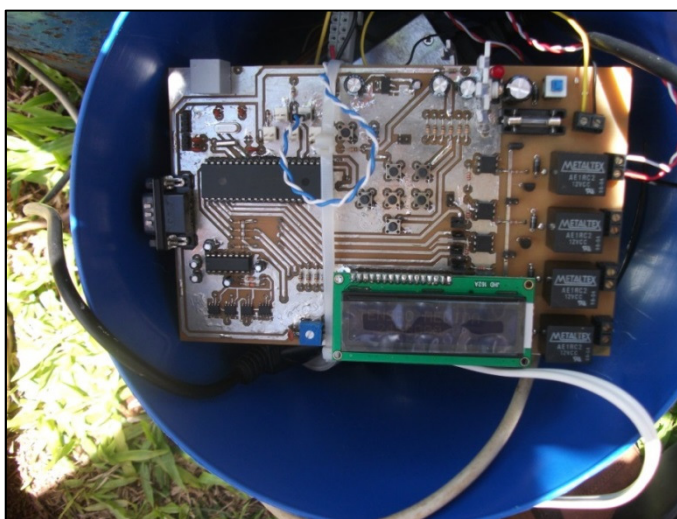


Figura 24. Sistema utilizado no resguardo do sensor para atuação em campo

Após a instalação do sensor em campo, iniciou-se a coleta dos dados no dia 28/02/2013, as 09h00min da manhã. A configuração estabelecida em *software* foi uma análise de monitoramento realizada a cada 30 min, possibilitando um acompanhamento diário do comportamento do girassol. Por conseguinte, no sexto dia de coleta obteve-se o seguinte gráfico de variação do caule. O qual demonstra a variação da cultura perante o estado matricial do solo, índice fundamental na tomada de decisões sobre irrigação.

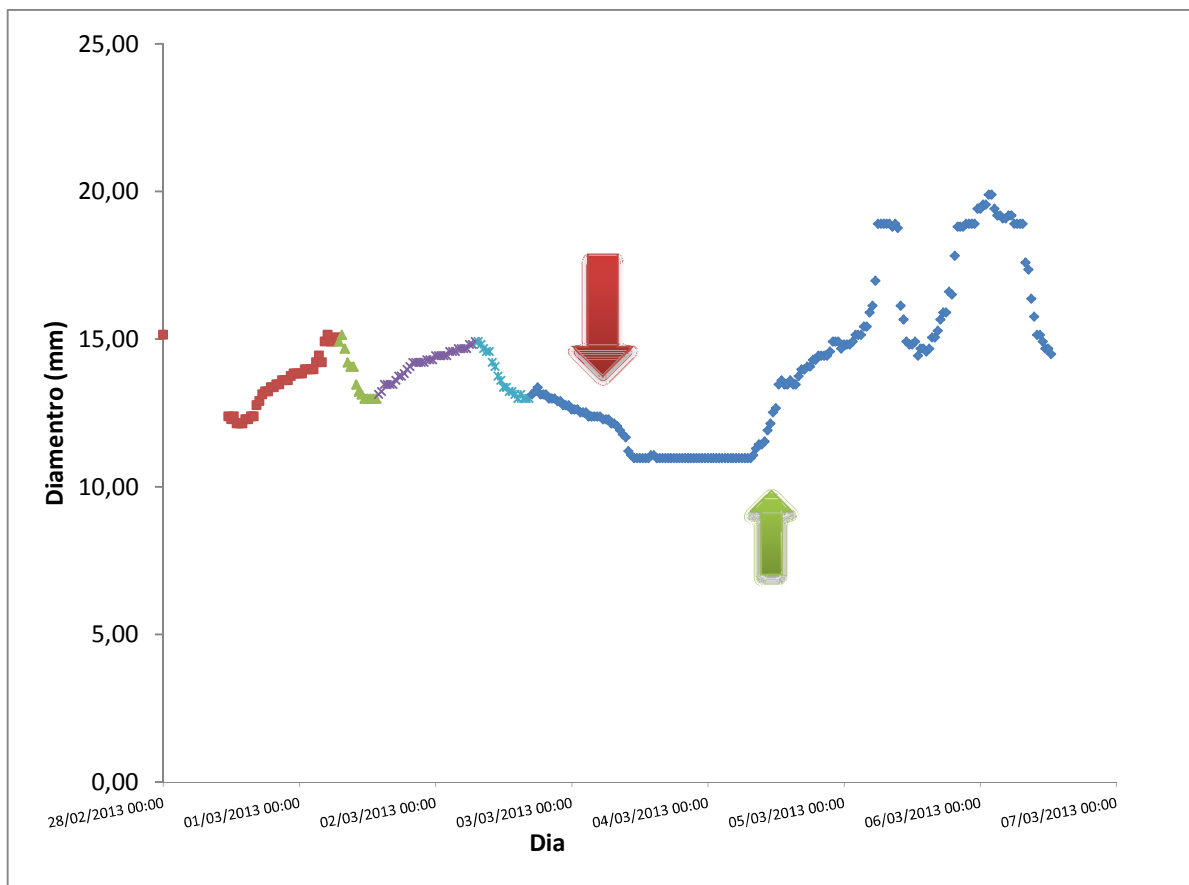


Gráfico 4. Variação do diâmetro do caule conforme acompanhamento

No Gráfico 4, se visualiza nos dois primeiros dias, que a planta variou seu caule normalmente ao longo do dia, contraindo de dia pela exposição a sol e dilatando de noite, pode-se verificar na região apontada pela seta vermelha, a diminuição da variação da amplitude diária que caracteriza num *stress* hídrico, onde a planta já não possui água o suficiente para a manutenibilidade de seu metabolismo. Essa característica se confirma na Figura 25 onde o solo encontra-se num potencial matricial reduzido, o que proporciona o déficit hídrico diretamente a planta.



Figura 25. Planta em estado de stress hídrico

Após constatação visual e via monitoramento do déficit no desenvolvimento da cultura, no dia 04/03/2013, foi molhado com água o solo do girassol. A reestruturação do girassol é visualizada na seta verde no Gráfico 6 onde a cultura voltou a apresentar uma maior variação diária do caule, mostrando sua recuperação frente ao déficit no potencial matricial do solo. A manutenção no solo proporcionou um aumento da umidade, o que acarretou numa recuperação do girassol. Essa recuperação do estado da planta é visualizada na Figura 26.



Figura 26. Reestruturação do girassol.

9 CONCLUSÃO

Após construção e testes do sensor, constatou-se que este se caracteriza como uma ferramenta em potencial a ser utilizada para verificar o estado hídrico de culturas e o seu desenvolvimento. Pois como demonstrado, o sensor desenvolvido apresentou-se em faixas adequadas quanto à taxa de erros, sua massa resultou num total de 50 gramas e modo de acoplamento nos testes verificados não apresentou danos à cultura em estudo, proporcionando assim a utilização do transdutor como ferramenta de monitoramento.

Apesar do pleno funcionamento do sensor, uma característica construtiva do dispositivo demonstrou-se de extrema necessidade no desenvolvimento. A característica em questão remete-se ao tap central do sensor, que primeiramente não existia, o que acarretou na impossibilidade de adequação de sinal, devido à inexistência de tap e por consequência a inexistência de uma referência no circuito de adequação, impossibilitando o desenvolvimento deste. No novo projeto, integrou-se o tap central possibilitando assim a adequação do sinal no transdutor e por conseguinte o acoplamento ao *datalogger*.

Quanto à sensibilidade do transdutor, essa se demonstrou adequada para detectar variações micrométricas do diâmetro do caule. Assim, conforme a variação e a posterior aquisição de dados, o sensor demonstra quantitativamente o estado de desenvolvimento, o qual caracteriza no monitoramento, e sobre este pode-se indexar decisões de irrigar caso a cultura monitorada possua senilidade hídrica, ou ainda pode-se tomar decisão de cessar irrigação, para adquirir alguma característica em especial fornecida pela cultura sobre o estado de estresse hídrico. Como exemplo de cultura a qual se pode atribuir o estado de estresse tem-se a uva, que quando se encontra no estado de estresse, libera um teor maximizado de sacarose no seu metabolismo. Essa característica fornecida pela uva e requerida na produção de vinhos e compotas.

10 REFERÊNCIAS

- ALHAIS, P.L. **Sistema de Sensores para Carro de Competição Integrado na Fórmula Student**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em engenharia electrotécnica e de computadores, Universidade Técnica de Lisboa, 2008
- BALBINOT, A. **Instrumentação e fundamentos de medida**. Rio de Janeiro LTC Vol.2 2007.
- BRAGA, N. **Banco de circuitos** 3ed. São Paulo, 1998.
- CAMPOS, M. L. **Indicações para utilização do girassol**, comunicado técnico, EMBRAPA 2007
- CARR, Joseph J. *Elements of electronic instrumentation and measurement*. Pearson 1996. P 340-343(CORREIA)
- Coelho HS. **Documentação de software: uma necessidade**. Texto Livre: Linguagem e Tecnologia. 2009. (2):1 1-6.
- Coughlin, F. Driscoll,F. **Amplificadores Operacionais y Circuitos Integrados Lineales** 4º Ed. Person(2001)
- Crescini, D., A. Flammini, D. Marioli, and A. Taroni, “**Application of an FFT based algorithm to signal processing of LVDT position sensors,**” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 47, no. 5, pag. 1119–1123, Oct. 1998.
- DONGWON, Y. SANGYONG, H. JUNGHO, P. SONAM, Y. **Analysis and design of lvd**t. 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 20), Korea, November 2011.
- HINCKLEY T.M and BRIKERHOFF D.N. **The effects of drought on water relations and stem shrinkage of quercus alba**, 1975.
- KANO, Y. HASEBE, S. HAUNG, C. **New Type Lvd**t Position Detector. IEEE, International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, 1998.
- LOSITO, R. ET ALL. **Design of a Linear Variable Differential Transformer With High Rejection**. IEEE transactions on magnetics, vol. 46, no. 2, february 2010.
- MASI and R. LOSITO, **LHC collimators low level control system**, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 55, no. 1, pag. 333–340, Feb. 2008.
- MARTINO, M. ET ALL. **Study of interference magnetic on a lvd**t prototype. IEEE transactions on magnetics, vol. 46, no. 2, february 2010.
- MEYDAN, T. and HEALEY G.W. **Linear Variable Differential Transformer – linear displacement transducer utilizing ferromagnetic amorphous metallic glas ribbons**. IEEE sensors and actuators, vol 32, 1992.

MIYADAIRA, A.N. **Microcontroladores PIC18, aprenda e programe em linguagem C**. 2ªed. São Paulo-SP Ed. Érica, 2011.

NATALE, F. **Automação Industrial**, série brasileira de tecnologia, 7ªed., São Paulo Editora Érica.(2007)

Park, J., Mackay, S., **Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems**, Elsevier, 2003

SEDRA, A.S. **MICROELETRONIC CIRCUITS**, by Oxford University press, Inc 2004

SPEZIA, G. **Automatic test bench for measurement of magnetic interference on IVDTS**. IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 60, no. 5, may 2011.

WENDLING, M. **Amplificadores Operacionais**, Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2010. Disponível em:
<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/3---amplificadores-operacionais-v2.0.pdf>

YUNSEOP, K EVANS, R.G.; IVERSEN, W.M. **Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless Sensor network**. IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 57, no. 7, july 2008.

VARGAS. **Técnicas com sistemas digitais**. 2002. Disponível em:
http://www.vargasp.net/download/livros/tecnicas_digitais.pdf

JUNIOR, V. **Linguagem C para microcontroladores PIC**. VIDAL Projetos Personalizados 1999.

SAVANACHI, E. **Os girassóis da Petrobrás**, dinheiro rural Edição 50 Agronegócios, 2008

JORAS, J.S.D. **Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e dos ramos na determinação das condições hídricas de citros, com base no manejo da irrigação**. Dissertação para obtenção do grau de doutor em agronomia. USP 2003.

APÊNDICE A - FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DO *DATALOGGER*