

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCELINO GOMES BADIN

**Aplicação de sensores descartáveis em uma rede de sensores
sem fio para o monitoramento do período de molhamento foliar,
temperatura e umidade**

São Carlos,
2009

MARCELINO GOMES BADIN

**Aplicação de sensores descartáveis em uma rede de sensores
sem fio para o monitoramento do período de molhamento foliar,
temperatura e umidade**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica.

Orientador: Prof. Edson Gesualdo

Co-orientador: Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Jr.

São Carlos,
2009

DEDICATÓRIA

Aos que nunca deixaram de acreditar em mim, Rachel Engler Andalaft, Vinicius José Maurício Ferreira da Rocha e Ana Paula Pedrosa. Amigos para todo o sempre.

Aos meus pais, Roberto Luiz Badin e Maria Rinalra Gomes Badin, que sempre me apoiaram e me incentivaram a ser sempre feliz.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Edson Gesualdo, sem o qual esse trabalho não seria possível graças ao seu empenho e orientação.

Ao Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann, pesquisador da EMBRAPA Instrumentação, responsável por me apresentar ao maravilhoso mundo da pesquisa e possibilitar a realização desse trabalho dentro do Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento em Instrumentação Agropecuária.

Sumário

Resumo	xiii
Abstract	xv
1 Introdução	1
1.1 Transdutores e sensores	2
1.2 Rede sem fio de sensores	4
1.3 Molhamento foliar	5
1.4 O condicionador de sinais	7
1.5 Objetivo	8
2 Materiais e Métodos	9
2.1 O sensor para determinação do período de molhamento foliar	10
2.2 O sensor de temperatura	12
2.3 O sensor de umidade	16
2.4 Implementação dos sensores ao nó sensor	17
2.5 Determinação da característica dos sensores	19
3 Resultados	23
4 Conclusão	27
Referências Bibliográficas	29
Apêndices	31
A Código da linha de base	33

Lista de Figuras

2.1	Eletrôdo de elementos interdigitados sobre (a) plástico, (b) papel comum e (c) papel manteiga [13]	10
2.2	Esquema elétrico usado para o condicionador do sensor de molhamento foliar . .	11
2.3	Resultado da simulação para encontrar os valores de R_s e R_l conforme equações 2.1, 2.2	12
2.4	Configuração em ponte de Wheatstone utilizada para o sensor de temperatura . .	13
2.5	Esquema de um amplificador de instrumentação INA126PA da Texas Instruments [14]	14
2.6	Esquema do condicionador de sinais para o sensor de temperatura	14
2.7	Gráfico de V_o x R_{sen} apresentando não linearidade	15
2.8	Gráfico de V_o x R_{sen} apresentando linearidade	15
2.9	Resposta da saída do condicionador de temperatura em virtude da variação da resistência do sensor	17
2.10	Resultado do teste com o sensor de umidade realizado por Steffens[15]	18
2.11	Diagrama de blocos da ligação do condicionador de sinais com o nó sensor	19
2.12	Resultado obtido através do conceito de linha de base do comportamento do sensor para determinação do período de molhamento foliar	21
3.1	Gráfico gerado a partir da leitura do sinal de saída do sensor de umidade	23
3.2	Gráfico gerado a partir da leitura do sinal de saída do sensor de temperatura . .	24
3.3	Medidas realizadas com o sensor de molhamento em um primeiro teste que apresenta uma grande instabilidade nas medidas como pode-se perceber na parte superior do gráfico	25
3.4	Resultado de medidas com o sensor de molhamento	25

Lista de Tabelas

1.1	Fatores de grande importância para especificação e escolha de sensores	3
1.2	Tipos de modo de operação de um nó sensor	4
2.1	Relação temperatura por resistência ôhmica do sensor de temperatura	16

Resumo

Em vista da crescente necessidade de levar tecnologia para o campo a fim de aumentar a produtividade e qualidade da produção agropecuária, a EMBRAPA Instrumentação desenvolveu uma rede de sensores sem fio para ser aplicada na agricultura de precisão. Uma das aplicações é para a determinação do período de molhamento foliar que possibilita combater de forma eficiente doenças fúngicas ou bacteriológicas que podem ocorrer nas plantações. A utilização de sensores descartáveis para esse tipo de aplicação é o objeto de estudo deste trabalho. Partindo da técnica utilizada em um equipamento conhecido por *Nariz Eletrônico* que possibilitou a determinação do funcionamento dos sensores, foram desenvolvidos os condicionadores de sinais para os sensores de temperatura, umidade e período de molhamento foliar, buscando-se a maior adequação possível de forma a não exigir alteração no sistema atual. Os resultados obtidos das medições com esses sensores de baixo custo foram satisfatórias e os três sistemas foram completamente compatíveis com o sistema atual. Pode-se ver que sistemas com um custo cada vez menor é uma realidade e a aplicação em larga escala desse tipo de tecnologia a fim de introduzir cada vez mais o conceito de agricultura de precisão aos produtores rurais torna-se cada vez mais possível.

Palavras-chave: molhamento foliar; sensores de baixo custo

Abstract

Since necessity for technology in the fields grows, led by needs to improve productivity and agriculture production quality, EMBRAPA Instrumentation developed a wireless sensors network for precision farming. A kind of application is to measure leaf wetness period which can avoid fungal and bacteriological diseases to occur on plantations. The objective of this work is to present the use of cheap sensors on those applications. From the *Electronic Nose* technique which made the sensors functionality be determined, leaf wetness, temperature and humidity conditioning signals systems was developed towards to not demand any changing on the actual system. The results from measures with this cheap sensors was satisfactory and all the signal conditioning systems was completely compatible with the actual system. As we can see, this systems are becoming cheaper and since this, the application of this technology in large scales is becoming even more possible for farmers.

Key-words: leaf wetness; cheap sensors

Capítulo 1

Introdução

Em 2008, o agronegócio foi responsável por 25% do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, 36% das exportações e 16% do empregos com carteira assinada [1]. Nos últimos 20 anos, o Brasil dobrou a produção de grãos com a mesma área plantada [2]. Esse aumento de produtividade deve-se ao aumento de usos de insumos de primeira linha, basicamente sementes, adubos e agrotóxicos, e da utilização da técnica conhecida por agricultura de precisão para um controle mais profissional, mais voltado para o mundo de negócios, para o controle de uma linha de produção onde o produto final é um produto agrícola e a linha de produção, o campo.

Segundo Molin[3], a agricultura de precisão não é uma técnica nova. Já tentou-se dividir o campo em células e cultivá-las de forma independente a fim de se obter melhores resultados. Assim como o pequeno agricultor que tem conhecimento de toda sua área e consegue, de uma forma empírica, aplicar os insumos conforme a necessidade de cada região, utiliza-se de certa forma da técnica de agricultura de precisão.

Atualmente a agricultura de precisão tem se amparado cada vez mais na tecnologia. Sistemas de GPS (*Global Positioning Systems*), DGPS (*Differential Global Positioning Systems*), sensores de temperatura, umidade do solo, sistemas automáticos de direção em tratores, controladores eletrônicos para aplicação de insumos são utilizados no campo a fim de aumentarem a produtividade, a qualidade da produção e promoverem a sustentabilidade dos recursos naturais empregados na manutenção dessa produção agrícola.

A agricultura de precisão visa compensar a variabilidade [3] do campo e emprega um conjunto de tecnologias para obter informações suficientes que auxiliem na tomada de decisões. Essa variabilidade do campo pode ser manejada a partir de diferentes estratégias [4] com o intuito de aumentar a produtividade e diminuir o consumo de insumos consequentemente aumentando

os lucros e inclusive para se obter um melhor aproveitamento dos recursos, como por exemplo, a utilização de forma sustentável da água para irrigação.

Para se ter uma idéia, hoje 820 hectares do território brasileiro são ocupados por laranjais e devido ao problema de *morte súbita*¹ dos pés de laranja iniciou-se um processo de irrigação que passou de apenas 1,5% dessa área em 1999 para 10,2% em 2004. Uma enorme quantidade de água passou a ser utilizada e passou a existir a necessidade de um controle que maximize a irrigação com uma quantidade de água que não prejudique os mananciais e outras fontes, ou seja, de forma a garantir a sustentabilidade [6].

Nesse contexto do agronegócio, onde se percebe a inserção de tecnologia no campo a fim de aumentar a produtividade e a qualidade, controlar a utilização de insumos em pequenas regiões dentro da propriedade rural baseado em informação a respeito da variabilidade regional do campo e no tratamento do agronegócio como uma indústria e não mais como um negócio de subsistência, a estratégia de controle por sensoriamento torna-se uma necessidade.

1.1 Transdutores e sensores

Transdutores e sensores confundem-se normalmente para identificar um mesmo objeto. Na realidade, o transdutor transforma uma forma de energia em outra e um sensor transforma uma energia em energia elétrica, sendo portanto, um caso especial de transdutor [7].

Por exemplo, um auto-falante é um transdutor, pois converte energia elétrica em energia mecânica possibilitando a reprodução de sons. Já um acelerômetro converte energias mecânicas (forças) em sinais elétricos, podendo dessa forma ser chamado de sensor.

Toda a razão do processo de sensoriamento tem como principal fator o mensurando, ou seja, o parâmetro físico de interesse. O mensurando pode ser uma certa propriedade do material ou uma condição do processo. Para cada caso deverá ser escolhido quais sensores e transdutores serão necessários para realizar a medida desejada. O sinal elétrico gerado pelo sensor será o responsável por prover todo o sistema de instrumentação com a informação desejada.

Todo sensor apresenta uma característica intrínseca que é sua função de transferência, ou seja, a relação de sinal entre a saída e a entrada.

Após ter determinado a grandeza física de interesse a escolha dos sensores deve ser feita levando-se em conta algumas particularidades de cada tipo de sensor de maneira a se adequar

¹Morte de laranjeiras de variedades tardias devido a causa ainda em estudo, provavelmente devido ao porta-enxerto utilizado [5]

melhor ao sistema. A tabela 1.1 apresenta alguns fatores que devem ser levados em conta.

Tabela 1.1: Fatores de grande importância para especificação e escolha de sensores

Especificações para sensores	
Faixa de operação	É necessário ter conhecimento do mínimo e máximo valores de sinal que causam excitação ao sensor, para se ter uma idéia da compliância do sinal de saída.
Fundo de escala da saída	Conhecer o máximo valor do sinal de saída impede problemas de saturação ou mesmo danos nos estágios seguintes.
Acuidade	Quanto a resposta do sensor se desvia do valor real a ser medido.
Precisão	A precisão de um sensor está relacionada a quantidade de vezes que ele consegue dar a mesma resposta para um mesmo sinal de excitação levando-se em conta os algarismos significativos de interesse.
Resolução	O menor incremento da saída devido a uma variação no sinal de entrada. A resolução informa qual a menor variação no sinal de entrada que é possível medir.
Linearidade	A função de transferência do sensor informa se a resposta ao estímulo de entrada é linear ou não e de posse dessa informação é possível se tomar providências para a linearização da saída do sensor ou não.
Limites	Deve-se saber quais são os limites mínimos e máximos de excitação que fazem com que o sensor produza uma informação útil na saída.
Histerese	É responsável pela característica de um sensor poder responder de formas diferentes no caso do sinal de excitação estiver decaindo ou aumentando.
Ruído	Para cada tipo de mensurando um certo tipo de ruído pode ou não ser causador de variações significativas nas medidas, devendo-se sempre levar em conta os níveis de sinais de excitação e os ruídos aos quais o sensor está sujeito.
Sensibilidade	É a capacidade do sensor de produzir uma saída com energia suficiente para o sistema de instrumentação em virtude de um sinal de entrada com pouca energia.
Especificidade	Determina o quão imune a fatores externos ao mensurando de interesse esse sensor é.
Estabilidade	Informa se o sensor necessita de calibrações constantes ou se durante um longo período de operação sua resposta continua como no início.
Robustez	O sensor será capaz de aguentar as intempéries às quais estará exposto? Aos fatores do ambiente como altas temperaturas, ruídos, impactos . . .
Segurança	O sensor oferece os níveis de segurança desejados para a operação de forma a não causar danos aos operadores ou mesmo a todo o resto do sistema?

1.2 Rede sem fio de sensores

Redes sem fio de sensores, *Wireless Sensors Networks (WSN)*, são formadas por sensores e atuadores pequenos, de baixo consumo de energia e com capacidade de processamento de sinais de forma a monitorar e interagir com o mundo físico [8]. O conceito difere das redes de computadores atuais pois cada nó executa apenas funções muito específicas e devido a necessidade de prolongar ao máximo a vida útil da bateria, nem sempre estão ativos.

Os nós podem operar de três formas distintas conforme pode ser visto na tabela 1.2.

Tabela 1.2: Tipos de modo de operação de um nó sensor

Modo de Operação	Descrição
Circular com disparo	Ao detectar o objeto a ser observado, o nó sai de seu estado de <i>sleep mode</i> e passa a enviar informações enquanto o objeto estiver presente.
Aquisição imediata	Operação onde o usuário faz uma requisição de medida ou atuação e o nó acorda e desempenha sua função, voltando ao estado de <i>sleep mode</i> após a sua execução.
Operação contínua	O nó fica enviando ou atuando com uma frequência determinada, sendo dessa forma o tipo de operação mais dispendioso com relação ao consumo de bateria.

Como é possível notar, o consumo de energia é um fator muito crítico para um nó sensor, pois em alguns casos, a substituição da bateria ou mesmo a sua recarga não são possíveis e o nó passa a ser inutilizado. Meios para utilização da energia do ambiente, como luz solar, gradientes de temperatura e outros fatores constituem linhas de pesquisas.

Um dos fatores mais críticos para o consumo de bateria está no sistema de transmissão e recepção de dados. O consumo para transmitir um *bit* é muito superior ao necessário para o microcontrolador processar centenas de *bits* de informação e por isso se faz necessário um bom planejamento da operação do sensor.

Os nós, por serem utilizados, normalmente, para cobrir grandes áreas não podem ser condicionados a ter uma comunicação restrita entre o nó e um ponto de acesso. Os nós precisam realizar a comunicação entre si de forma a atingirem o destino necessário ao armazenamento da informação recolhida, indo de nó em nó por caminhos pré-determinados ou não. Vale lembrar que os nós podem estar “acordados” ou em *sleep mode* e portanto seriam incapazes de funcionar como um elo de uma corrente entre o nó que necessita enviar a informação e o usuário que quer ser informado.

Uma outra característica peculiar da rede de sensores é que a necessidade da informação

sempre está relacionada com a localização do sensor, ou seja, o interesse está em saber a temperatura de determinado local, a umidade de uma certa sala ou região e assim por diante, e não a informação que um sensor em específico pode informar. Por exemplo, a requisição da informação é feita pedindo-se a leitura da temperatura da “sala 2”, não do sensor identificado por “3A22”. Portanto, de forma automática, por rádio frequência ou até mesmo por GPS é muito importante ter a localização, dentro da área monitorada, de cada sensor.

Atualmente os sistemas de rede sem fio que se encontram no mercado possuem um custo elevado e não são eficientes para aplicações agropecuárias. A EMBRAPA Instrumentação ² desenvolveu um sistema de monitoramento remoto via rede sem fio de sensores de baixo custo para medir e atuar na área agrícola [6]. O sistema é formado por nós sensores, nós atuadores, estações de campo e estação base.

O nó sensor é composto por uma placa principal microcontrolada, um módulo de comunicação sem fio localizado na placa principal e uma placa secundária responsável pelo condicionamento do sinal proveniente dos sensores utilizados. O microcontrolador realiza as funções de conversão analógico-digital, gerador de sinal PWM (Pulse Width Modulation), gerenciador do protocolo de comunicação da rede sem fio e gerenciador do consumo de energia. Para um menor consumo, o microcontrolador coloca o sistema em *sleep mode* sempre que possível.

O nó atuador tem a mesma construção que o nó sensor, porém a placa secundária é constituída por sistemas atuadores em solenóides e outros dispositivos que se queira controlar.

A estação de campo é composta por uma CPU, uma mini-estação meteorológica e uma interface de rede sem fio. Possui a função de armazenar e processar temporariamente os dados provenientes dos nós sensores e comandar os atuadores conforme eventos enviados pelo operador da estação base.

A estação base é composta por um computador pessoal com capacidade de se comunicar com a rede sem fio e através de um *software* coordena todo o sistema, apresenta os sensores com informações geográficas e faz todo o controle em tempo real.

1.3 Molhamento foliar

A presença de água livre na superfície das plantas e a temperatura ambiente são os fatores mais importantes para o desenvolvimento de doenças fúngicas e/ou bacterianas. Com o con-

²Referência ao Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento em Instrumentação Agropecuária da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, localizado em São Carlos-SP

hecimento do período em que a planta ficou molhada, a temperatura média e as características da cada patógeno, é possível fazer uma boa previsão sobre o aparecimento ou não de uma doença específica. Uma previsão confiável possibilita fazer aplicações racionais de defensivos, com redução de custos operacionais e menor poluição ambiental. A falta dessas informações provoca a aplicação de defensivos de forma descontrolada, mesmo quando as doenças não têm condições de propagação [9].

Segundo Sentelhas[10], a temperatura é o fator “que regula a velocidade das reações metabólicas tanto do patógeno como do hospedeiro. A chuva e a umidade do ar ... correspondem aos fatores que possibilitam a germinação e a penetração dos fungos e bactérias”.

Há também o fator vento, que é responsável pela dispersão e propagação dos patógenos a grandes distâncias mas que não será levado em conta nesse sistema de sensoriamento.

O período de molhamento foliar é um dos mais importantes parâmetros agrometeorológicos que influenciam nas doenças epidemiológicas das plantas [10]. Em vista disso há uma grande necessidade em determiná-lo. Existem três tipos de instrumentos para determinar o período de molhamento foliar:

- Instrumentos estáticos
- Instrumentos mecânicos
- Instrumentos eletrônicos

Os instrumentos estáticos são os mais rudimentares e produzem uma informação de pouca utilidade pois as informações precisam ter uma correlação com o tempo de molhamento em outras plantações e pouca informação para esse tipo de instrumento foi documentada.

Já os instrumentos mecânicos foram largamente utilizados nos anos 1970 [10] e até hoje é possível encontrá-los ainda em uso. Instrumentos mecânicos utilizam três penas sobre rolo de papel para ir marcando constantemente a variação de temperatura, umidade e período de molhamento foliar.

Instrumentos eletrônicos fazem uso de circuitos eletrônicos a fim de medir as grandezas de interesse. Os mais modernos utilizam sensores sensíveis a temperatura, umidade e água que geraram as medidas em intervalos programados. São os mais modernos e mais usados atualmente.

1.4 O condicionador de sinais

A necessidade do homem de obter cada vez mais informações a respeito do mundo que o cerca leva ao desenvolvimento acelerado de transdutores para uma infinidade de propriedades físicas. Os transdutores são os componentes eletrônicos responsáveis por fazer a transformação de uma propriedade física, como a velocidade do vento, a temperatura, o pH da água, etc., em um sinal elétrico representado pela variação de uma tensão.

Para se poder fazer a conversão da tensão captada nos terminais de saída do transdutor em um valor correspondente na unidade física de interesse é preciso realizar anteriormente o condicionamento, a amostragem e o processamento do sinal.

Segundo Randal[11], o condicionador de sinais recebe o sinal em seu estado natural diretamente do transdutor e tem a responsabilidade de condicioná-lo a um estado no qual o bloco responsável pela amostragem seja capaz de captar e processar a informação.

De acordo com Rauth[12], um instrumento de condicionamento de sinais necessita realizar algumas funções, tais como:

- Prover o sensor de um sinal de excitação, caso necessário.
- Ter um estágio de entrada compatível com as características do sensor.
- Detectar o sinal de entrada.
- Condicionar o sinal em uma magnitude compatível com os processamentos seguintes.
- Linearizar, quando necessário, e simplificar a extração da informação.
- Rejeitar ruído para melhorar a relação sinal/ruído (SNR)³.
- Ter proteção contra descargas eletromagnéticas (ESD)⁴.

A excitação aplicada ao sensor pode ser um sinal de corrente contínua, corrente alternada ou alguma combinação com ambos. Essa excitação será responsável por fazer o sensor responder à informação procurada. O cuidado que se deve ter é determinar as características do sensor antes de fazer a excitação de maneira a evitar sobre aquecimento, erros de segunda ordem ou até mesmo causar um dano permanente no sensor.

³Signal Noise Ratio.

⁴Eletrostatic Discharge.

Na maioria dos casos, o sinal de saída do sensor possui um nível de energia muito baixo, sendo necessário o uso de amplificadores que ajustem o nível de energia que será necessário entregar para o processador de sinais durante os estágios seguintes.

Quando necessária, a linearização deve ser feita para que o processamento desse sinal leve a uma resposta mais precisa. Alguns sensores apresentam comportamento não linear e essa característica deve ser levada sempre em conta ao projetar o condicionador de sinais.

Como já é sabido, cuidados contra ruídos são sempre importantes de serem feitos durante a fase de projeto. O custo para se solucionar um problema causado por ruídos em um protótipo é mais alto e no produto final, em alguns casos, torna-se desastroso.

E por fim, a proteção contra descargas eletromagnéticas é sempre necessária para garantir a segurança de operação.

1.5 Objetivo

Em vista da carência de tecnologia para o pequeno produtor e da necessidade cada vez maior da melhoria da qualidade da produção e melhor aproveitamento de recursos, a fim deste se manter competitivo, soluções como o sensoriamento aplicado à agricultura de precisão são de grande importância. Por outro lado, essas implementações tecnológicas apenas serão possíveis se forem concebidas e criadas levando-se em conta as limitações técnicas do pequeno produtor rural para operar o sistema e da necessidade de ser uma solução com custo baixo.

Por se tratar de transdutores descartáveis, a solução procurada por esse projeto visa o menor custo possível e que forneça resultados capazes de suprir a necessidade desse pequeno produtor e a simplicidade de operação.

Capítulo 2

Materiais e Métodos

Os sensores utilizados são produzidos por um processo de deposição sobre plástico (PET¹) ou papel. Para a deposição podem ser usados diversos materiais como, por exemplo, níquel, ouro, prata ou grafite. Para cada tipo de material se aplica uma técnica diferente, mas basicamente, todas são a deposição de uma camada muito fina do material escolhido sobre uma superfície de plástico ou papel a fim de garantir que as propriedades físicas e químicas desses materiais respondam de acordo com a propriedade que se quer observar.

Esse processo de fabricação garante que os sensores produzidos sejam de baixo custo [13], que atualmente, em ambiente de desenvolvimento, custam algo em torno de R\$0,50 a R\$1,00. Devido a isso, os sensores ganharam o nome de *sensores descartáveis*.

A geometria dos sensores segue a de eletrodos com elementos interdigitados como pode ser visto na figura 2.1.

A quantidade de elementos interdigitados ou o material a ser utilizado para deposição vai depender da resistência ôhmica que se quer atingir e o tipo de propriedade física que se quer mensurar.

Esses sensores não almejam grande sensibilidade nas medidas mas através de processos de produção bem controlados atinge-se uma ótima precisão, uma vez que atualmente o gargalo na qualidade dos sensores está no processo de fabricação que ainda encontra-se em desenvolvimento.

¹PET, politereftalato de etileno, material usado para fazer a deposição do material condutor

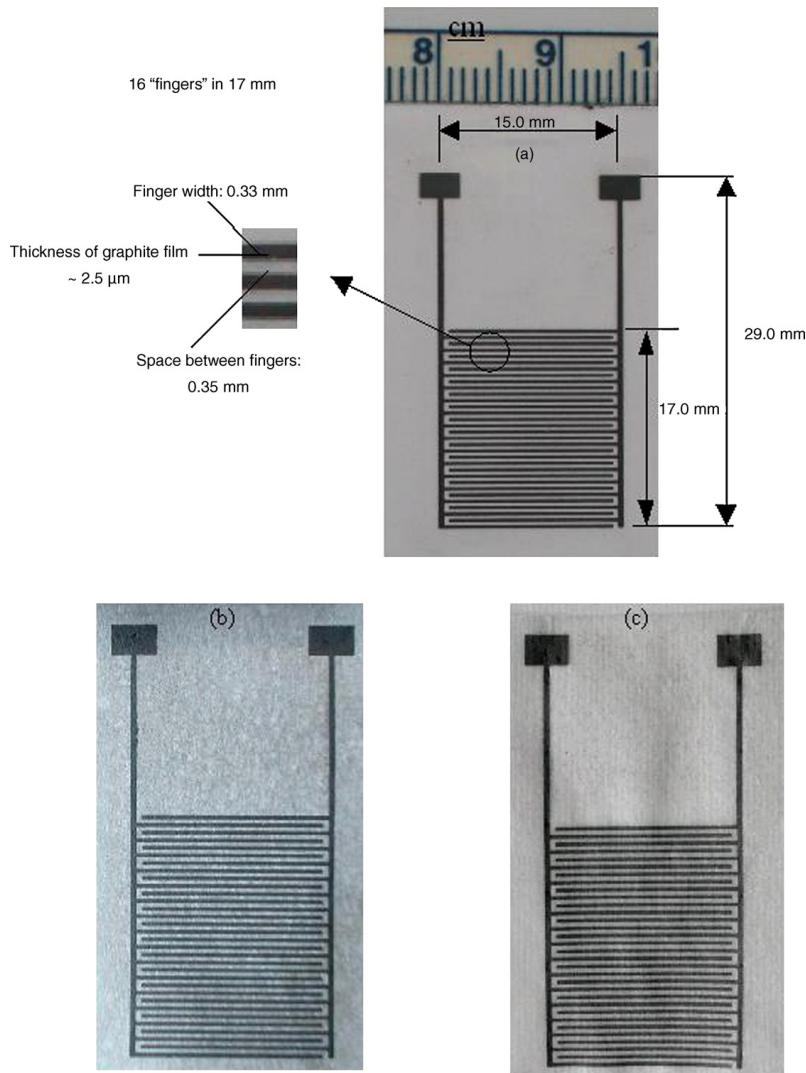


Figura 2.1: Eletrôdo de elementos interdigitados sobre (a) plástico, (b) papel comum e (c) papel manteiga [13]

2.1 O sensor para determinação do período de molhamento foliar

É um sensor passivo, fabricado com deposição de grafite sobre plástico e recoberto com um verniz que simula a textura da folha da planta a qual se quer obter informação sobre o período de molhamento foliar. Possui uma característica semelhante a uma chave. Quando apresenta-se seco, sua resistência característica é superior a $20\text{M}\Omega$ e ao entrar em contato com água essa resistência cai imediatamente algumas ordens de grandeza para um valor da ordem de $60\text{k}\Omega$. Levando-se em conta essa característica, determina-se a condição de molhado ou seco.

Para determinar esses estados utiliza-se um amplificador operacional com ganho em função da resistência do sensor. Esse amplificador operacional é utilizado na configuração não inversora.

2.1. O SENSOR PARA DETERMINAÇÃO DO PERÍODO DE MOLHAMENTO FOLIAR11

A excursão do sinal de saída, ou seja, a maior variação possível do sinal, é mantida entre V_{CC} e zero volt. O sinal colocado na entrada do amplificador operacional é uma fração da tensão de referência existente na placa, de 2,5V e é obtida através de um divisor de tensão resistivo. Pode-se verificar o esquema dessa ligação na figura 2.2, R_{sen} é a representação do sensor.

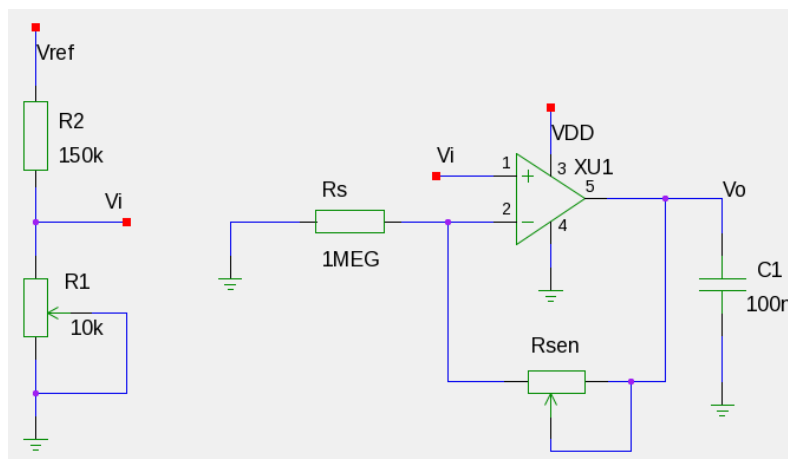


Figura 2.2: Esquema elétrico usado para o condicionador do sensor de molhamento foliar

O ganho do amplificador operacional nessa configuração não inversora é dado por

$$G = 1 + \frac{R_{sen}}{R_s} \quad (2.1)$$

e o divisor de tensão para se obter V_i é

$$V_i = V_{ref} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.2)$$

Sendo assim, a escolha de R_s é feita de forma a garantir que o amplificador operacional sature quando o sensor estiver seco.

Variando-se a tensão de entrada do amplificador operacional através do potenciômetro R_1 é possível fazer a calibração do sensor para que a saturação da saída ocorra apenas quando o sensor estiver seco.

Para os valores das resistências do divisor de tensão deve-se levar em conta a corrente que o atravessará já que é interesse de todo o sistema um consumo mínimo de energia. Assim, a resistência R_2 é fixada em um valor alto, 150k Ω , e a escolha de R_1 é feita a fim de encontrar uma tensão baixa que possibilite uma boa excursão do sinal de saída do amplificador operacional, portanto escolheu-se algo em torno de 100mV. R_1 é um trimmer de 10k Ω para possibilitar a calibração do sensor de forma a garantir que sature o operacional apenas quando realmente

estiver seco.

O capacitor C1 na saída é necessário para filtrar oscilações no sinal de saída. O seu valor e a sua necessidade foram determinados de forma empírica durante a fase de testes do circuito.

Na figura 2.1 pode-se ver diferentes testes com valores comerciais de R_s o que mostrou que a melhor escolha é a resistência de $1M\Omega$. V_i foi estabelecido próximo a $100mV$ de forma a se obter $2,5V$ na saída do operacional à $20M\Omega$ de resistência do sensor, e portanto $R1$ está com uma resistência de $7,5k\Omega$.

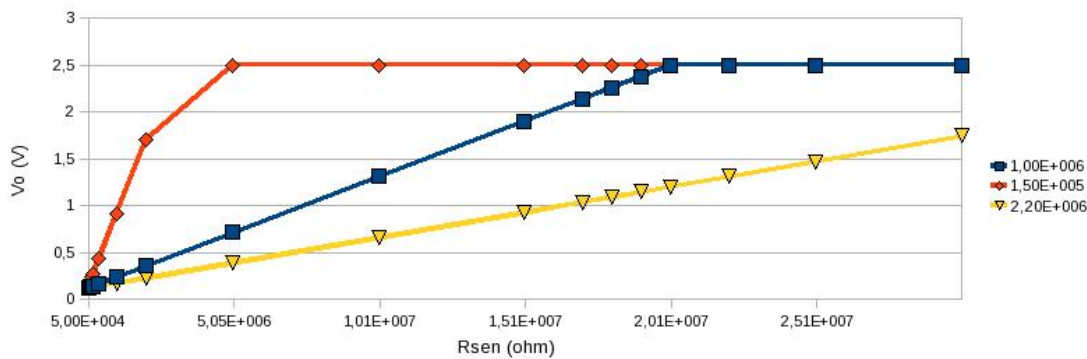


Figura 2.3: Resultado da simulação para encontrar os valores de R_s e $R1$ conforme equações 2.1, 2.2

Vale ressaltar que os três tipos de sensores, por serem de baixo custo e produzidos por um processo ainda em desenvolvimento, apresentam diferenças significativas nos valores de suas resistências, porém os testes preliminares, feitos em bancada, comprovam que a variação da resistência com a propriedade a ser medida é linear e sem diferença significativa entre um sensor e outro para a mesma finalidade.

2.2 O sensor de temperatura

O sensor de temperatura é um PTC (Positive Temperature Coefficient), ou seja, apresenta um aumento da resistência ao ser submetido a uma variação positiva de temperatura. Fabricado por um processo de deposição de ouro sobre plástico apresenta a geometria de um interdigitado de 16 dedos.

A resistência característica desse sensor fica em torno de $1,5k\Omega$. A partir de dados obtidos em bancada, a $25\text{ }^\circ\text{C}$, o sensor apresenta 1525Ω e varia $1,4\ \Omega/^\circ\text{C}$.

Para detectar essa variação na resistência o sensor é ligado a uma ponte de Wheatstone conforme figura 2.4.

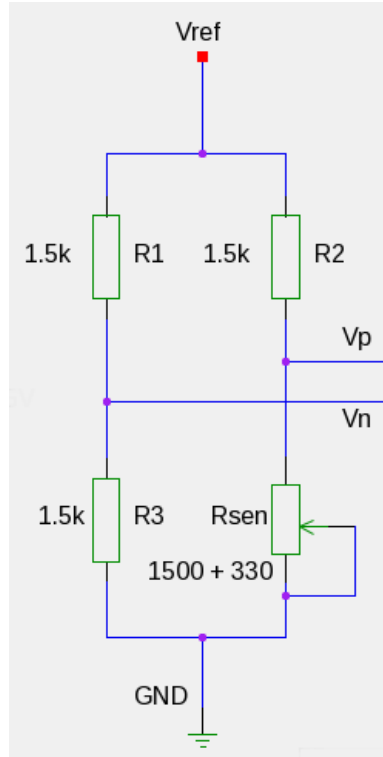


Figura 2.4: Configuração em ponte de Wheatstone utilizada para o sensor de temperatura

$$(V_p - V_n) = V_{ref} \cdot \left(\frac{R_{sen}}{R_{sen} + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_1} \right) \quad (2.3)$$

Da equação 2.3 percebe-se que se $R_1 = R_2 = R_3 = R_{sen}$ tem-se $(V_p - V_n) = 0$. Portanto, variando-se R_{sen} e mantendo-se sempre os mesmos valores para as outras resistências obtém-se uma tensão de saída em função da resistência do sensor na ponte.

É necessário amplificar esse sinal a fim de se obter um sinal com nível de energia razoável para o ADC. Para isso, faz-se o uso do amplificador de instrumentação para garantir uma alta impedância de entrada que não influencie no equilíbrio da ponte.

Na figura 2.5 vê-se um amplificador de instrumentação com ganho controlado pela resistência R_G . A saída é dada por

$$V_O = (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) \cdot \left(5 + \frac{80k\Omega}{R_G} \right) [14] \quad (2.4)$$

Portanto, respeitando-se a condição da ponte de Wheatstone com $R_1 = R_2 = R_3 = R$ e substituindo 2.3 em 2.4 tem-se

$$V_O = \frac{1}{2} V_{ref} \cdot \left(\frac{R_{sen} - R}{R_{sen} + R} \right) \cdot \left(5 + \frac{80k}{R_G} \right) \quad (2.5)$$

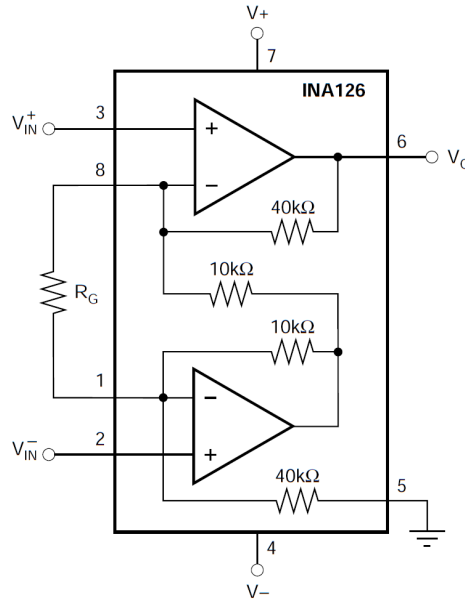


Figura 2.5: Esquema de um amplificador de instrumentação INA126PA da Texas Instruments [14]

Assim sendo, a equação 2.5 é a saída em função da resistência do sensor.

Na figura 2.6 pode-se ver a configuração completa para o condicionador de sinais do sensor de temperatura.

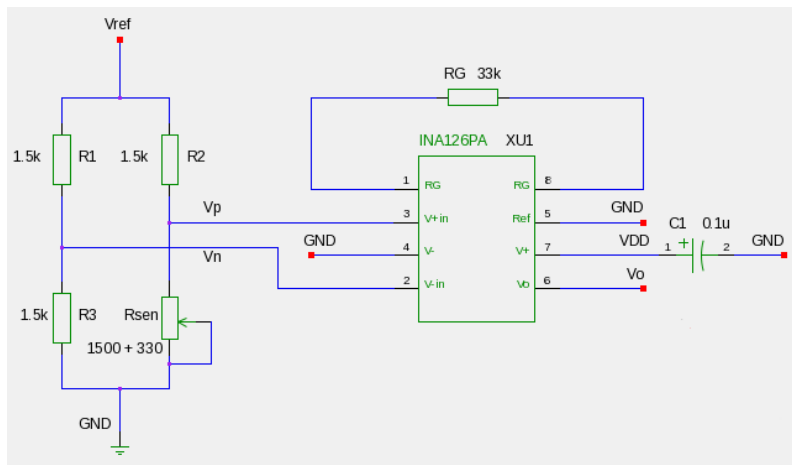


Figura 2.6: Esquema do condicionador de sinais para o sensor de temperatura

Uma simulação desse circuito da figura 2.6 no SPICE² mostrou que é necessário uma tensão mínima em $(V_p - V_n)$ que é solucionado colocando-se em série com R_{sen} uma resistência de 330Ω . O gráfico a seguir mostra a não linearidade causada (figura 2.7)

Mediante a solução encontrada, adicionando-se a resistência em série com o sensor, o prob-

²SPICE é um *software* para simulações de circuitos elétricos desenvolvido pela Univerisade de Berkley

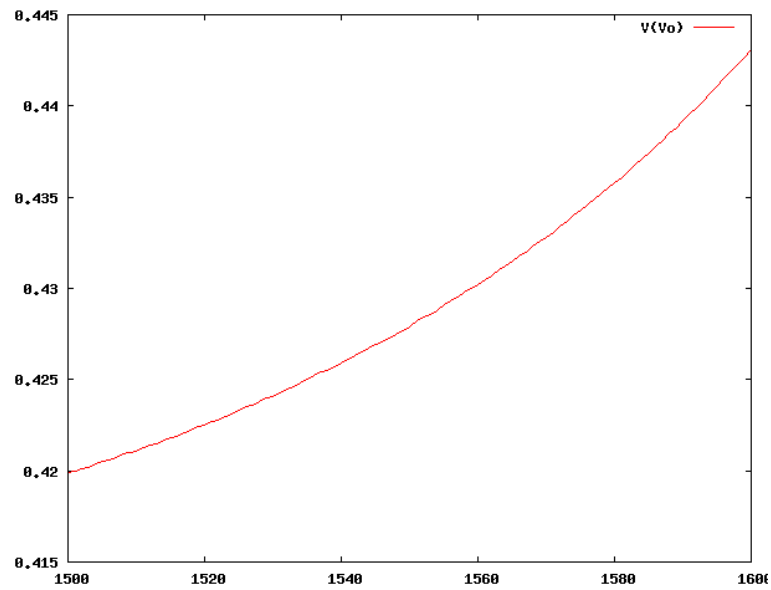


Figura 2.7: Gráfico de V_O x R_{sen} que apresenta uma não linearidade indesejada. A variação de R_{sen} é de 1500Ω a 1600Ω que cobre toda a faixa de temperatura de interesse para a qual esse sensor será utilizado

lema da não linearidade foi resolvido e a equação 2.5 foi alterada para

$$V_O = \frac{1}{2}V_{ref} \cdot \left(\frac{(R_{sen} + 330) - R}{(R_{sen} + 330) + R} \right) \cdot \left(5 + \frac{80k}{R_G} \right) \quad (2.6)$$

A figura 2.8 apresenta a saída linearizada após a adição da resistência em série.

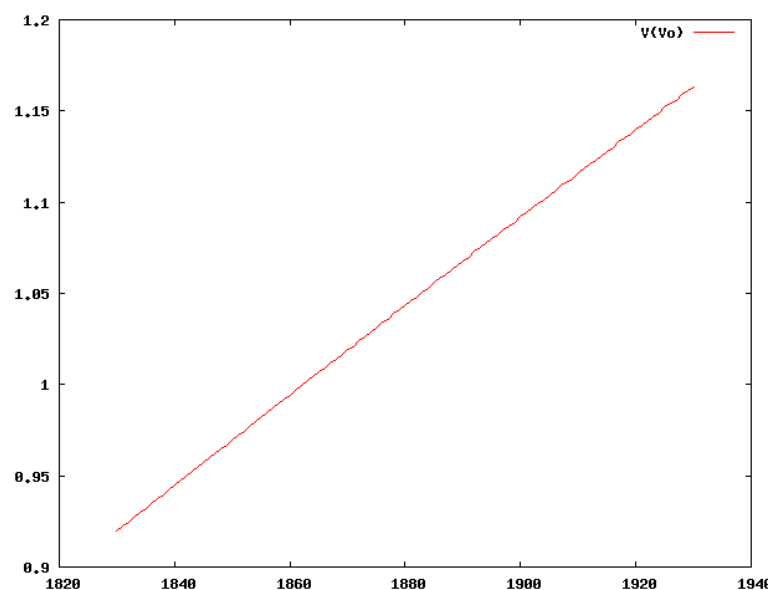


Figura 2.8: Gráfico de V_O x R_{sen} apresenta depois da adição de uma resistência em série uma saída linear de $(V_p - V_n)$ que possibilita o condicionamento correto desse sinal

O intervalo de temperatura de interesse a ser medido situa-se entre 10°C e 50°C e é está

compreendido variando-se a resistência de 1500Ω a 1600Ω como pode ser visto na tabela 2.1 que é o resultado dos testes em bancada feitos com esse sensor. Assim, dentro desse intervalo procurou-se um ganho que fornecesse uma saída que não superasse $2,5V$ no maior valor de resistência visto a equação 2.6.

Tabela 2.1: Relação temperatura por resistência ohmica do sensor de temperatura

Temp ($^{\circ}C$)	R (Ω)
13	1517
14	1519
15	1520
16	1521
17	1522
18	1523
19	1524
20	1525
21	1526
22	1527
23	1528
24	1529
25	1530
26	1531
27	1532
28	1533
30	1545
33	1548
36	1551
39	1554
42	1556
45	1558

O ganho encontrado que produz uma saída de $2,5V$ ao atingir 1600Ω é de $16,9626$, para encontrar a resistência R_G com valor comercial E96 (tolerância de 1%) que mais aproxima-se ao ganho desejado usou-se a equação 2.4 e foi possível determinar que $R_G = 6810\Omega$. Um outro fator, não menos importante, que também é levado em conta na determinação do ganho é a resolução da saída, uma vez que a resolução mínima do ADC é de $2mV$. Esse ganho possibilitou uma resolução de aproximadamente $6mV$. A figura 2.9 possibilita a visualização do comportamento da tensão de saída do condicionador em virtude da variação da resistência do sensor de temperatura.

2.3 O sensor de umidade

O sensor de umidade, assim como o sensor de temperatura é um interdigitado de 16 elementos, porém fabricado por um processo de deposição de grafite sobre papel e apresenta uma

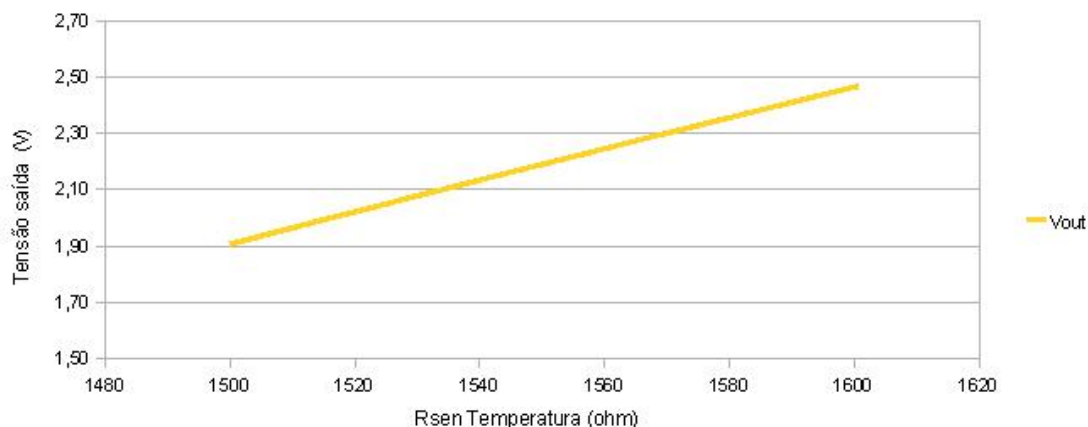


Figura 2.9: Resposta da saída do condicionador de temperatura em virtude da variação da resistência do sensor

resistência em torno de $500k\Omega$ quando imerso em um ambiente com 100% de umidade. Ao diminuir o percentual de umidade a resistência aumenta drasticamente, chegando a $12M\Omega$ a 50% de umidade.

O condicionador de sinais para esse sensor tem a mesma configuração do condicionador do sensor de temperatura, por ambos serem resistivos e variarem linearmente.

De acordo com Steffens[15], esse sensor de umidade apresenta uma resposta muito rápida quando exposto a uma variação imediata de 40% de umidade no ambiente do laboratório para um recipiente fechado com gás nitrogênio a 1% de umidade e também uma grande repetitividade de medidas usando o mesmo sensor.

A figura 2.10 mostra resultados do experimento realizado por Steffens[15] onde é possível perceber a resposta muito rápida do sensor de umidade e sua boa precisão em testes repetitivos com o mesmo sensor.

Baseando-se nesse estudo pode-se escolher os valores de resistências e ganho para esse condicionador.

2.4 Implementação dos sensores ao nó sensor

Após o projeto dos três condicionadores de sinais necessários para o sistema de determinação do período de molhamento foliar, algumas considerações são necessárias para implementá-los todos juntos no nó sensor.

O nó sensor, como dito anteriormente é microcontrolado. O microcontrolador utilizado é um PIC16F88. Em sua placa ficam disponíveis os acessos para todas as portas de I/O, terra comum

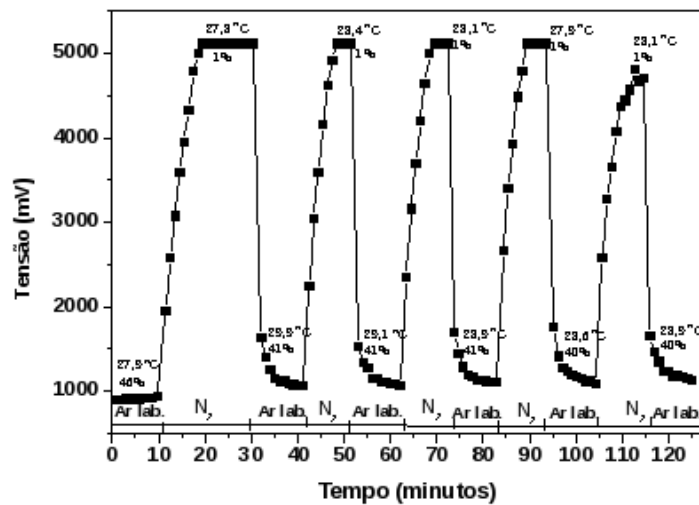


Figura 2.10: Resultado do teste com o sensor de umidade realizado por Steffens[15]

e V_{CC} , 3,3V. Uma tensão de referência, de 2,5V, é garantida por um regulador de tensão e também fica disponível. Esse microcontrolador roda um *software* que é o responsável por ativar os sensores, realizar a conversão AD, armazenar essa informação e transmiti-la para a estação de campo ou estação base diretamente.

Esse *software* permite uma série de configurações. Pode-se configurar o modo de operação (ver a tabela 1.2 no capítulo anterior), o intervalo de aquisição em minutos, quantas aquisições serão feitas por motivos de se obter uma média, tempo de estabilização do circuito para realizar uma medida correta e outras configurações relacionadas com a memória, como por exemplo, quando a memória estiver cheia se interrompe a gravação ou grava sobre o registro mais antigo.

Toda essa configuração é feita via *software*. Na estação base é possível executar um comando que será interpretado pelo nó sensor. Para isso, basta ligar o nó sensor e enviar o comando via estação base.

Portanto, para os sensores a serem conectados ao nó serão utilizados os sinais de tensão de referência, tensão de alimentação V_{CC} e três conversores AD, conforme esquema da figura 2.11.

A fim de evitar que a saída tanto da ponte de Wheatstone quanto da porta GPIO³ do microcontrolador apresentem uma variação no sinal devido a impedância do circuito condicionador de sinais, usam-se dois amplificadores operacionais na configuração seguidor de emissor para alimentar a tensão de referência (V_{ref}) e a tensão de alimentação dos condicionadores (V_{DD}). Esses amplificadores operacionais estão ligados na tensão de alimentação do nó sensor. O con-

³GPIO, sigla para *General Purpose Input Output*, que designa portas de entrada e saída de uso geral que o microcontrolador possui.

sumo do amplificador operacional sem carga é desprezível, assim, mantém-se a política de baixo consumo necessária aos nós sensores da rede.

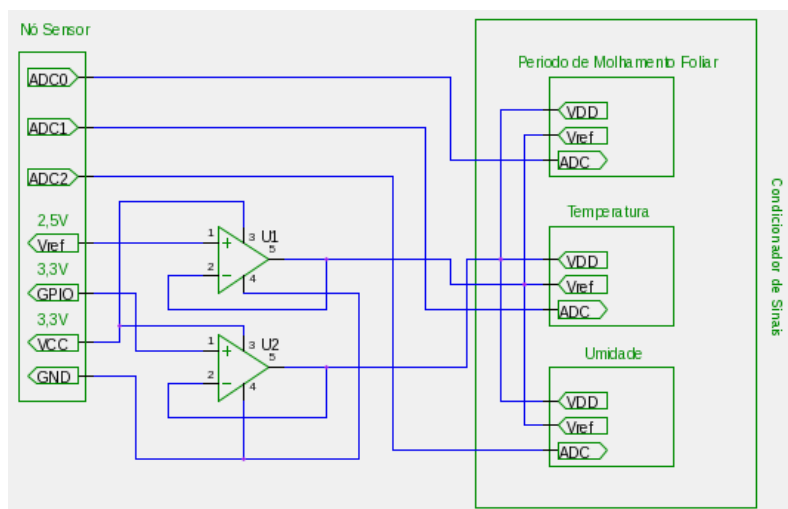


Figura 2.11: Diagrama de blocos da ligação do condicionador de sinais com o nó sensor

Uma vez conectado o condicionador de sinais no nó sensor, este passará a recolher informações e armazenar as tensões lidas nos ADCs e as enviará de tempos em tempos para a estação base que armazena em um banco de dados as leituras. Esse banco de dados é no formato XML (*Extended Markup Language*) que é compatível com uma série de *softwares* capazes de interpretar essas informações e gerar relatórios, plotar gráficos e etc.

O conversor analógico-digital do nó sensor tem resolução de 10 bits, tensão mínima de referência ligada ao terra do circuito e tensão máxima para referência de 2,5V gerados por um regulador a fim de manter um valor constante e preciso, e faz parte do microcontrolador do nó sensor, um PIC16F88⁴. Esse microcontrolador é de baixo consumo e baixo custo.

Uma vez que o sistema esteja rodando, sempre é possível acessar a estação base e recolher a informação necessária para a geração de relatórios.

2.5 Determinação da característica dos sensores

Esse trabalho foi desenvolvido no grupo de trabalho do Dr. Paulo Herrmann, pesquisador da EMBRAPA Instrumentação, para desenvolvimento dos sensores descartáveis.

Em vista disso, no início do trabalho foi necessário realizar um experimento para determinar a eficácia do funcionamento dos sensores. Para tanto, baseou-se os testes em um dispositivo que já encontra-se em funcionamento e foi o responsável pelos primeiros testes com esse tipo de

⁴Microchip Inc.

sensor, o *Nariz Eletrônico* [16]. Uma vez que já se tinha resultados com esse equipamento, a idéia foi montar algo parecido que se acoplasse ao nó sensor e produzisse algum resultado para comparação.

Foram realizadas medições em bancada em ambiente controlado a fim de se determinar as características de cada sensor. Foi necessário determinar os patamares de resistências para o sensor de período de molhamento foliar, saber para qual valor de resistência ele estaria molhado e para qual valor, estaria seco. Para o de temperatura, a relação resistência x temperatura em graus Celsius e para o de umidade, resistência x percentual de umidade.

Após essa tarefa foi necessário alterar o *software* do microcontrolador do nó sensor de modo a incluir as funções necessárias para, o que se denominou, conceito de *linha de base* e em seguida montar o condicionador de sinais compatível com esse conceito.

O conceito de linha de base corresponde a se ter na saída do condicionador de sinais um nível DC conhecido. Para isso, aplica-se um sinal PWM⁵ na entrada, partindo-se do zero e subindo esse sinal até que se obtenha o valor desejado na saída.

No caso do *Nariz Eletrônico* todo o controle é feito via um *software* que roda em um microcomputador, já para a rede de sensores, todo esse processo necessita rodar no nó sensor e portanto teve que se desenvolver um novo sistema para o nó poder incluir esse conceito de linha de base.

Foi necessário desenvolver uma rotina para controlar o PWM do microcontrolador de forma a ser possível aumentar o valor da tensão no mínimo passo que o PIC16F88 permite e incluir uma rotina para monitorar a saída do condicionador a fim de encontrar o valor desejado na saída. Dessa forma, de posse da tensão de entrada gerada pelo microcontrolador, da tensão de saída obtida e a função de transferência do condicionador de sinais é possível determinar a resistência do sensor utilizado.

O modelo de condicionador de sinal utilizado foi como o descrito para o sensor para se medir o período de molhamento foliar (ver figura 2.2).

Dessa forma o sinal PWM gera a entrada V_i e o ADC monitora a saída V_o . No apêndice A é possível ver o código desenvolvido para o PIC16F88 que foi incluído na rotina do nó sensor.

O resultado obtido para o sensor de molhamento foi suficiente para provar que os sensores poderiam funcionar na rede de sensores.

Pode-se ver na figura 2.12 a resposta do Sensor1(AN0) que ao se molhar, o sinal vai para

⁵Pulse Width Modulation

valores próximos ao zero e seco para a saturação do amplificador operacional a qual o conversor identifica como 2,5V uma vez que a referência utilizada para a conversão é de 2,5V.

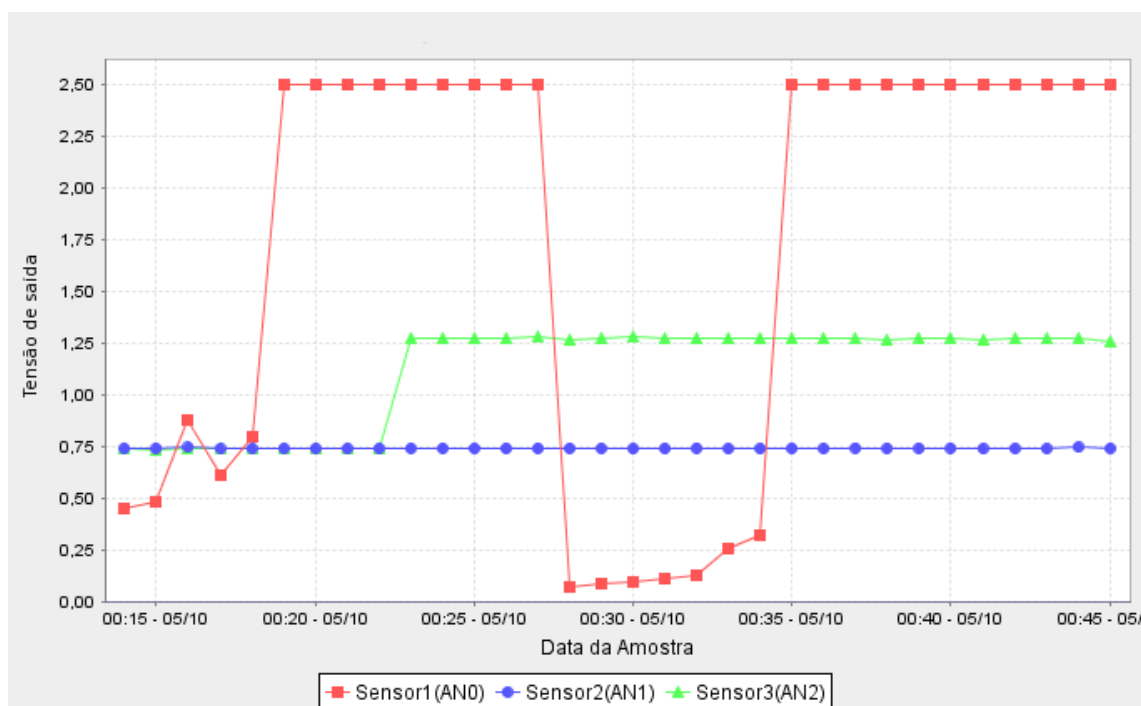


Figura 2.12: Resultado obtido através do conceito de linha de base do comportamento do sensor para determinação do período de molhamento foliar

O problema surgiu ao se colocar o sensor de temperatura nessa mesma configuração. Como a variação da resistência é de $1,4\Omega/^{\circ}\text{C}$ a resolução do equipamento ficou prejudicada, pois a diferença de tensão entre a leitura a uma temperatura 1°C superior é menor que 2mV, sendo assim, não é possível detectar a variação de um grau Celsius através desse sensor nessa configuração. Outro problema é que a necessidade da alteração no *software* do microcontrolador leva o nó a ficar incompatível com parte da rede de sensores.

Como o objetivo é encontrar uma solução compatível com o sistema atual e de baixo custo, implementar uma ponte de Wheatstone e criar um desbalanceamento capaz de ser detectado pelo conversor AD depois de passar por um amplificador de instrumentação foi a melhor solução encontrada. Dessa forma, sabendo-se o que era necessário para medir as variações do sensor de temperatura, novos testes foram feitos para que fosse possível determinar o comportamento do sensor de temperatura nessa nova configuração.

Capítulo 3

Resultados

Através do *software* que roda na estação base foi possível obter os dados que possibilitam a apresentação dos resultados obtidos.

O nó sensor foi programado para fazer uma leitura dos três sensores a cada 6 minutos. Esse tempo foi estipulado devido a condição de molhamento foliar. Esse tempo é suficiente para se ter a precisão necessária na determinação do período de molhamento foliar.

A cada 6 minutos, é feita a leitura e esses dados são armazenados na memória do nó sensor. A cada 60 minutos a estação base faz a leitura desses dados da memória do nó sensor e os armazena para criar um banco de dados.

Como pode ser visto na figura 3.1 o sensor de umidade apresenta uma instabilidade enorme com o ambiente. Está em testes a colocação desse sensor dentro de uma câmara porosa a fim de se tentar contornar esse problema, porém ainda não há resultados conclusivos que possam ser apresentados.

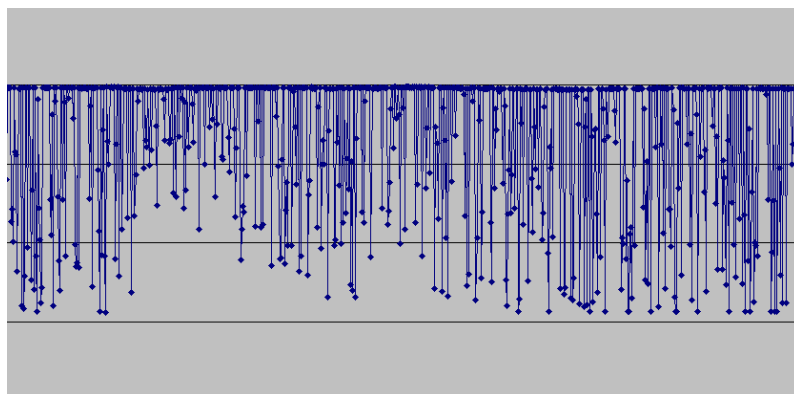


Figura 3.1: Gráfico gerado a partir das leituras feitas a cada 6 minutos pelo nó sensor do sensor de umidade, na horizontal o tempo e na vertical a tensão, que a tem como máximo o valor de 2,5V

Em vista desses resultados pode-se perceber que esse sensor não apresenta uma grande especificidade, ele é sensível a muitos fatores externos, como por exemplo a temperatura e o vento que acaba por dobrá-lo uma vez que é um sensor feito de papel.

O sensor de temperatura apresentou uma variação grande em torno de um valor médio (ver figura 3.2). Essa variação ainda não foi determinada. Pode estar acontecendo em virtude da variação das resistências usadas (tolerância 1%) ou mesmo fatores externos uma vez que ainda não se definiu como proteger o sensor de ações do tempo ou mesmo contato com seus dedos interdigitados.

Foi possível observar que esse sensor de deposição de ouro sobre plástico é muito sensível ao toque e se danifica muito facilmente. Talvez toda essa sensibilidade seja o que está causando essa variação. Foram colocados alguns filtros na saída mas mesmo assim a variação persistiu, o que leva a crer que ainda é necessário, assim como no sensor de umidade, a colocação de um envólucro.

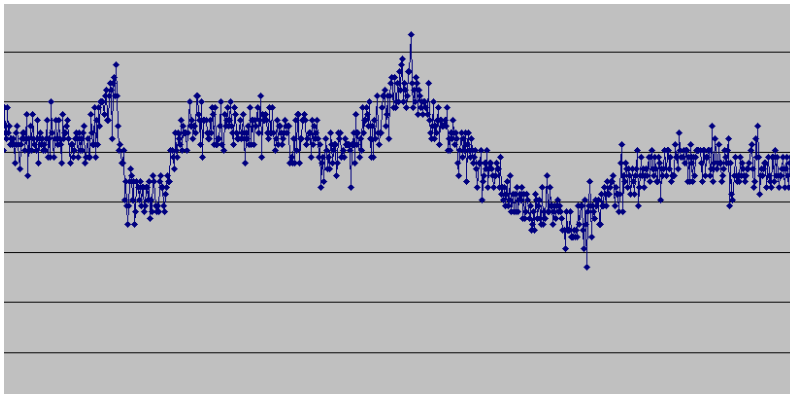


Figura 3.2: Gráfico gerado pelas leituras realizadas a cada 6 minutos pelo nó sensor do sensor de temperatura, na horizontal o tempo e na vertical a tensão de saída

A figura 3.3 mostra um primeiro resultado do sensor de molhamento (linha com valores mais acima). Assim como os outros ele apresentou uma instabilidade muito grande mas que foi contornada com a colocação de um filtro passa baixas na saída. Foi visto que essa instabilidade era causada também por necessidade de um tempo maior de estabilização do circuito antes de realizar a medida. Esse tempo é configurável via *software* e depois desses ajustes os resultados foram excelentes como pode ser visto na figura 3.4.

O sensor de molhamento tem o funcionamento mais simples e necessita apenas de uma apresentação melhor da informação. Quando o sinal estiver saturado o sensor apresenta-se seco e quando não estiver é porque está molhado. Basta apenas, através do ajuste apresentado na seção 2.1 colocar a partir de qual ponto, ou seja, de qual valor de resistência, o sensor apresentar-

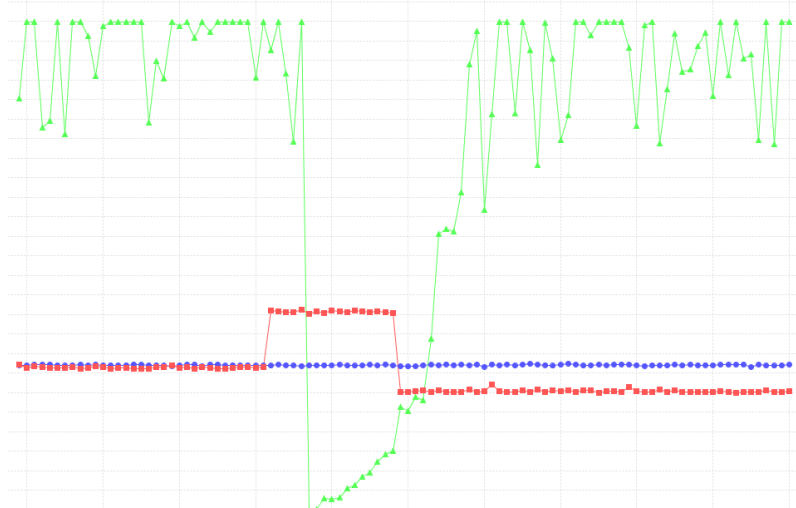


Figura 3.3: Medidas realizadas com o sensor de molhamento em um primeiro teste que apresenta uma grande instabilidade nas medidas como pode-se perceber na parte superior do gráfico

se-á seco.

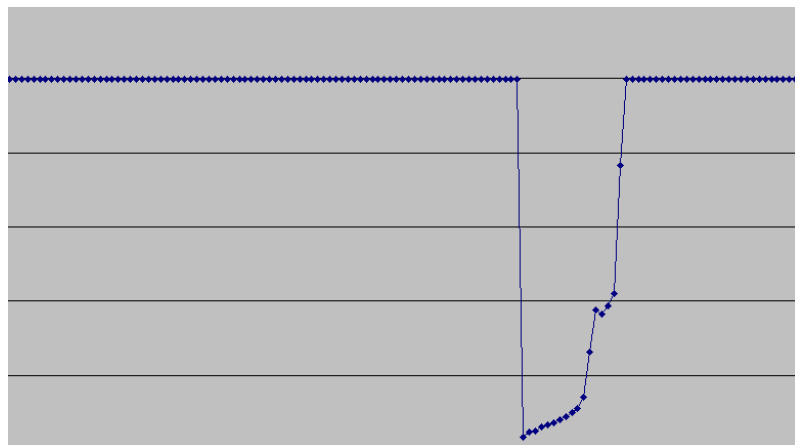


Figura 3.4: Medidas realizadas a cada 6 minutos pelo nó sensor que apresentam uma transição de seco para molhado e depois para seco novamente do sensor de molhamento foliar, com filtro na saída

Ainda é necessário criar uma interface mais simples para o usuário. A apresentação da informação na forma da tensão detectada não é simples ao usuário, uma conversão da tensão em temperatura, umidade ou até mesmo em tempo que a folha ficou molhada ainda precisa ser feita manualmente utilizando-se das equações características de cada sensor.

Esses primeiros resultados mostram que é possível a utilização desse tipo de sensor descartável em sistemas para a agricultura.

Capítulo 4

Conclusão

Em vista dos resultados obtidos, pode-se perceber que é necessário priorizar a busca por técnicas mais controladas para a produção dos transdutores. Da maneira em que se encontra o processo de fabricação, as características entre um transdutor e outro são muito variáveis, o que impossibilita a implementação de um circuito único para o condicionamento do sinal, que consiga servir para qualquer transdutor que venha a ser conectado a ele.

Outra grande necessidade, é a construção de um modelo elétrico do transdutor para que seja possível a construção de um sensor mais eficiente, simples e menos sujeito a variações causadas por agentes externos, como o aquecimento do sensor devido a corrente elétrica aplicada a ele.

Foi demonstrado que é possível implementar sensores de baixo custo no sistema atual da EMBRAPA Instrumentação sem a necessidade de nenhuma alteração no *hardware* e *software* existentes.

O sistema atual da rede de sensores sem fio necessita de uma remodelação tanto na apresentação das informações e configurações de operação quanto no próprio *hardware* a fim de possibilitar uma gama maior de aplicações e implementações de novos sensores e atuadores.

O *software* da rede sem fio de sensores precisa de uma interface mais amigável para o usuário realizar as configurações de operação das quais necessita e a apresentação dos resultados das medidas deve ser feita de forma mais simples e direta. Hoje, sem um conhecimento razoável em computação o usuário não é capaz de operar o sistema, o que torna inviável quando se fala em implementação em massa para o produtor rural.

Com relação ao hardware, toda uma nova concepção deveria ser levada em conta. A simplicidade de operação, a facilidade de implementação de novos recursos e um sistema de localização são imprescindíveis para uma rede de sensores sem fio que se propõe ser aplicada em áreas rurais.

Assim, esse trabalho mostra que é possível aplicar os transdutores de baixo custo, criando-se condicionadores de sinais simples e baratos, totalmente compatíveis com a rede de sensores sem fio existente.

Referências Bibliográficas

- [1] Oliveira, M. e Antunes, L. (2009) A máquina do campo segue crescendo. mas até quando? *Revista Exame Melhores e Maiores*, **1**, 450.
- [2] Guanzirolli, C. E. (2006), Agronegócio no brasil: perspectivas e limitações.
- [3] Molin, J. P. (1997) Agricultura de precisão. parte i: O que é e estado da arte em sensoria-
mento. *Engenhari Agrícola*, **17**, 97–107.
- [4] Molin, J. P. (1997) Agricultura de precisão. parte 2: diagnóstico, aplicação localizada e
considerações econômicas. *Engenhari Agrícola*, **17**, 108–121.
- [5] Prestes, R. A. e Colnago, L. A. (2003) Análise do perfil metabólico da casca de laranja doce
diagnosticada com morte súbita dos citrus por rmn. *Comunicado Técnico, EMBRAPA*, **55**.
- [6] Neto, A. T. e Ferrarezi, R. A. (2005) Wireless sensor network for variable rate irrigation
in citrus. *Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production*, **1**,
563–570.
- [7] Fowler, K. R. e Schmalzel, J. L. (2004) Sensors: The first stage in the measument chain.
Instrumentation and Measurement Magazine, IEEE, **7**, 60–66.
- [8] Willig, A. (2006) Wireless sensor networks: concept, challenges and approaches. *Elektrotech-
nik & Informationstechnik*, **123/6**, 224–231.
- [9] Sentelhas, P. C., Monteiro, J. E. B. A., e Gillespie, T. J. (2004) Electronic leaf wetness
duration sensor: why it should be painted. *International Journal of Biometeorology*, **48**,
202–205.
- [10] Sentelhas, P. C. (2004) Duração do período de molhamento foliar: aspectos operacionais
da sua medida, variabilidade espacial em diferentes culturas e sua estimativa a partir do

modelo de pennan-monteith. Tech. rep., Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

- [11] Rauth, D. A. e Randal, V. T. (2005) Analog-to-digital conversion part 5. *Instrumentation and Measurement Magazine, IEEE*, **8**, 44–54.
- [12] Schmalzel, J. L. e Rauth, D. A. (2005) Sensors and signal conditioning. *Instrumentation and Measurement Magazine, IEEE*, **8**, 48–53.
- [13] Herrmann, P. S. P. e MacDiarmid, A. G. (2008) Line patterning of graphite and the fabrication of cheap, inexpensive, “throw-away” sensors. *Sensors and Actuators B Chemical*, **130**, 723–729.
- [14] Texas, I. (2005) Micropower instrumentation amplifier. Tech. rep., Texas Instruments.
- [15] Steffens, C. (2009) *Desenvolvimento e caracterização de sensores de gases em nariz eletrônico para avaliação de compostos orgânicos voláteis com potencial aplicação no amadurecimento de frutas..* Master’s thesis, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões.
- [16] Herrmann, P. S. P. e Cruvinel, P. E. (2007) Sistema eletrônico para leitura e aquisição de dados de sensores descartáveis, aplicados à detecção de voláteis, desenvolvidos com filmes ultrafinos de poli-anilinas condutoras. *Comunicado Técnico, EMBRAPA*, **90**, 1–3.

Apêndices

Apêndice A

Código para o PIC16F88 que possibilita o conceito de linha de base

```
;***** Configuracao do sistema de linha de base *****  
;As rotinas a seguir sao usadas durante a configuracao da linha de base e  
;ao ativar o PWM e o conversor AD  
  
;Configuracao do PWM  
conf_pwm  
clrf CCP1CON ;  
clrf TMR2 ;  
bsf STATUS,5 ;BANK1  
movlw b'11111111';Configura o periodo do PWM  
movwf PR2 ; em 3906,250Hz ~ 256us  
bcf STATUS,5 ;BANK0  
movlw b'00000100';Configura o TMR2 para um prescaler  
movwf T2CON ; value = 1 e ativa o timer  
movlw b'00001100';Inicia o PWM  
movwf CCP1CON ;  
movlw 0x00 ;0 PWM comeca zerado (0% duty cycle)
```

```
movwf CCPR1L ;
return
```

```
;Liga o PWM com valores definidos em OFFSET_H (MSB) e OFFSET_L (LSB)
```

```
LIGA_PWM
```

```
call conf_pwm
```

```
movf OFFSET_H,W
```

```
movwf CCPR1L
```

```
movf OFFSET_L,W
```

```
movwf CCP1CON
```

```
call delay100ms_1 ;Delay de estabilizacao do PWM
```

```
return
```

```
;Linha de base fixa. Soma-se ao valor convertido pelo AD e verifica-se
```

```
;o estouro no bit de CARRY de STATUS. Se estourou, o valor convertido
```

```
;eh maior ou igual ao valor desejado.
```

```
;*****
```

```
;* 256 - (V(linha_base) * (1024 / VrefAD)) [LSB]*
```

```
;* 16 - (V(linha_base) * (1024 / VrefAD)) [MSB]*
```

```
;*****
```

```
encontra_linha_base
```

```
movwf ADCON0 ;Configura qual sera o canal
```

```
call conf_pwm ;Configura o PWM em 0% e liga o PWM
```

```
bsf LED_VERDE
```

```
inc_pwm
```

```
movlw b'00001100'
```

```
movwf PASSO_PWM
```

```
movf CCP1CON,W
```

```
addlw b'00010000'
```

```
movwf PASSO_PWM
```

```
btfsc PASSO_PWM,6
```

```

incf CCPR1L,F
movf PASSO_PWM,W
movwf CCP1CON

call delay100ms_1 ;Estabilizacao do PWM

bsf ADCON0,2 ;Inicia conversao
btfsc ADCON0,2 ;Testa se terminou a conversao
goto $-1 ; NAO - testa de novo

bsf STATUS,5 ; SIM - Verifica se eh o valor de
movf ADRESL,W ; linha de base desejado.
bcf STATUS,5 ; Primeiro testa os bits LSB e se
bcf STATUS,C ; a soma nao estourar incrementa novamente
addlw b'11100001'; o PWM, caso estoure testa para ver
btfss STATUS,C ; se os bits MSB sao o procurado. Se nao forem
goto inc_pwm ; incrementa o PWM novamente e refaz todo
movf ADRESH,W ; o teste.
bcf STATUS,DC ; ***** Calculo *****
addlw b'1111'; Linha de base = 700mV (1 0001 1111)
btfss STATUS,DC ; MSB -- 1 (16 - 1 = 15 --> 1111)
goto inc_pwm ; LSB -- 1 1111 (256 - 31 = 225 --> 1110 0001)

movf CCPR1L,W ;0 Valor encontrado do PWM eh o desejado
movwf OFFSET_H ; entao configura os registradores com
movf CCP1CON,W ; os valores do LSB e do MSB
movwf OFFSET_L ;

bcf LED_VERDE

call RET_PWM ;Retorna o PWM a condicao inicial
return

```

```
;***** Restauração de Parâmetros Iniciais *****  
RET_PWM  
CLRF CCP1CON  
clrf CCPR1L  
clrf PR2  
BCF PORTB,0  
BCF PIR1,1  
BCF PIE1,TMR2IE  
CLRF T2CON  
RETURN ;
```