

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE INFORMÁTICA

VICTOR RIBEIRO SILVA

**Uma Proposta para Automatização do
Monitoramento da Interceptação
Luminosa em Pastagens Utilizando uma
Rede de Sensores sem Fio de Baixo
Custo**

Goiânia
2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
INSTITUTO DE INFORMÁTICA

**AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
EM FORMATO ELETRÔNICO**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, **AUTORIZO** o Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás – UFG a reproduzir, inclusive em outro formato ou mídia e através de armazenamento permanente ou temporário, bem como a publicar na rede mundial de computadores (*Internet*) e na biblioteca virtual da UFG, entendendo-se os termos “reproduzir” e “publicar” conforme definições dos incisos VI e I, respectivamente, do artigo 5º da Lei nº 9610/98 de 10/02/1998, a obra abaixo especificada, sem que me seja devido pagamento a título de direitos autorais, desde que a reprodução e/ou publicação tenham a finalidade exclusiva de uso por quem a consulta, e a título de divulgação da produção acadêmica gerada pela Universidade, a partir desta data.

Título: Uma Proposta para Automatização do Monitoramento da Interceptação Luminosa em Pastagens Utilizando uma Rede de Sensores sem Fio de Baixo Custo

Autor(a): Victor Ribeiro Silva

Goiânia, 13 de Fevereiro de 2014.

Victor Ribeiro Silva – Autor

Dr. Iwens Gervasio Sene Junior – Orientador

Dr. Renato de Freitas Bulcão Neto – Co-Orientador

VICTOR RIBEIRO SILVA

Uma Proposta para Automatização do Monitoramento da Interceptação Luminosa em Pastagens Utilizando uma Rede de Sensores sem Fio de Baixo Custo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação.

Área de concentração: Sistemas de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Iwens Gervasio Sene Junior

Co-Orientador: Prof. Dr. Renato de Freitas Bulcão Neto

Goiânia
2014

VICTOR RIBEIRO SILVA

Uma Proposta para Automatização do Monitoramento da Interceptação Luminosa em Pastagens Utilizando uma Rede de Sensores sem Fio de Baixo Custo

Dissertação defendida no Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, aprovada em 13 de Fevereiro de 2014, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Ivens Gervasio Sene Junior
Instituto de Informática – UFG
Presidente da Banca

Prof. Dr. Renato de Freitas Bulcão Neto
Instituto de Informática – UFG
Co-orientador

[2]

Prof. Dr. Leandro Luís Galdino de Oliveira
Instituto de Informática - UFG

Prof. Dr. Ricardo Alexandre Reinaldo de Moraes
Campus Araranguá – UFSC

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador(a).

Victor Ribeiro Silva

Graduou-se em Ciências da Computação na UFG - Universidade Federal de Goiás. Durante sua graduação, foi monitor da disciplina de Banco de Dados do curso de Ciências da Computação do Instituto de Informática da UFG e implementador do MPS.Br. É especialista em Tecnologias para Gestão de Negócios pela EEEEC - UFG. Durante o Mestrado, na UFG, foi bolsista da FAPEG e desenvolveu uma solução automatizada para o monitoramento da interceptação luminosa em pastagens. Atualmente, é Gestor de Tecnologia de Informação na Secretaria de Segurança Pública do Estado de Goiás e também é investidor e consultor no ramo agropecuário.

Dedico este trabalho a minha esposa Elisângela Silva Dias e aos meus pais Eder Ribeiro e Waldilene Silva Ribeiro.

Agradecimentos

Agradeço a minha querida e linda esposa Elisângela Silva Dias, que sempre me apoiou e me deu força e incentivo para que eu terminasse o mestrado. Sem todo seu apoio e dedicação, tenho certeza de que eu não teria conseguido.

Agradeço aos meus pais Eder Ribeiro e Waldilene Silva Ribeiro pelo apoio constante e por sempre me ensinarem a importância dos estudos e por sempre fazerem tudo para que eu e minha irmã Laísa Ribeiro Silva de Abreu pudéssemos estudar e nos realizarmos profissionalmente.

Agradeço ao meu orientador prof. Dr. Iwens Gervasio Sene Junior por me prover a oportunidade de voltar ao mestrado, mesmo sem me conhecer o suficiente, e pela paciência e otimismo que sempre demonstrou.

Agradeço aos professores Dr. Juliano Lopes de Oliveira, que foi meu orientador na graduação, e MSc. Adriana Silveira de Souza, que me ensinaram a gostar de Engenharia de Software e sempre foram amigos leais e presentes. O meu muito obrigado por sempre me apoiarem nos momentos de dificuldades e sempre dividirem comigo os momentos de alegria.

Agradeço as minhas amigas Fabiana Freitas Mendes e Márcia Rodrigues Cappelle Santana, que leram esta dissertação e deram sugestões importantes. Agradeço a elas e a minha amiga Patrícia Gomes Fernandes pelos seus incentivos constantes e por suas amizades sinceras, desinteressadas e leais.

Agradeço ao INF/UFG e EMBRAPA pela oportunidade de crescimento técnico teórico e prático durante a realização deste projeto.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro no projeto Edital MCT/CNPq n.09/2010 - PDI, Processo n. 560269/2010-2.

Agradeço também a todos aqueles que de alguma forma me incentivaram e me ajudaram a concluir este trabalho.

O choro pode durar uma noite, mas a alegria logo vem ao amanhecer.

Valdeci Franco,
Mattos Nascimento.

Resumo

Silva, Victor Ribeiro. **Uma Proposta para Automatização do Monitoramento da Intercepção Luminosa em Pastagens Utilizando uma Rede de Sensores sem Fio de Baixo Custo**. Goiânia, 2014. 135p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

Uma rede de sensores sem fio foi utilizada para o monitoramento da intercepção luminosa em pastagens. O foco do trabalho foi a construção de um medidor de luminosidade de baixo custo como alternativa ao LI-COR LI-1776, equipamento de alto custo utilizado atualmente pela Embrapa, e também a construção de um nó sensor que funcionasse de maneira adequada em pastagens, sem ter a necessidade de uma mão de obra especializada para operá-lo.

Foram analisados os protótipos de medidores de luminosidade de baixo custo existentes e proposto um medidor, com seu respectivo nó sensor, de baixo custo adequado.

Este trabalho apresenta estudos teóricos e práticos, implementando dois protótipos de nós sensores que utilizam o componente fotoelétrico fotodiodo S7686.

Foram realizados testes e avaliado experimentalmente o desempenho de uma rede de sensores sem fio com topologia estrela. Nestes testes, a rede proposta apresentou os resultados esperados e protótipo desenvolvido apresentou resultados satisfatórios com relação ao custo de sua produção.

Palavras-chave

Rede de sensores sem fio, agricultura de precisão, monitoramento de luminosidade.

Abstract

Silva, Victor Ribeiro. **A Proposal for Monitoring Automating of Interception of Light in Pastures Using a Network Sensors of Low Cost Wireless**. Goiânia, 2014. 135p. MSc. Dissertation. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

A wireless sensor network was used to monitor the light interception in pastures. The focus of the work was the construction of a light meter low cost as a alternative to the LICOR LI-1776, high-cost equipment currently used by Embrapa , and also the construction of a sensor node that functioned properly in pastures, without the need for skilled labor to operate it .

It have been analysed prototypes of luminosity meters of existing low cost and proposed a meter, with its corresponding sensor node , suitable low cost.

This work presents theoretical and practical studies, implementing two prototypes of sensor nodes using the photoelectric component photodiode S7686.

Tests were performed and evaluated experimentally the performance of a wireless sensor network with star topology. In these tests, the proposed network showed the expected results and the prototype developed showed satisfactory results with respect to the cost of its production.

Keywords

Wireless sensor network, precision agriculture, monitoring of luminosity.

Sumário

Lista de Figuras	12
Lista de Tabelas	15
Lista de Símbolos	16
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Motivação para o trabalho	20
1.2 Objetivos	20
1.3 Contribuições	21
1.4 Metodologia empregada	22
1.5 Organização da dissertação	23
2 APLICAÇÕES DO MONITORAMENTO DE LUMINOSIDADE NA AP	24
2.1 Informações sobre luz	25
2.1.1 Conceitos básicos sobre luz	25
2.1.2 Unidades de medida relacionadas à luz	27
RFA	28
IAF	28
2.1.3 Como as plantas utilizam a luz	28
2.2 Medidores de luminosidade de alto custo	31
2.2.1 LI-COR LI-1776	31
2.2.2 LI-COR LAI-2200C	32
2.2.3 LI-COR LAI-2200TC	35
2.2.4 AccuPAR	37
2.3 Monitoramento da IL em pastagens	38
2.4 Outras aplicações do monitoramento da IL na AP	42
2.4.1 Monitoramento da IL no cultivo de cana-de-açúcar	42
2.4.2 Monitoramento da IL em vinhedos	45
2.5 Considerações finais	46
3 SENSOR MEDIDOR DE LUMINOSIDADE DE BAIXO CUSTO	47
3.1 Sensores	47
3.2 Sensores de luminosidade utilizados em medidores	48
3.2.1 LDR	48
3.2.2 Sensores de fotojunção	50
Fototransistor	53
Fotodiodo	56
3.2.3 Comparação entre os dispositivos fotoelétricos	57

3.3	Medidor de luminosidade de baixo custo	57
3.3.1	Luxímetro	58
3.4	Definição do cenário de testes	58
3.4.1	Equipamentos utilizados nos experimentos	58
3.4.2	Procedimentos para medição	61
3.5	Luxímetro como medidor de IL em pastagens	63
3.5.1	Apresentação dos resultados obtidos	63
	LI-COR LI-1776	63
	Luxímetro	65
	Experimentos realizados em campo	69
3.5.2	Análise em relação aos valores de referência	71
3.6	Protótipos de medidores de luminosidade de baixo custo	72
3.6.1	Protótipos usando o LDR	76
	Configuração divisor de tensão	76
	Protótipo usando o LDR e um amplificador logarítmico	79
	Análise em relação aos valores de referência	81
3.6.2	Protótipo usando o fototransistor	82
	Análise em relação aos valores de referência	84
3.6.3	Protótipo usando o fotodiodo	85
	Fotodiodo S7686	85
	Testes de validação	86
	Análise em relação aos valores de referência	98
3.7	Proposta de sensor de baixo custo adequado	98
3.8	Considerações finais	99
4	RSSF PARA MONITORAMENTO DE LUMINOSIDADE NA AP	100
4.1	Definição de RSSF	100
4.1.1	Características de uma RSSF	100
4.1.2	Aplicações de uma RSSF	101
4.1.3	Tratamento de dados em uma RSSF	102
4.1.4	Comunicação em uma RSSF	103
4.1.5	Processamento de uma RSSF	103
4.1.6	Requisitos de CPU e memória de uma RSSF	104
4.1.7	Transmissão de dados	104
	Módulos XBee	105
	O software X-CTU	106
4.1.8	Fonte de energia	107
4.1.9	Arquitetura da rede	109
4.2	Considerações finais	110
5	ESPECIFICAÇÃO DOS REQUISITOS DA REDE DE NÓS SENSORES E DA INTERFACE WEB	111
5.1	Requisitos da rede	112
5.1.1	Descrição geral	112
5.1.2	Requisitos específicos	113
5.2	Requisitos da interface web	114
5.2.1	Requisitos funcionais	114
5.2.2	Requisitos não funcionais	116

5.3	Descrição dos componentes da rede	117
5.3.1	Nós sensores	117
5.3.2	Estação base	117
5.3.3	Software monitor	118
5.4	Protótipos de nós sensores construídos	119
5.4.1	Nó sensor - versão 1.0 - PT1FD	120
5.4.2	Nó sensor - versão 2.0 - PT2FD	122
5.5	Considerações finais	127
6	Conclusões	128
6.1	Considerações finais	128
6.2	Trabalhos futuros	130
6.3	Agradecimentos	131
	Referências Bibliográficas	132

Lista de Figuras

1.1	Visão geral dos elementos da RSSF.	21
2.1	Espectro eletromagnético. Fonte: [14].	26
2.2	Radiações eletromagnéticas. Fonte: [22].	27
2.3	Crescimento do dossel. Fonte: [9]	30
2.4	LI-COR LI-1776. Fonte: [21]	32
2.5	LAI-2200C.	32
2.6	Sensor ótico LAI-2250.	33
2.7	LAI-2200TC.	36
2.8	AccuPAR LP-80.	37
2.9	Unidade leiteira da UFG.	40
2.10	Sistema de pastejo rotacionado em área de medidas desuniformes. Fonte: [28]	40
2.11	Visão panorâmica de piquetes, em uso, com medidas desuniformes. Fonte: [4]	41
2.12	Projeto de piquetes em área uniforme. Fonte: [28]	41
2.13	Visão panorâmica de piquetes de grande porte com irrigação por pivô central. Fonte: http://www.milkpoint.com.br/mypoint/99470/f_pastejo_rotacionado_irrigado_via_pivo_central_5296.aspx	42
2.14	Mote IRIS com placa de sensoriamento e altura 0.8m aplicado em plantação de cana-de-açúcar - Fazenda Itaiquara, 2011. Fonte: [27]	44
3.1	(a) Símbolo do LDR; (b) Superfície fotossensível de um LDR; (c) Vista lateral. Fonte: [30].	48
3.2	Respostas espectrais das células CdS, CdSe e Visão (comprimento de onda \times sensibilidade espectral relativa).	49
3.3	Luminosidade \times resistência: (a) escala logarítmica; (b) escala real.	50
3.4	Semicondutor tipo P e tipo N. Fonte: [1]	51
3.5	Junção PN. Fonte: [1]	51
3.6	Recombinação elétron/lacuna.	52
3.7	Camada de depleção. Fonte: [29]	52
3.8	Barreira de potencial.	53
3.9	Esquema de funcionamento do fototransistor.	53
3.10	Símbolo esquemático do fototransistor.	54
3.11	Corrente \times intensidade luminosa. Fonte: [20]	54
3.12	Configuração emissor comum	55
3.13	Símbolo esquemático do fotodiodo.	56
3.14	Lâmpada incandescente. Fonte: [21]	58
3.15	LICOR 1776. Fonte: [21]	59
3.16	Luxímetro Minipa, modelo MLM-1332. Fonte: [21]	59

3.17	Varivolt. Fonte: [21]	60
3.18	Matriz de contato. Fonte: [21]	60
3.19	Multímetro digital. Fonte: [21]	61
3.20	Esquema do arranjo experimental. Fonte: [21]	61
3.21	Arranjo experimental em laboratório. Fonte: [21]	62
3.22	Desenho esquemático do LI-COR LI-1776.	64
3.23	TAL × RFA.	65
3.24	Delimitação da região fotossensível do Luxímetro.	66
3.25	Tensão de alimentação da lâmpada × iluminamento.	67
3.26	TAL × RFA/iluminamento.	68
3.27	RFA × iluminamento.	68
3.28	Áreas Monitoradas × Interceptação Luminosa.	70
3.29	Componentes básicos de um nó sensor. Fonte: [26].	72
3.30	Esquema elétrico geral do protótipo do medidor de luminosidade. Fonte: [21]	73
3.31	Esquema elétrico geral do protótipo do nó sensor. Fonte: [21]	74
3.32	Esquema do circuito impresso em uma placa de fenolite do medidor de luminosidade. Fonte: [21]	74
3.33	Esquema do circuito impresso em uma placa de fenolite do nó sensor. Fonte: [21]	75
3.34	(a) PT1LDR em protoboard; (b) PT2LDR em placa de circuito impresso; (c) PT1FT disposto como nó sensor; e (d) PT1FT disposto como medidor de luminosidade.	75
3.35	LDR na configuração divisor de tensão. Fonte: [21]	76
3.36	TAL × $T_{Digital}$ do PT1LDR.	77
3.37	TAL × iluminamento $T_{Digital}$.	78
3.38	Iluminamento × $T_{Digital}$ do PT1LDR.	79
3.39	Esquema do PT2LDR. Fonte: [21]	79
3.40	TAL × $T_{Digital}$ do PT2LDR.	80
3.41	TAL × iluminamento $T_{Digital}$.	80
3.42	Iluminamento <i>versus</i> $T_{Digital}$ do PT2LDR.	81
3.43	Fototransistor na configuração divisor de tensão. Fonte: [21]	82
3.44	TAL × $T_{Digital}$ do PT1FT.	83
3.45	TAL × iluminamento $T_{Digital}$.	83
3.46	Iluminamento × $T_{Digital}$ do PT1FT.	84
3.47	Fotodiodo S7686. Fonte: [15].	85
3.48	Luxímetro utilizando o fotodiodo S7686 da Hamamatsu Photonics. Fonte: [16].	86
3.49	TAL × iluminamento $T_{Digital}$ com resistor de 1KΩ.	87
3.50	TAL × iluminamento $T_{Digital}$ com resistor de 10KΩ.	87
3.51	Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de 1MΩ.	89
3.52	Protótipo com resistor de 1MΩ × Luxímetro.	89
3.53	Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de 100KΩ.	90
3.54	Protótipo com resistor de 100KΩ versus Luxímetro.	91

3.55	Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de $10K\Omega$.	91
3.56	Protótipo com resistor de $10K\Omega \times$ Luxímetro.	92
3.57	Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de $1K\Omega$.	92
3.58	Protótipo com resistor de $1K\Omega \times$ Luxímetro.	93
3.59	Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de 100Ω .	93
3.60	Protótipo com resistor de $100\Omega \times$ Luxímetro.	94
3.61	Gráfico boxplot protótipo com resistor $1M\Omega$.	95
3.62	Gráfico boxplot protótipo com resistor de $100K\Omega$.	96
3.63	Gráfico boxplot protótipo com resistor de $10K\Omega$.	96
3.64	Gráfico boxplot protótipo com resistor de $1K\Omega$.	97
3.65	Gráfico boxplot protótipo com resistor de 100Ω .	97
4.1	Módulos XBee e XBee Pro serie 1 e serie 2 [42],[43]. Fontes: [16].	105
4.2	Interface do software XCTU.	107
4.3	Arquitetura da rede de sensores.	109
4.4	Esquema de envio de pacotes.	110
5.1	Rede de sensores sem fio.	113
5.2	Diagrama de casos de uso.	115
5.3	Base central.	118
5.4	Diagrama de blocos do software monitor.	119
5.5	Protótipo nó sensor PT1FD.	120
5.6	Esquema elétrico do protótipo do nó sensor PT1FD.	121
5.7	Arquitetura de hardware do nó sensor 2.0.	122
5.8	Esquema elétrico do nó sensor e as ligações entre as suas unidades.	122
5.9	Nó sensor PT2FD.	123
5.10	Esquema elétrico da unidade de processamento.	123
5.11	Diagrama de fluxo do software do microcontrolador.	124
5.12	Esquema elétrico da unidade de sensoriamento.	125
5.13	Esquema elétrico da unidade de energia.	126
5.14	Esquema elétrico da unidade de comunicação.	127

Lista de Tabelas

2.1	Relações entre as unidades métricas	28
3.1	Comparação entre os dispositivos fotoelétricos.	57
3.2	Dados de referência do LI-COR LI-1776.	64
3.3	Dados de referência do Luxímetro.	66
3.4	Coefficientes de correlação de Pearson r . Fonte: [3]	69
3.5	Valores da constante k .	94
6.1	Características dos protótipos de unidades de sensores	128
6.2	Características dos protótipos de unidades de sensores	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviatura/Símbolo	Significado
A/D	Analógico/Digital
AP	Agricultura de Precisão
API	<i>Application Programming Interface</i> - Interface de Programação de Aplicativos.
cd	Candela, unidade de medida do LI-COR
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i> - Unidade de Processamento Central
dBm	<i>decibel milliwatt</i> , unidade de medida da potência em decibéis.
DFFF	Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos. Mesmo que PPFd.
DIN	Pino de entrada do módulo XBee.
DOUT	Pino de saída do módulo XBee.
E	Iluminamento
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
ϵ_{ir}	Eficiência de interceptação
EUR	Eficiência de Uso da Radiação
F	Farad, unidade de medida de capacitância.
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
ϕ	Fluxo luminoso
HTTPS	<i>Hypertext Transfer Protocol over Secure Socket Layer</i>
I	Intensidade luminosa
IAF	Índice de Área Foliar. Mesmo que LAI.
IL	Interceptação Luminosa
L	Luminância
LAI	<i>Leaf Area Index</i> . Mesmo que IAF.
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
lm	Lúmen
lx	Lux, unidade de medida do Luxímetro

MAC	<i>Media Access Control</i> - Controle de Acesso ao Meio.
MCU	Microcontrolador
MHz	Megahertz, unidade de frequência que mede os ciclos por segundo.
MOTE	Módulo de processamento e comunicação sem fios ou nó
Ω	Ohm, unidade de medida da resistência
PAR	<i>Photosynthetically Active Radiation</i> . Mesmo que RFA.
PPFD	<i>Photosynthetic Photon Flux Density</i> . Mesmo que DFFF.
PT1FT	Protótipo 1 usando FotoTransistor
PT1FD	Protótipo 1 usando FotoDiodo
PT2FD	Protótipo 2 usando FotoDiodo
PT1LDR	Protótipo 1 usando LDR
PT2LDR	Protótipo 2 usando LDR
r	Correlação linear de Pearson
R	Resistência, medida em ohm.
RF	Radiofrequência.
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa. Mesmo que PAR.
RLDR	Resistência do LDR, medida em ohm.
RR	Requisição/Resposta
RSSI	<i>Receive Signal Strength Indicator</i> , medida da potência de sinal recebido por RF.
RSSF	Rede de Sensor Sem Fio
S	Área aparente da superfície
SSL	<i>Secure Socket Layer</i>
TAL	Tensão de Alimentação da Lâmpada, medida em volts.
$T_{Digital}$	Tensão digitalizada do circuito
V	Volts, unidade de medida de tensão.
V_{cc}	Tensão de alimentação do circuito
V_p	Barreira ou diferença de potencial, medida em volts.
V_{saida}	Tensão de saída, medida em volts.
W	Watt, unidade de medida de potência.

INTRODUÇÃO

A utilização de pastagens como recurso forrageiro para alimentação de ruminantes vem crescendo em importância na pecuária nacional e internacional por proporcionar um alimento de boa qualidade a baixos custos, tendo vantagens sobre produções baseadas na utilização de resíduos industriais, grãos e suplementos volumosos como fonte de alimento.

O manejo do pastejo de plantas forrageiras de clima tropical foi, desde a década de 50, fundamentado na filosofia americana de manejo de pastagem. Nela, se buscava o equilíbrio entre maximizar a produção de matéria seca e minimizar as perdas de valor nutritivo da forragem.

Apesar dos resultados serem bastante praticáveis em nível de campo, este modelo passou a ser questionado em função das grandes variações obtidas. Os problemas mais comuns observados eram: variações na quantidade de massa disponível por pastejo; acúmulo de componentes do pasto que prejudicam o consumo animal, como colmos e material morto; altos níveis de perdas de forragem ao final das estações de pastejo; alta dependência de fertilizantes e alta frequência de degradação das pastagens, entre outros problemas [2].

Devido ao desempenho das pastagens ser muito variável e inconsistente, o grau de insatisfação por parte de produtores e técnicos do setor tem aumentado.

Em busca de adequações no manejo do pastejo, a partir do final da década de 90, foram iniciadas pesquisas no Brasil, fundamentando o controle das pastagens na filosofia inglesa, a qual baseia-se na resposta da planta ao ambiente em que esta está inserida. Desde então, vários esforços foram realizados no sentido de busca de um parâmetro que ao mesmo tempo fosse possível ser fixado e aplicável a campo. Até que iniciaram-se as pesquisas baseando a colheita da forragem em parâmetros de resposta do dossel à luz solar [2].

Para tornar a atividade realmente competitiva, é importante utilizar a pastagem de forma adequada. Segundo Carnevalli [9], os itens de interesse para monitoramento da pastagem são: temperatura, precipitação, balanço hídrico e interceptação luminosa. Neste

sentido, é de fundamental importância estudos sobre a interceptação luminosa dessas plantas forrageiras, que serão tratados neste trabalho.

O manejo de pastagens baseado em interceptação luminosa é realizado em países de clima temperado com elevado grau de sucesso. Em 2001, iniciaram-se trabalhos adotando esta metodologia para plantas de clima tropical, também obtendo níveis elevados de aproveitamento da pastagem. Algumas plantas forrageiras como mombaça, tanzânia, capim-marandu, capim-xaraés e cameron já apresentam respostas bastante sólidas e foram objetos de estudos recentes [9, 33, 2].

Pode-se, com essa técnica, aumentar em 20% a quantidade de folhas verdes efetivamente colhidas pelos animais, melhorando a eficiência da forragem produzida. Basicamente, este considerável aumento ocorre em função da mudança na partição de nutrientes dentro da planta. Após um pastejo, a planta inicia seu processo de rebrotação. Quanto maior a quantidade de folhas verdes no resíduo do pasto, na saída do animal, mais rápido o pasto estará pronto para ser reutilizado [9].

As plantas iniciam seu processo de rebrotação acumulando mais massa a cada dia. Quanto maior for a disponibilidade dos fatores de crescimento, maior será a quantidade de massa acumulada por dia. Entretanto, em um determinado ponto durante o crescimento, a partir da taxa de 95% de interceptação luminosa, as plantas começam a competir entre si por luz. É nesse momento que falta luz para as folhas mais próximas do solo, na base da planta e estas começam a secar.

Como uma forma de defesa, as plantas alongam os colmos rapidamente para melhorar a captação da luminosidade e, assim, diminuir a competição por luz. Desta forma, o pastejo deve ser realizado no ponto anterior às desordens descritas. Monitorando o momento ideal para a entrada de animais no pasto, consegue-se exercer grande controle sobre o resíduo e eficiência de uso da pastagem, aumentando a eficiência do manejo do pastejo [2].

Para aprimorar as condições de manejo, aumento de qualidade e produtividade das plantas, são adotadas estratégias de monitoramento e controle em aplicações agrícolas.

Atualmente, a técnica de monitoramento existente fornece uma aproximação que possibilita estabelecer algumas estratégias para o manejo do gado. Entretanto, com a utilização de tecnologias novas e acessíveis como, por exemplo, dispositivos eletrônicos de maior precisão e de menor custo, o processo pode ser melhorado e ser difundido entre os produtores rurais.

1.1 Motivação para o trabalho

A necessidade de intensificar o uso de pastagens direciona, obrigatoriamente, os pesquisadores a dar nova ênfase e enfoque aos estudos com plantas forrageiras tropicais, assumindo um caráter sistêmico e multidisciplinar característico desse tipo de atividade.

Neste contexto, esta pesquisa busca uma solução, utilizando uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) para o monitoramento da interceptação luminosa (IL) em pastagens, que diminua os custos atualmente necessários para realizá-lo.

Foram encontrados alguns desafios que motivaram o estudo das RSSF aplicadas à Agricultura de Precisão (AP). Este é um novo paradigma de cultivo, cujo conceito está relacionado com as variações temporais e espaciais da área de plantio e tem como meta a aplicação de insumos de acordo com as necessidades e características do piquete.

Os principais desafios são: custos de implantação pouco atraentes, busca de soluções para baixar o consumo de energia do nó sensor, aumentando seu tempo de funcionamento, comunicação confiável entre os nós, entre outros pertinentes às características intrínsecas de uma RSSF.

O custo dos medidores de luminosidade utilizados atualmente também é um desafio, aproximadamente R\$50.000,00/unidade do aparelho LI-COR LI-1776 utilizado atualmente pela Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA). Seu valor elevado se deve ao fato de ser um produto importado.

Este equipamento de custo elevado e seu mecanismo manual de manuseio incentiva o uso de tecnologias alternativas, que resolva o problema de maneira mais fácil e que tenha um baixo custo. O equipamento LAI-2200C, sucessor do LI-1776, também tem o custo elevado de R\$30.000,00/unidade.

Dessa forma, para o acesso de pequenos produtores a esta tecnologia, que poderia facilitar substancialmente o seu trabalho nas pastagens, é necessário um equipamento com custo mais acessível.

1.2 Objetivos

Tem-se como objetivo principal validar e integrar os projetos já realizados para a composição de um sistema de baixo custo, que automatize o monitoramento da interceptação luminosa em pastagens. Para tanto, foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- a análise, sintetização e crítica de propostas de medidores de luminosidade de baixo custo;
- o estudo e apresentação de uma proposta de rede de sensores sem fio de baixo custo para o monitoramento de pastagens; e

- o estudo da forma de apresentação dos dados monitorados pela rede de sensores proposta.

É importante ressaltar que as propostas de medidores de luminosidade de baixo custo analisadas estão restritas aos trabalhos produzidos no contexto do projeto em que esta pesquisa está inserida.

1.3 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho vão desde o estudo dos medidores de luminosidade existente até a construção e implantação de uma RSSF para monitoramento da interceptação luminosa.

Além disso, para a seleção das propostas de RSSF analisadas, considerou-se apenas aquelas cujos cenários de aplicação fossem similares ao desta pesquisa.

Foi gerado um esquema de solução constituído dos elementos apresentados na Figura 1.1, que mostra de maneira simplificada a interligação dos elementos da RSSF. É possível observar que os nós sensores não comunicam-se entre si, mas podem existir vários níveis de repetição de sinal, em que nós sensores com alcance mais baixo repassam as informações para nós sensores com um alcance maior.

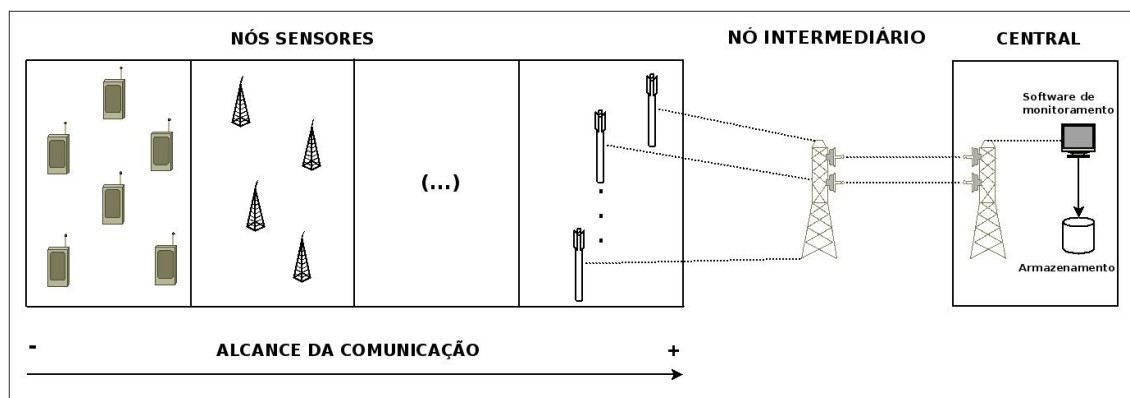


Figura 1.1: Visão geral dos elementos da RSSF.

Uma rede de sensor sem fio para monitoramento da interceptação luminosa em pastagens pode ser composta pelos seguintes itens:

- nó sensor;
- nó intermediário (opcional); e
- estação base (central).

O nó sensor é um equipamento responsável por captar a luminosidade que incide sobre a pastagem em determinado momento. Esse dado é enviado, através de ondas de

rádio, para a estação base. Ele pode ser programado para enviar os dados recebidos em um determinado tempo ou enviar todas as informações no momento em que ele recebe. Deve-se observar que não há o interesse em monitorar a interceptação luminosa constantemente, mas sim em períodos pré-determinados.

O nó intermediário é um equipamento que pode ser utilizado para estender a transmissão de ondas de rádio, aumentando assim o alcance da rede sem fio. Ele é utilizado no caso do nó sensor estar a uma distância maior do que ele é capaz de se comunicar com a estação base, amplificando e regenerando eletricamente os sinais transmitidos pelos nós sensores. De acordo com a topologia da rede, necessária para cobrir a área de interesse no monitoramento, podem existir diversos nós intermediários, devido a sua função limitada de alcance.

A estação base (central) é composta basicamente por uma antena receptora dos dados enviados pelo nós sensores ou pelo(s) repetidor(es) de sinais e um computador. Os dados recebidos pela antena são transmitidos para o computador preparado com um software que os recebe, armazena-os em um banco de dados e gera relatórios a respeito da interceptação luminosa na pastagem em questão. Esses relatórios mostram se o pasto está apto ou não para ser consumido ou mostra a projeção de tempo que falta para isso.

Na Figura 1.1, pode-se ver que existem diferentes capacidades de transmissão de dados. Um nó sensor pode enviar os dados para um nó sensor intermediário, para que este os envie diretamente para a estação base ou para um repetidor de sinais, que por sua vez irá enviá-los para a estação base. Uma outra opção é o nó sensor enviar os dados diretamente para a estação base.

A RSSF proposta neste trabalho utiliza topologia estrela, em que os nós sensores comunicam-se diretamente com a estação base, não havendo nenhum tipo de comunicação entre eles. O nó sensor transmite os dados coletados através de uma mensagem API (Interface de Programação de Aplicativos), via radiofrequência (RF).

1.4 Metodologia empregada

A metodologia empregada neste trabalho foi a análise, integração e validação de protótipos de baixo custo construídos, utilizando os componentes: LDR (PT1LDR e PT2LDR), fototransistor (PT1FT) e fotodiodo (PT1FD e PT2FD). Esses protótipos visam a substituição de medidores de luminosidades de alto custo na medição de interceptação luminosa em pastagens.

Com a finalidade de se avaliar a RSSF experimental nas pastagens, foram planejados diferentes experimentos, incluindo: 1) exatidão dos dados coletados, 2) alcance entre os nós e a estação base, 3) avaliação da quantidade de nós necessários e 4) avaliação

das variações climáticas, considerando a distribuição espacial dos nós na pastagem em diferentes alturas nas plantas.

Os dados obtidos possibilitaram um melhor entendimento do funcionamento da rede. A partir da avaliação realizada em campo, confirmou-se que o sensor de luminosidade proposto é adequado ao uso em pastagens. Esse uso poderia ser estendido para outras áreas da AP, que também se beneficiaram com a redução de custos no monitoramento.

1.5 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada considerando os elementos ilustrados na Figura 1.1. O Capítulo 2 apresenta as aplicações do monitoramento de luminosidade na AP, especificamente no cultivo de cana-de-açúcar e vinhedos, destacando as características da luz e suas medições e também detalhando os medidores de luminosidade de alto custo mais utilizados no monitoramento da IL. O Capítulo 3 discorre sobre uma análise das soluções de sensores de baixo custo, elencando as características necessárias para o monitoramento da interceptação luminosa em pastagens e também uma proposta de sensor de luminosidade de baixo custo adequado. Já o Capítulo 4 documenta as topologias dos elementos das redes considerando os cenários alvo desta dissertação. No Capítulo 5 são tratadas as necessidades relacionadas ao software que processará as informações monitoradas. Finalmente, o Capítulo 6 registra as considerações finais e os trabalhos futuros relacionados com esta dissertação.

APLICAÇÕES DO MONITORAMENTO DE LUMINOSIDADE NA AP

Neste capítulo, serão abordadas as aplicações do monitoramento de luminosidade na agricultura de precisão, que é o foco deste trabalho.

A Agricultura de Precisão (AP) é um novo paradigma de cultivo, cujo conceito está relacionado com as variações temporais e espaciais da área de plantio e tem como meta a aplicação de insumos de acordo com as necessidades e características do talhão (Cruz apud Rosa Filho [27]).

Para o desenvolvimento de algum tipo de cultivo, a agricultura tradicional encara a região do plantio como sendo uniforme, não faz distinções das diferentes características ambientais das regiões da plantação. Na estratégia da AP, um dos métodos aplicados é a utilização de um valor médio das diversas características da região. Assim, são coletados os dados de diversos pontos da região do cultivo, calcula-se o valor médio considerando as características dos diversos pontos e utiliza-se o valor encontrado como referência geral para toda essa região.

Para aprimorar as condições de colheita, aumento de qualidade e produtividade dos produtos na AP, são adotadas estratégias de monitoramento e controle em aplicações agrícolas.

O fenômeno observado caracteriza o objeto, solo ou fruto cujo observador mantém interesse e que está sendo monitorada pela rede de sensores. É possível a observação concorrente de múltiplos fenômenos em uma única rede de sensores, devido às características heterogêneas dos nós sensores, assim as informações coletadas podem ser analisadas e filtradas pela rede de sensores.

As RSSF têm se mostrado uma tecnologia bastante interessante na AP, que tem como finalidade a aplicação localizada de insumos, baseada em informações sobre a variabilidade da área de cultivo. O uso de ferramentas de tecnologia e de sensores é imprescindível para obter e manipular dados do campo sendo possível realizar o monitoramento em tempo real e remoto, além de prover flexibilidade e facilidade de configuração dos elementos da rede. As informações coletadas da RSSF e interpretadas

pelo software monitor tornam-se uma ferramenta de apoio para tomada de decisões.

A utilização da RSSF em ambiente agrícola está sujeita à atenuação do sinal, devido as barreiras da vegetação e tem relação linear com o volume de vegetação. Isto pode ser resolvido pelo aumento da altura das antenas de transmissão dos nós sensores e pela adequada disposição dos nós nas entrelinhas.

2.1 Informações sobre luz

Para o melhor entendimento do monitoramento de luminosidade, é necessário introduzir conceitos sobre luz, luminosidade e sua utilização pelas plantas, que estão presentes nesta seção. Estes conceitos são necessários visto que a intensidade luminosa influencia no crescimento das plantas.

2.1.1 Conceitos básicos sobre luz

São apresentadas algumas características básicas e propriedades da luz, porém não há o intuito de analisar minuciosamente os fenômenos que envolvem a luz, mas sim de mostrar como eles participam do funcionamento dos dispositivos fotossensíveis que serão utilizados.

Basicamente, uma fonte de irradiação emite energia através do espaço por meio de ondas eletromagnéticas. Essa irradiação possui diferentes comprimentos de onda, sendo que o olho humano é sensível somente a uma faixa chamada luz visível, que compreende de 400nm a 700nm. Luz visível é, portanto, a radiação eletromagnética capaz de produzir uma sensação visual [14], conforme ilustrado na Figura 2.1.

A teoria da Física propõe um modelo dual para a luz, onde um raio luminoso é constituído por partículas denominadas fótons, que inicialmente foram observadas por Albert Einstein. Esta natureza dual da luz é reforçada pelo fato de a mesma se propagar no espaço como uma onda, mas manifestar um comportamento corpuscular (partícula) durante os processos de emissão e absorção [17].

As ondas eletromagnéticas se propagam, no vácuo, com a mesma velocidade c , para quaisquer que sejam os comprimentos de onda λ ou as suas frequências f . A velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo é de $c = 3 \cdot 10^5$ Km/s (velocidade da luz). Portanto, tem-se a Equação 2-1.

$$c = \lambda \cdot f \quad (2-1)$$

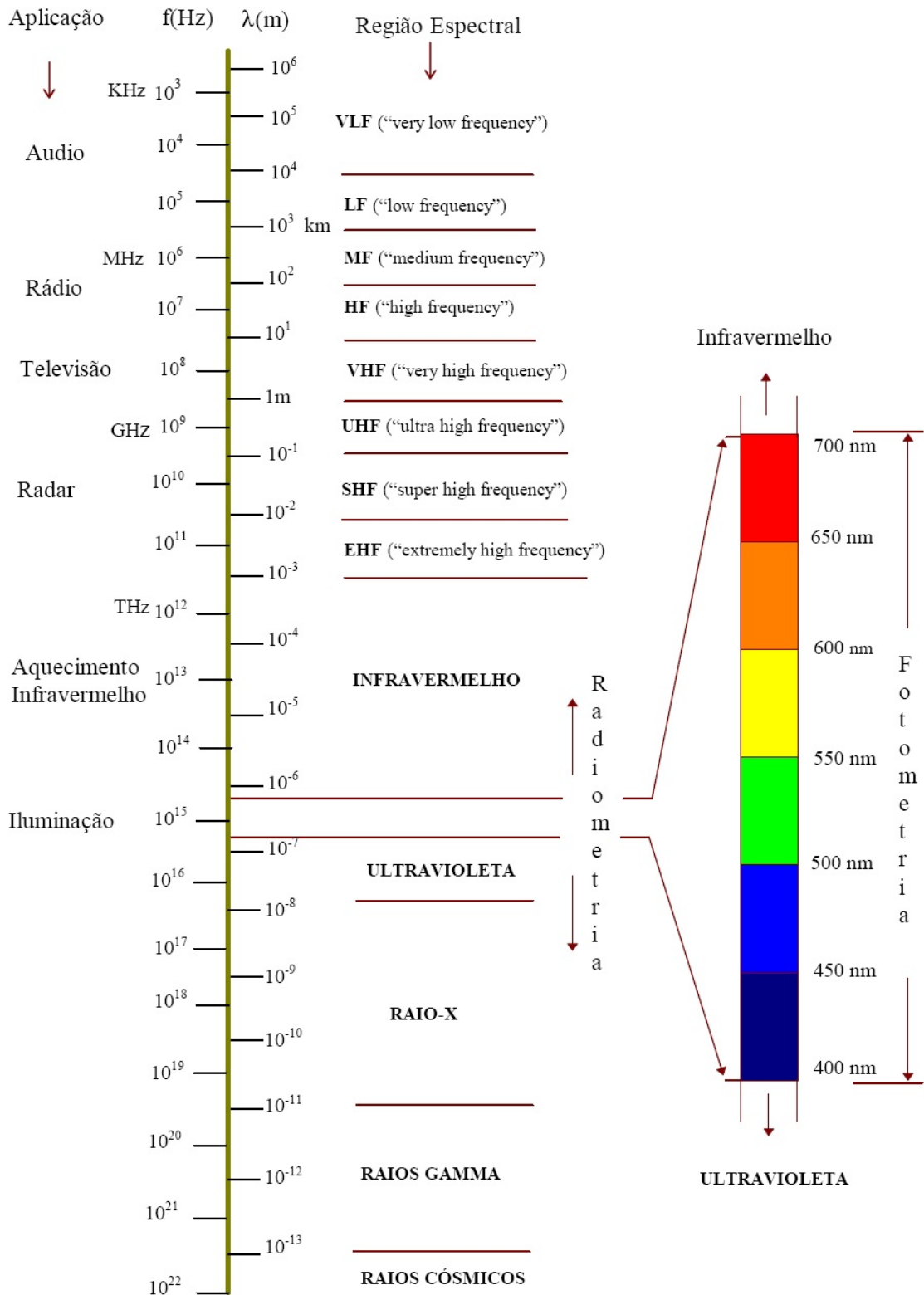


Figura 2.1: Espectro eletromagnético. Fonte: [14].

Portanto, o espectro eletromagnético visível está limitado em um dos extremos pelas radiações infravermelhas, de maior comprimento de onda e menor frequência, e no outro, pelas radiações ultravioletas, de menor comprimento de onda e maior frequência

[22]. A Figura 2.2 ilustra este cenário.

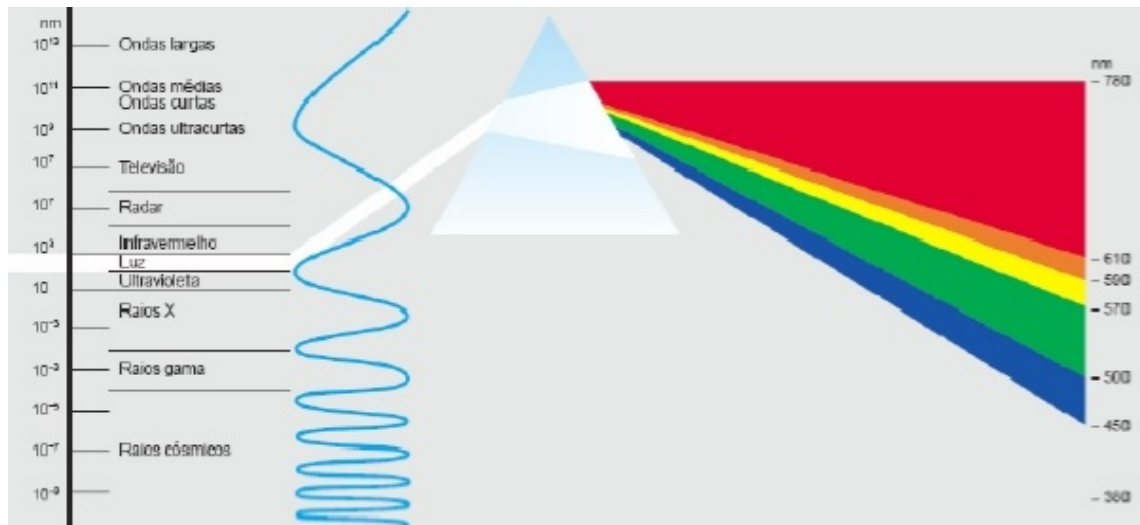


Figura 2.2: Radiações eletromagnéticas. Fonte: [22].

2.1.2 Unidades de medida relacionadas à luz

Cada unidade mencionada a seguir corresponde a uma característica especial da luz e das superfícies iluminadas. Tais fenômenos são tratados por uma parte da física denominada fotometria.

- Intensidade luminosa (I): é a energia radiante emitida por uma fonte de luz (superfície) em um ângulo sólido (ω) em torno de uma direção dada. A unidade no SI (Sistema Internacional) é candela (cd) [22, 13].
- Fluxo luminoso (Φ): é a quantidade de energia produzida por uma fonte luminosa. Pode-se equiparar o fluxo a uma “pressão” exercida em todas as direções ao redor de um foco luminoso. A unidade no SI é denominada lúmen (lm) [13].
- Iluminamento (E): é o fluxo luminoso incidente por unidade de área iluminada. Pode-se também o definir como a densidade superficial de fluxo luminoso recebido. A unidade no SI é o lux (lx), que é o iluminamento de uma superfície plana de área igual a 1m^2 , que recebe, na direção perpendicular, um fluxo luminoso igual a 1 lúmen, uniformemente distribuído. Dada a equação do iluminamento, apresentada na Tabela 2.1, tem-se a incógnita d , que representa a distância da fonte luminosa à superfície iluminada [22].
- Luminância (L): é a intensidade de luz emitida por uma superfície. A unidade no SI é cd/m^2 , conhecida também por *nit*, que é a luminância em uma direção determinada, de uma fonte com área emissiva igual 1m^2 e cuja intensidade luminosa, na mesma direção, é igual a 1 candela [22].
- S : é a área aparente da superfície em que serão medidos o fluxo luminoso, o iluminamento e a luminância.

Tabela 2.1: *Relações entre as unidades métricas*

Grandeza	Relação	Unidade	Símbolo
Intensidade luminosa	$I = \phi/\omega$	Candela	cd
Fluxo luminoso	$\phi = I \cdot S$	Lúmen	lm
Iluminamento	$E = \phi/S = I/d^2$	Lux	lx
Luminância	$L = I/S$	Candela/m ²	cd/m ²

A Tabela 2.1 mostra a relação entre as unidades métricas relacionadas à luz. Dentre as grandezas físicas explicitadas, a que será utilizada é o iluminamento, devido ao fato de o aparelho Luxímetro (avaliado neste trabalho) ser utilizado para mensurar tal grandeza.

RFA

A Radiação Fotossintenticamente Ativa (RFA) ou *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) é definida como a radiação na faixa de 400-700 nanômetros. Ela representa a parte do espectro que as plantas utilizam para a fotossíntese. Sob a dossel da planta, os níveis de radiação pode variar de pleno sol a quase zero no espaço de alguns centímetros. Assim, a medida de confiança da RFA requer muitas amostras em diferentes locais sob o dossel [12].

IAF

O Índice de Área Foliar (IAF) ou *Leaf Area Index* (LAI) é definido como a área de folhas por unidade de área da superfície do solo. É uma medida valiosa para ajudar a avaliar a densidade do dossel e biomassa. [12].

2.1.3 Como as plantas utilizam a luz

A produção bruta de forragem é primeiramente determinada pelo total de luz interceptada pelo dossel. A quantidade e a qualidade da RFA que atinge as plantas determinam o nível de fotossíntese, que é essencial para o processo de crescimento vegetal.

Na maior parte dos casos, a produção de forragem diminui à medida que a intensidade da luz é reduzida. Em geral, existe uma relação negativa entre o aumento da densidade arbórea (ou o sombreamento) e a produção de forragem [5].

Nas gramíneas forrageiras de estação quente, a relação entre a fotossíntese e a radiação é particularmente importante já que a maioria das espécies apresenta baixa adaptação a ambientes com baixa luminosidade [5].

Quando o crescimento vegetal não é limitado por falta de água, temperatura e/ou nutrientes, a produção de biomassa é limitada pela RFA interceptada pela cultura e pela

eficiência de conversão desta energia em carboidratos, através da fotossíntese. Pela lei de Beer, o nível de radiação solar ao nível do solo é uma variável relacionada ao IAF.

A luz difusa, que emana de todo o céu e não apenas de um único ponto de origem (sol) e por esta característica multidirecional, tem maior penetração no dossel arbóreo do que a luz direta, podendo ser melhor utilizada pelas plantas.

Healey et al. apud Barro [5] realizaram experimentos e comprovaram que a presença de maior proporção de luz difusa incrementou tanto o rendimento de forragem quanto a eficiência de utilização da radiação das espécies avaliadas.

A taxa fotossintética, ou seja, a quantidade de CO₂ fixado por unidade de área foliar em função do tempo, depende da disponibilidade de radiação solar. Peri et al. apud Barro [5] descreveram as taxas fotossintéticas como uma função da irradiância de fótons, por meio de uma hipérbole não-retangular. Via de regra, plantas que crescem em ambiente sombreado são incapazes de realizar altas taxas de fotossíntese, mas são eficientes em baixas disponibilidades de radiação. Plantas que crescem sob alta radiação, em seus ambientes naturais, têm alta capacidade para realizar fotossíntese e saturam somente em altas disponibilidades de radiação; entretanto, mostram taxas de fotossíntese menores que as plantas de sombra em baixos níveis de radiação.

A eficiência de interceptação ϵ_{ir} corresponde à capacidade que uma população de plantas tem de interceptar a radiação solar que incide sobre ela. O valor de ϵ_{ir} depende da quantidade de radiação incidente, da distribuição da área foliar no tempo (durante o ciclo) e no espaço, das propriedades óticas do dossel e do ângulo das folhas em relação à linha horizontal.

A eficiência de uso da radiação (EUR) é o incremento em peso seco da parte aérea por unidade de RFA interceptada. Os dados a respeito da EUR das pastagens são limitados na literatura. Entretanto, em geral, ocorrem incrementos da EUR sob baixos níveis de luminosidade, comparado com a condição de pleno sol. A estrutura do dossel é uma característica que contribui para as diferenças em termos de EUR sob diferentes níveis de luminosidade.

As diferenças na produção de biomassa de diferentes cultivos podem ser explicadas por modificações morfológicas, fisiológicas e estruturais, nas plantas submetidas à restrição luminosa. Entretanto, uma relação funcional entre a quantidade de RFA interceptada pelo dossel e a produção de matéria seca tem sido utilizada para caracterizar o crescimento das plantas em diferentes ambientes.

Deve-se observar que a quantidade de folhas (área foliar), que tem grande efeito sobre a IL, não é exclusiva para determinar o potencial fotossintético do dossel forrageiro. O arranjo espacial da área foliar dentro do dossel também é importante, mas não é o foco deste trabalho. Mais informações sobre o assunto podem ser encontradas em [9].

O capim inicia seu processo de rebrotação acumulando mais massa foliar a

cada dia. Quanto maior for a disponibilidade dos fatores de crescimento, maior será a quantidade de massa acumulada por dia. Contudo, em um determinado ponto durante o crescimento, as plantas começam a competir entre si por luz. No momento em que falta luz para as folhas mais próximas do solo (base da planta) estas começam a envelhecer os tecidos (senescer). Como uma forma de defesa, as plantas alongam os colmos rapidamente para melhorar o ambiente luminoso e, assim, diminuir a competição por luz entre as plantas. Assim, o pastejo deve ser realizado no ponto anterior às desordens descritas.

Para se ter um aproveitamento maior das plantas é necessário monitorar o momento de entrada do gado no pasto e não o momento da saída, como pode ser visto na Figura 2.3.

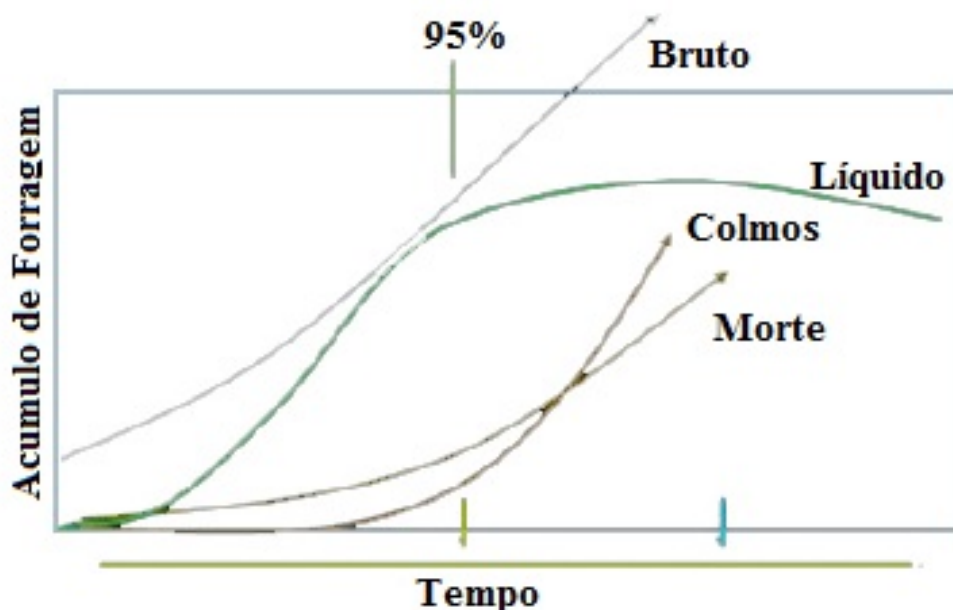


Figura 2.3: Crescimento do dossel. Fonte: [9]

Segundo Carnevalli [9], o ciclo de crescimento representado na Figura 2.3 pode ser dividido em três fases, sendo:

- Primeira fase: a curva característica da taxa de acúmulo de líquido na forragem aproxima-se de uma exponencial, quando a planta possui todas as condições para seu crescimento.
- Segunda fase: a planta apresenta taxas de acúmulo de líquido constantes, principalmente quando o pasto se aproxima da completa interceptação da luz solar incidente. É nesse momento que se deve colocar o animal no pasto, exatamente quando a taxa de interceptação de luz incidente nas folhagens for de 95% do seu total.
- Terceira fase: inicia-se uma queda das taxas de acúmulo de líquido, causada pela redução na taxa de crescimento e pelo aumento na senescência das folhas, ou seja, as folhas inferiores começam a secar, devido ao sombreamento. Este é o momento

menos favorável para o pastejo, pois prejudica tanto a estrutura do pasto quanto a própria qualidade do alimento para o animal.

2.2 Medidores de luminosidade de alto custo

O manejo de pastagens usando a IL é realizado em países de clima temperado desde a década de 50 com elevado grau de sucesso. Em 2001 iniciaram-se trabalhos adotando esta metodologia para plantas de clima tropical, também obtendo nível elevado de respostas. Pode-se com essa técnica aumentar em 20% a quantidade de folhas verdes efetivamente colhidas pelos animais, aumentando a eficiência da forragem produzida.

Basicamente, esse considerável aumento ocorre em função da mudança de partição de nutrientes dentro da planta. Após um pastejo, a planta inicia seu processo de rebrotação. Um fato importante é que quanto maior for a quantidade de folhas verdes no resíduo do pasto (quando o animal é retirado), mais rápido o pasto estará pronto para ser utilizado novamente.

Para a obtenção dos aparelhos necessários para realizar medições de IL há a necessidade de um alto investimento, visto que, além do alto custo do aparelho, soma-se ao preço final as taxas de importação, pois os aparelhos não são fabricados no Brasil.

Outro ponto relevante é o fato de que as medições são totalmente manuais, havendo a necessidade de pessoas treinadas deslocarem-se até o campo para realizar as medições, aumentando as chances de erro por fadiga e desgaste por trabalho repetitivo. Entretanto, com a utilização de tecnologias novas e acessíveis, como as RSSF, acredita-se que esse processo pode ser melhorado tornando-se mais eficiente e, até mesmo, mais barato.

No mercado, existem vários medidores de luminosidade de alto custo. O utilizado pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias) é o LI-COR LI-1776. Ele foi citado em [5] e também o equipamento AccuPAR. O equipamento LI-1776 é antigo e sua fabricação foi descontinuada pela empresa LI-COR. Dessa forma, serão descritos a seguir os equipamentos LI-COR LI-1776 e seus sucessores LAI-2200C e LAI-2200TC e também o equipamento AccuPAR.

2.2.1 LI-COR LI-1776

O equipamento LI-COR LI-1776 Solar Monitor é um medidor/integrador de luminosidade controlado por um microprocessador. Um integrador é um instrumento que totaliza o sinal de entrada por um período de tempo, ou seja, determina a área acumulada sob a curva de sinal de entrada *versus* tempo [18].



Figura 2.4: LI-COR LI-1776. Fonte: [21]

O período padrão de integração do LI-1776 é 24 horas, mas ele pode ser configurado como o usuário desejar. Seu uso é recomendado somente quando há 5% de sol total [18].

Ele possui uma bateria interna de 9V e uma fonte externa (AC ou DC) para ser usada para monitoramentos de longo prazo. A bateria interna provê uma energia por pouco tempo para ser realizado backup, no caso da fonte externa falhar [18].

Por ser um equipamento antigo que começou a ser fabricado em 1980, a produção do LI-COR LI-1776 foi descontinuada em 1988. Equipamentos como o LI-COR LAI-2200C e LAI-2200TC, com características e funcionalidades extras, o substituíram.

2.2.2 LI-COR LAI-2200C

Segundo [19], o analisador de cobertura (dossel) de plantas LAI- 2200C é um equipamento com GPS integrado e opção de mapeamento.



Figura 2.5: LAI-2200C.

Baseado na tecnologia comprovada de seus antecessores, LAI-2000 e LAI-2200, apresenta uma interface mais moderna, com várias opções de configurações e características superiores de análise dos dados. Além disso, o LAI-2200C pode ser utilizado em qualquer condição de clima inclusive em dias de sol intenso, não havendo a necessidade de aguardar um dia de sol mais ameno ou nublado. Possui um *design* ergonômico, mais leve e sensor óptico autônomo (funciona independente da unidade de controle), ideal para o trabalho em campo. Calcula de maneira não destrutiva o índice de área foliar (LAI/IAF) diretamente; e outros atributos de estrutura de uma variedade de tipos de cobertura vegetal.

As medições de radiação são efetuadas por um sensor óptico LAI-2250, tipo “olho de peixe” com um campo de visão azimutal de 360°. A interceptação da luz pela cobertura é medida acima e abaixo do dossel, em cinco diferentes ângulos azimutais com abertura de 148° cada.

O IAF é calculado utilizando um modelo de transferência de radiação em coberturas vegetais. Para efetuar as medições tem-se a opção de utilizar em coleta somente o sensor óptico LAI-2250 (autônomo) desacoplado da unidade de controle, pois ele também possui memória (1MB Flash) capaz de armazenar até 1.5 milhões de leituras, além de 2 botões de comando “Liga” e “acima/abaixo”, este para selecionar se a leitura será feita acima ou abaixo do dossel.

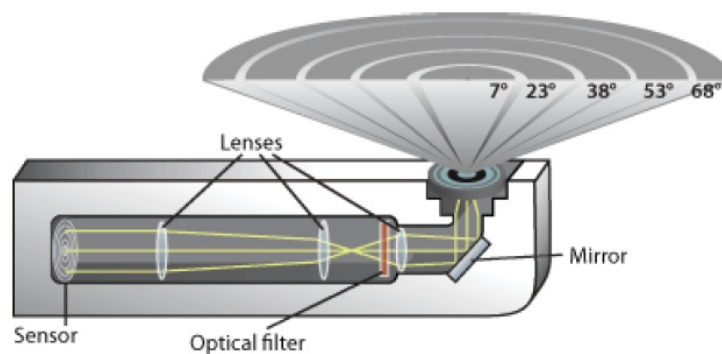


Figura 2.6: Sensor óptico LAI-2250.

Os dados serão processados pela unidade de controle que disponibilizará os resultados, divididos em leituras “acima do dossel” e “abaixo do dossel”, para verificação ao vivo no campo ou posteriormente. O sistema de leituras múltiplas e campo de visão “olho de peixe” asseguram que os cálculos do IAF sejam baseados em amostras representativas da folhagem do dossel. Os cálculos incluem índice de área foliar para dosséis grandes ou densidade de folhagem para dosséis isolados, ângulo médio de inclinação da folhagem e fração do céu visível abaixo do dossel.

A estrutura da cobertura – a quantidade de folhagem e sua distribuição – é fundamental para a penetração da radiação, para o transporte turbulento da temperatura

da folha, para a produtividade, para a evapotranspiração, para a interceptação das chuvas e para a temperatura do solo.

A medição direta da estrutura de dosséis é muito difícil para coberturas vegetais pequenas e praticamente impossíveis em coberturas florestais. Entretanto, os modelos de transferência de radiação mostram que medições relativamente simples de penetração da radiação podem fornecer estimativas precisas da estrutura da cobertura.

O LAI-2200C é um instrumento de uso fácil que se tornou uma ferramenta imprescindível, com uma gama de aplicações, incluindo produtividade de dosséis, vigor de florestas, modelagem de deposição da poluição do ar, estudos de desfolhamento por insetos e sensoriamento remoto.

O sensor óptico LAI-2250 utiliza uma lente “olho de peixe” com um campo de visão hemisférico (ângulo de corte do zênite = 74°) para projetar a radiação no detector. O detector caracteriza-se por ter 5 detectores de silício dispostos em anéis concêntricos, assim, quando a radiação é projetada no detector, cada detector vê por um ângulo diferente.

O LAI-2200C calcula a interceptação da luz azul na faixa de 320–490 nm. O filtro faz com que a folhagem pareça “negra” contra o céu mais claro. A saída de cada anel detector é proporcional à fração do anel iluminado pelo céu (ou radiação residual dispersa). Durante a medição, a saída de cada um dos 5 detectores é medida simultaneamente tanto para leitura abaixo como acima da cobertura.

A radiação interceptada pela cobertura é calculada dividindo-se a saída do detector acima da cobertura pela saída do detector abaixo da cobertura.

O sensor óptico vem acompanhado de 4 tampas opacas recortadas, permitindo leituras de 45° , 90° , 180° e 270° . A unidade de controle LAI-2270 possui um microcomputador interno, com grande capacidade de memória (128 MB FAT 16). Essa unidade tem uma saída USB e duas saídas para conexão de 2 sensores ópticos LAI-2250, porém o equipamento é fornecido somente com 1 sensor óptico, sendo o segundo sensor opcional.

As leituras de um local específico podem ser registradas na memória da unidade de controle ou na memória do sensor óptico. O IAF e outros parâmetros são calculados pela unidade de controle através de um software incorporado chamado FV2200 e os dados (cálculos e leituras) podem ser armazenados na memória.

Um arquivo pode ter qualquer número de leituras acima e abaixo da cobertura, sendo, que todos contribuem para o valor de IAF para aquele arquivo.

Os arquivos podem ser reclamados e vistos no visor ou, podem ser descarregados em um PC ou impressora através da interface RS232 incorporada. Um programa de comunicação acompanha o equipamento para permitir esta descarga.

O mostrador é do tipo LCD com 4 linhas de 16 caracteres cada. A unidade de controle possui ainda dois conectores BNC, para a ligação de sensores de radiação. É

alimentada por 4 baterias tipo “AA”, mais 2 pilhas no sensor óptico (totalizando 6 pilhas), permitindo operação contínua de até 140 horas com o sensor óptico conectado.

A interface RS232 pode ser utilizada também para conectar uma segunda unidade de controle LAI-2270, permitindo a descarga dos dados de medição. O teclado de contato é do tipo alfanumérico permitindo a execução de toda a programação e coleta de dados.

Dimensões do LAI-2250 de $61 \times 2.9 \times 2.9$ cm (C \times L \times P) e peso de 0.85 kg. Dimensões do LAI-2270 de $21 \times 11.4 \times 6.9$ cm (C \times L \times P) e peso de 0.45 kg. O LAI-2200C é fornecido completo, pronto para operação, com 1 sensor óptico LAI-2250, 1 unidade de controle LAI-2270, software FV2200, estojo de proteção e transporte para o LAI-2270, cabo de comunicação RS232C, cabo USB, cabo para conexão de uma segunda unidade de controle LAI-2270 e manual de operação em inglês.

Existem duas modalidades de compra do equipamento: importação direta e compra em moeda nacional. Na importação direta, ao valor do equipamento devem ser acrescentados os custos de embalagem, frete interno até porto/aeroporto de embarque no exterior, frete internacional e despesas de desembaraço no Brasil. Na compra em moeda nacional, todos os custos já estão incorporados no valor do equipamento, que será entregue no local solicitado.

Na importação direta, o equipamento LAI-220C tem preço unitário de US\$9.995,00 e acrescidos de US\$700,00 e mais 20% de valores supracitados, o valor total é de US\$12.834,00. Na cotação de 17/01/2014, o dólar comercial foi de R\$2,3582. Dessa forma, o equipamento tem preço unitário de R\$30.265,14.

Na compra em moeda nacional, o valor unitário orçado foi de R\$97.054,67.

Deve-se observar que os produtores rurais podem adquirir o equipamento por importação direta, para baratear os custos. Entretanto, os órgãos que necessitam de pregão/licitação devem adquirir através da compra em moeda nacional, o que torna o equipamento inacessível para muitas pesquisas.

2.2.3 LI-COR LAI-2200TC

Segundo [19], o analisador de cobertura (dossel) de plantas LAI- 2200TC é similar ao equipamento LAI-2200C, como pode ser visto na Figura 2.7.



Figura 2.7: LAI-2200TC.

O LAI-2200TC é fornecido completo, pronto para operação, com 2 sensores ópticos LAI-2250, 1 unidade de controle LAI-2270, programa de comunicação 1000-90, software FV2200, estojo de proteção e transporte para o LAI-2270, cabo de comunicação RS232C, cabo USB, cabo para conexão de uma segunda unidade de controle LAI-2270 e manual de operação em inglês (NÃO inclui tripé de apoio).

Ele é mais caro do que o LAI-2200C por possuir 2 sensores, que é o componente eletrônico mais caro presente no equipamento.

Na importação direta, o equipamento LAI-220C tem preço unitário de US\$15.525,00 e acrescidos de US\$700,00 e mais 20% de valores supracitados, o valor total é de US\$19.470,00. Na cotação de 17/01/2014, o dólar comercial foi de R\$2,3582. Dessa forma, o equipamento tem preço unitário de R\$45.914,15.

Na compra em moeda nacional, o valor unitário orçado foi de R\$147.903,36.

2.2.4 AccuPAR

O ceptômetro Decagon AccuPAR modelo LP-80 é um sensor de RFA leve e portátil. Permite medir a interceptação de RFA pelo dossel e calcula o IAF em qualquer lugar na planta ou no dossel das florestas. Os dados de RFA podem ser associados com outros dados climáticos para estimar a produção de biomassa sem destruir a planta.

A informação de RFA também é importante na determinação de outros processos dos dosséis como: interceptação da radiação, conversão de energia, dinâmica, troca de gases, interceptação de precipitação e evapotranspiração.

O AccuPAR também utiliza medidas de radiações e outros parâmetros para calcular de precisamente o IAF em tempo real, no campo e de maneira não-destrutiva.

Ele pode inverter as leituras realizadas para exibir o IAF do dossel da planta [12]. O AccuPAR está ilustrado na Figura 2.8.



Figura 2.8: AccuPAR LP-80.

O AccuPAR pesa em torno de 0,5 kg. O controle anexado, alimentado por 4 baterias AAA, pode ser utilizado para fazer medições manualmente ou de maneira

automática por curtos períodos de tempo. Ele armazena 1MB de dados para posterior *download* e análise.

O modelo AccuPAR LP-80 é usado para medir a interceptação luminosa e é um medidor com microprocessador e sonda integrados. A sonda contém 80 sensores independentes, com espaçamento de 1cm. Os fotossensores medem a RFA na faixa de frequências de 400-700nm. O AccuPAR exibe a RFA em unidades de micromols por metro quadrado por segundo ($\mu \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). O instrumento é capaz de medição manual ou automática [12].

O equipamento AccuPAR LP-80 usa diversas variáveis para calcular o IAF e apresenta valores para essas variáveis na tela e como as medidas são tomadas. [12].

O AccuPAR pode ser operado em ambientes com temperaturas de 0 a 50° C e em umidades relativas de até 100%. O aparelho é fornecido com um cabo de interface RS-232 para permitir a transferência de dados para um computador. A alimentação do equipamento é feita por 4 pilhas alcalinas AAA [12].

Um sensor RFA externo é fornecido com o AccuPAR para permitir que sejam realizadas medições RFA simultâneas acima e abaixo do dossel. Isto é útil para fazer várias medições RFA sob o dossel em condições de luz variáveis sem ter que manter em movimento o instrumento dentro e fora do dossel para atualizar a referência RFA acima do dossel. O sensor externo é também o padrão de RFA a que o apontador está calibrado, ou seja, permite a calibração do equipamento [12].

2.3 Monitoramento da IL em pastagens

A utilização de pastagens para alimentação de gado é uma prática utilizada há muito tempo por criadores, que na maioria das vezes utilizam o pasto de forma errada, visto que fazem o rodízio de pasto após deixar o gado por um número fixo de dias. Estudos realizados determinaram que essa forma não respeita a fisiologia da planta.

O manejo do pastejo é um fator determinante da eficiência do processo de colheita e condicionante do valor nutritivo da forragem produzida [9].

A combinação entre resíduos de plantas anteriores e brotação permita a manutenção do pasto, de forma que diferenças em densidade populacional sejam reflexo apenas do grau de competição intra-específica gerada pela estratégia de manejo do pastejo empregada. A época do ano possui um efeito muito pronunciado sobre todos os processos que ocorrem nas plantas, basicamente resultado da variação na disponibilidade de fatores de crescimento na área. Esse efeito é, muitas vezes, maior que o efeito das práticas de manejo do pastejo empregadas quando estas são dimensionadas para respeitar os limites de tolerância das plantas ao pastejo e assegurar condições para que seus mecanismos de

resposta possam ser plenamente utilizados de forma a permitir sua adaptação ao ambiente de pastejo criado.

Barro [5] concluiu que o cultivo de pastagens sob o sombreamento moderado causou incremento significativo na IL pelo dossel. Porém, os níveis de IL sob 80% de sombra não foram, em geral, alterados em comparação com o pleno sol. Esta resposta, de maiores valores de IL sob 50% de sombra, possivelmente está relacionada aos resultados obtidos em termos de incremento do IAF sob este nível de restrição luminosa.

Nas situações em que o patamar potencial de IAF estabelecido pela disponibilidade de luz não pode ser atingido, normalmente como resultado de suprimento inadequado de nutrientes e/ou de o pasto estar se recuperando de um período de manejo inadequado, a densidade das plantas na área é desuniforme.

Segundo experimentos realizados por Carnevalli [9], a altura do dossel forrageiro se mostrou um bom parâmetro para determinação prática do momento de entrada dos animais nos pastos, uma vez que 95% ou 100% de IL ocorreram consistentemente a 90cm ou 115cm de altura, respectivamente, durante todo o período examinado, independentemente do estágio de desenvolvimento das plantas (vegetativo ou reprodutivo).

No trabalho de Carnevalli [9], foi constatada uma alta correlação entre ainterceptação de luz pelo dossel e a altura do pasto (medida do nível do solo até a curvatura natural das folhas no topo do dossel), sendo que a condição de 95% de interceptação de luz esteve consistentemente associada à altura de 90 cm.

Segundo Carnevalli [9], o número de pontos de monitoramento por pastagem é 6, compostas de 5 leituras cada, totalizando 30 pontos de monitoramento por unidade experimental. Já o número de leituras por ponto é quatro a nível do solo e um acima do dossel.

Para se obter os índices de IL, utilizando-se as técnicas atuais, deve-se fazer em média 15 medições para cada 1000 m².

Uma fazenda está organizada de forma que possua todo seu território dividido em pastos. Os pastos são subdivididos em piquetes. A quantidade e o tamanho destes piquetes pode variar.

Como pode se verificar em estudos relacionados à produção leiteira, o pastejo rotacionado em piquetes predomina na grande maioria das pequenas e médias unidades produtoras. Neste modelo de pastejo, a proximidade da área de alimentação, ordenha e demais elementos necessários para a cadeia produtiva é de suma importância. Tipicamente, tais ambientes concentram-se em um raio de até 1000 metros.

Segundo Carnevalli [9], considerando-se gado leiteiro, é desejável que este caminhe diariamente distâncias de no máximo 1.5 km. Desta forma, o ideal é que um piquete esteja no máximo a 500m do local de ordenha.

Observe o caso da unidade de produção leiteira da Escola de Veterinária da

Universidade Federal de Goiás. Conforme apresentado na Figura 2.9, a área mais distante do escritório está a menos de 550 metros. Desta forma, pode-se verificar que a cobertura de grandes distâncias não é tão relevante para este cenário. No entanto, se forem avaliados os sistemas de pastejo extensivo, pode-se deparar com invernadas a 10km do retiro mais próximo, sendo este um caso relativamente comum.

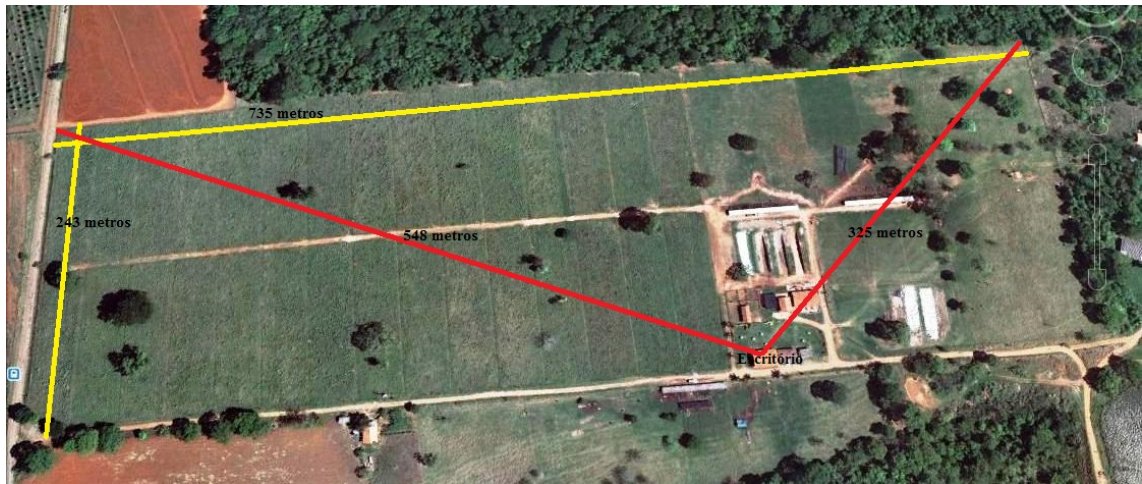


Figura 2.9: Unidade leiteira da UFG.

Como este trabalho contribui para a melhoria de produtividade em pequenas e médias propriedades, o foco está nas unidades de produção leiteira que fazem uso de piquetes. A composição da área de pastejo é bem variada e depende do relevo e disponibilidade de solo em cada propriedade. A simetria em sua composição é desejável, porém um privilégio nem sempre encontrado. As Figuras 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13 demonstram casos reais.

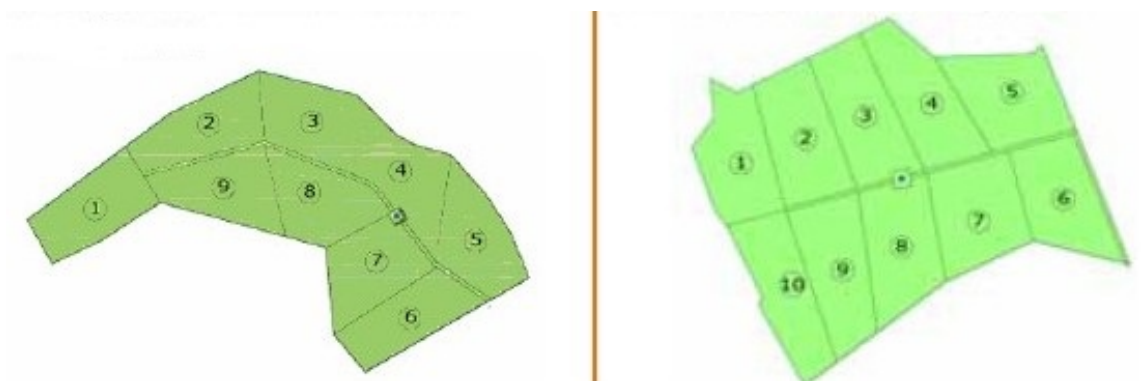


Figura 2.10: Sistema de pastejo rotacionado em área de medidas desuniformes. Fonte: [28]



Figura 2.11: *Visão panorâmica de piquetes, em uso, com medidas desuniformes. Fonte: [4]*

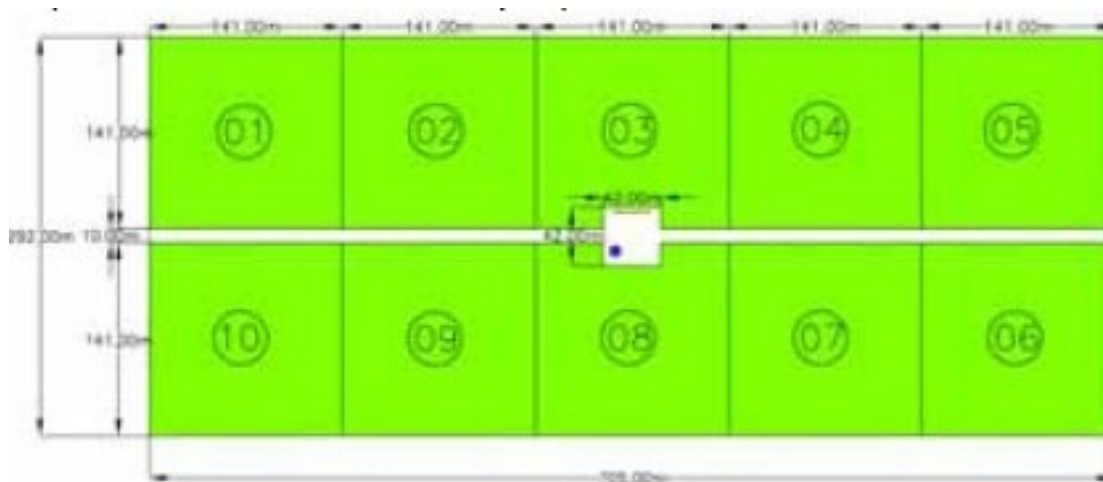


Figura 2.12: *Projeto de piquetes em área uniforme. Fonte: [28]*

Em casos mais raros, pode-se deparar com propriedades que atuam em nível industrial e possuem infraestrutura avançada, conforme ilustra a Figura 2.13. Tais unidades têm grande foco em produtividade e otimização de resultados, sendo este um ambiente perfeito para a aplicação dos ideais apresentados neste trabalho. No entanto, adequações para o ambiente de maior escala devem ser estudadas com mais critério.



Figura 2.13: *Visão panorâmica de piquetes de grande porte com irrigação por pivô central.*

Fonte: http://www.milkpoint.com.br/mypoint/99470/f_pastejo_rotacionado_irrigado_via_pivo_central_5296.aspx

2.4 Outras aplicações do monitoramento da IL na AP

Uma das características das RSSF que motiva a sua aplicação na área agrícola é a possibilidade de coleta de dados com a resolução espaço-temporal adequada, permitindo aplicar eficientemente os conceitos da Agricultura de Precisão (AP).

Alguns experimentos de monitoramento da IL foram realizados na AP. Eles foram realizados com equipamentos de alto custo. Dessa forma, o presente trabalho poderia ser utilizado para a confecção de medidores de luminosidade de baixo custo para estes propósitos também.

2.4.1 Monitoramento da IL no cultivo de cana-de-açúcar

Rosa Filho [27] realizou experimentos que foram aplicados em laboratório, em ambiente aberto e em cultivo agrícola da cana-de-açúcar.

O cenário da aplicação inicial da RSSF foi o Laboratório de Antenas da Faculdade de Tecnologia (FT) - UNICAMP, com dimensões 5 metros \times 8 metros, coberto e sem nenhum equipamento eletrônico ativo dentro da sala.

Após a identificação dos procedimentos de instalação e programação de uma RSSF, foram interpretados e analisados os dados coletados pela rede. Assim, foi possível estabelecer parâmetros iniciais de uma RSSF.

A avaliação da RSSF em Laboratório permitiu definir o tempo de esgotamento de energia das baterias do *mote* (módulo de processamento e comunicação sem fio ou nó) configurado com requisição e resposta a cada 2s e utilizando potência máxima disponível do equipamento. As baterias AA de 3.1V esgotaram-se em 4 dias e 8 horas.

Rosa Filho [27] identificou, através deste experimento, o limite de voltagem para funcionamento do *mote* de 2.1V. Ele concluiu que, em ambiente agrícola, não é recomendado utilizar medições de RR a cada 2s, pois o esgotamento da rede será rápido, tornando-se inviável a aplicação da RSSF.

A utilização da largura de banda do *mote* foi de 250kbps, sendo que a largura máxima da banda utilizada foi 2,4 kbps. Este valor é, aproximadamente, 1% da capacidade total da largura da banda. Deve-se observar que em todos os experimentos em que ocorreram retransmissões, as perdas de pacotes aumentaram bruscamente a utilização da banda.

Em um segundo momento, após procedimentos de instalação, interpretação dos dados e definidas as informações de parâmetros de uma RSSF, Rosa Filho [27] realizou um novo experimento. Ele analisou as métricas da medição em ambiente aberto e foi possível determinar a distância de alcance entre os *motes* ou nós em um campo de futebol com dimensões 120m × 45m.

Após aplicações em laboratório e em ambiente aberto foi instalada e configurada uma RSSF em cultivo real de cana-de-açúcar. Foram encontrados vários problemas, como por exemplo, alcance de apenas 6 metros na camada de comunicação entre os nós.

Os experimentos em ambiente agrícola foram realizados na Fazenda Itaiquara. A plantação cultiva a variedade CB41/76 de cana-de-açúcar em uma área total de aproximadamente 30 hectares de plantação. Foi utilizada para realização dos experimentos uma área de 200 m². As plantas estavam com idade de 12 meses de cultivo, início do período de colheita, dispersas em fileiras com uma média de 16 colmos por m² e plantas da cana-de-açúcar com altura média de 4 metros.

Foram detectados problemas de alcance da rede na plantação, devido às barreiras, ou seja, grande densidade da folhagem e colmos das plantas que aumentam a atenuação do sinal recebido.



Figura 2.14: *Mote IRIS com placa de sensoriamento e altura 0.8m aplicado em plantação de cana-de-açúcar - Fazenda Itaiquara, 2011. Fonte: [27]*

Para o experimento em cultivo de cana-de-açúcar, Rosa Filho [27] avaliou o nível de sinal percebido do *mote* e considerou as métricas de perdas de pacotes, retransmissões de pacotes e utilização da largura de banda.

Os gráficos apresentados por Rosa Filho [27] ilustram que nas condições adversas de uma vegetação densa, como é o caso de um canavial. A distância entre os nós da rede não alcança 7m sem que inicie a retransmissão de pacotes para conseguir a comunicação, gerando aumento significativo de consumo da bateria.

Desta forma, temos um resultado proibitivo, tendo em vista o número de elementos necessários para cobrir grandes extensões de cultivo de cana-de-açúcar, caso seja utilizada uma topologia estrela.

Os estudos e conceitos sobre RSSF possibilitaram criar uma solução com alteração de posicionamento dos *motes*, visto que após os experimentos o principal problema encontrado foi o da cobertura da RSSF.

Por fim, Rosa Filho [27] concluiu que:

- não é recomendada a adoção de topologia em malha com posicionamento 0.8m de altura para sensoriamento em cultivo de cana-de-açúcar. Isto ocorre devido ao

fato de que a distância máxima entre os nós não pode ultrapassar 6 metros, o que obrigaria a uma escalabilidade de nós muito alta. Devido ao número de elementos, seria inviável implantação de uma RSSF para essa aplicação.

- a topologia estrela, aliada com algumas características da topologia em malha, forma uma topologia em árvore. Este arranjo é também conhecido como topologia híbrida e utiliza nós receptores situados a uma altura de 5 até 6 metros, permitindo enlaces entre qualquer nó sensor e o nós receptores, com distâncias de até 13 metros. Os enlaces na camada da estação base e nós receptores de uma RSSF, com distância de até 85 metros, permitem o sensoriamento de uma maior área de cultivo com um número muito menor de elementos da rede.
- programar o *mote* em Modo de Energia de Alta Potência (HP) e abordagem de gerenciamento Requisição/Resposta (RR) com pacotes de saúde transmitidos a cada 2 minutos, que é a configuração padrão na maioria dos equipamentos de rede de sensores, não é recomendável. Isto porque as medições mostraram um esgotamento muito rápido da bateria em relação ao tempo de cultivo da cana-de-açúcar. Por outro lado, este cultivo não exige um monitoramento tão frequente, ou seja, nós sempre ligados monitorando temperatura e umidade do solo da plantação de cana-de-açúcar.

Estas conclusões podem ser estendidas para o monitoramento de interceptação luminosa em pastagens. Por outro lado, o protótipo de medidor de luminosidade proposto neste trabalho, poderia ser utilizado como alternativa ao utilizado para a medição na cana-de-açúcar.

2.4.2 Monitoramento da IL em vinhedos

Benavente [6] realizou um estudo de aspectos relacionados ao uso de uma RSSF como uma tecnologia de apoio para o monitoramento ambiental em vinhedos.

A área de aplicação escolhida foi a viticultura, devido à grande influência das condições ambientais no desenvolvimento fisiológico das videiras, influenciando no rendimento e na qualidade das uvas produzidas, justificando a adoção de um sistema de monitoramento.

Benavente [6] realizou experimentos em um parreiral cultivado sob cobertura plástica, localizado em Bento Gonçalves, RS. Os aspectos da rede estudados compreenderam:

- o alcance de conectividade e qualidade do enlace entre os nós e a estação base;
- o desempenho da rede com os nós posicionados em diferentes alturas;
- a exatidão dos dados coletados, em comparação com um equipamento de maior precisão; e

- a avaliação da variabilidade microclimática dentro do parreiral.

A validação da proposta envolveu a implementação de um protótipo funcional, testado em laboratório. O modelo proposto permitiu estimar a vida dos nós, considerando-se parâmetros como o tipo de bateria, o intervalo de amostragem e o tamanho do pacote de dados enviados pelos nós [6].

Os resultados obtidos por Benavente [6] evidenciaram a existência de variabilidade microclimática tanto em diferentes alturas da videira, como espacialmente, dentro do parreiral. A interferência dos vegetais devido à água que contêm foi avaliada a partir de dois parâmetros: o indicador de intensidade de sinal recebido e de qualidade de enlace, que indicaram maior interferência na altura do dossel das videiras. A correlação entre esses parâmetros levou à constatação que o melhor desempenho e o maior alcance de conectividade ocorrem com os nós posicionados na altura do cacho das videiras se comparados com as medições realizadas no dossel.

A amostragem variável permitiu uma economia no número de pacotes enviados, com menos consumo de energia, o que foi comprovado com o modelo proposto para tal finalidade. Para maiores informações, consulte [6].

Conclui-se que o medidor de luminosidade proposto neste trabalho poderia ser utilizado como alternativa ao construído por [6]. Entretanto, deveria-se fazer uma alteração no nó sensor para que ele pudesse ser posicionado no cacho das videiras.

2.5 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentados alguns conceitos básicos sobre luz e sua utilização nos medidores de luminosidade.

Também foram apresentados alguns medidores de luminosidade de alto custo, sendo eles três modelos de LI-COR e um de AccuPAR.

Finalmente, foi tratado sobre o monitoramento da interceptação luminosa em pastagens, apresentando duas aplicações na agricultura de precisão sendo uma na cana-de-açúcar e outra em vinhedos.

SENSOR MEDIDOR DE LUMINOSIDADE DE BAIXO CUSTO

Neste capítulo, serão apresentados os sensores, sensores fotoelétricos e será mostrada uma comparação entre os dispositivos fotoelétricos. Também será descrito o cenário de testes que valida o aparelho Luxímetro como uma alternativa ao equipamento LI-COR LI-1776. Por fim, serão mostrados os protótipos de medidores de baixo custo avaliados/construídos e apresentada uma proposta de sensor de baixo custo adequado.

3.1 Sensores

Sensores são dispositivos que recebem e respondem a sinais ou estímulos. Podem ser usados para medir grandezas físicas, ou seja, convertem os dados obtidos em sinais elétricos (informações). Os sensores podem ser avaliados sob diversos parâmetros [35, 36], tais como: faixa de operação, precisão, sensibilidade, linearidade e resolução, que serão tratados logo a seguir.

- Faixa de operação: representa todos os níveis de amplitude do sinal de entrada nos quais se supõe que o sensor opere.
- Precisão: é o quanto o desempenho do sistema se aproxima das expectativas. Normalmente, é especificada em porcentagem.
- Sensibilidade: é a relação entre o estímulo de entrada no dispositivo e o sinal de saída por ele produzido. Também pode ser definida como a variação da saída por unidade de variação da entrada.
- Linearidade: grau de aproximação entre a curva de calibração do sensor e uma reta de aproximação.
- Resolução: é o menor incremento do sinal de entrada que é sensível ou que pode ser medido pelo instrumento. Por exemplo, tratando-se de um voltímetro analógico, a resolução é a menor subdivisão da escala.

Deve-se observar que a precisão está relacionada ao dado estar certo ou errado e apresenta o mesmo valor em todas as medições. Já a exatidão está relacionado ao quanto o valor se aproxima do real.

Tais parâmetros podem, na escolha de um sensor, qualificá-lo ou não como sendo adequado para a aplicação. Se tais parâmetros não forem analisados, o sensor pode não corresponder ao esperado.

3.2 Sensores de luminosidade utilizados em medidores

Sensores fotoelétricos são dispositivos que convertem um sinal luminoso (luz ou sombra) em um sinal elétrico ou grandeza elétrica (resistência, corrente, tensão, entre outras), que possa ser processado por um circuito eletrônico. Eles são utilizados em uma infinidade de aplicações, como sistemas de segurança, controle, máquinas industriais, equipamentos médicos, eletrônica embarcada e outras relacionadas.

Nesta seção, serão explorados três dispositivos fotoelétricos bastante conhecidos, sendo eles: LDR, fotodiodo e fototransistor.

3.2.1 LDR

O LDR (*Light Dependent Resistor*) ou fotorresistor é um dispositivo semicondutor cuja resistência elétrica pode ser alterada em função do fluxo luminoso, com comprimento de onda que compreende tanto a luz visível, como as não visíveis (radiações ultravioleta e infravermelha), incidente em sua superfície fotossensível. Na ausência da radiação eletromagnética, tem-se o máximo valor de sua resistência. Conforme ilustrado na Figura 3.1, o LDR é composto por um eletrodo disposto em uma fina camada fotocondutiva sobre uma base de cerâmica com dois terminais condutores [30].

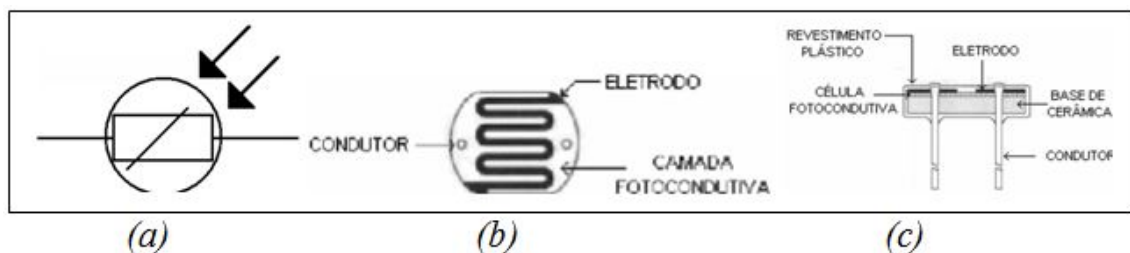


Figura 3.1: (a) Símbolo do LDR; (b) Superfície fotossensível de um LDR; (c) Vista lateral. Fonte: [30].

Os materiais frequentemente utilizados na composição do eletrodo são o CdS (sulfeto de cádmio) e o CdSe (seleneto de cádmio), conforme ilustrado na Figura 3.2. Estes materiais são responsáveis pela atuação do LDR em diferentes intervalos espectrais.

Esta estrutura recebe revestimento plástico ou é acondicionada em invólucros hermeticamente selados para protegê-la contra a umidade.

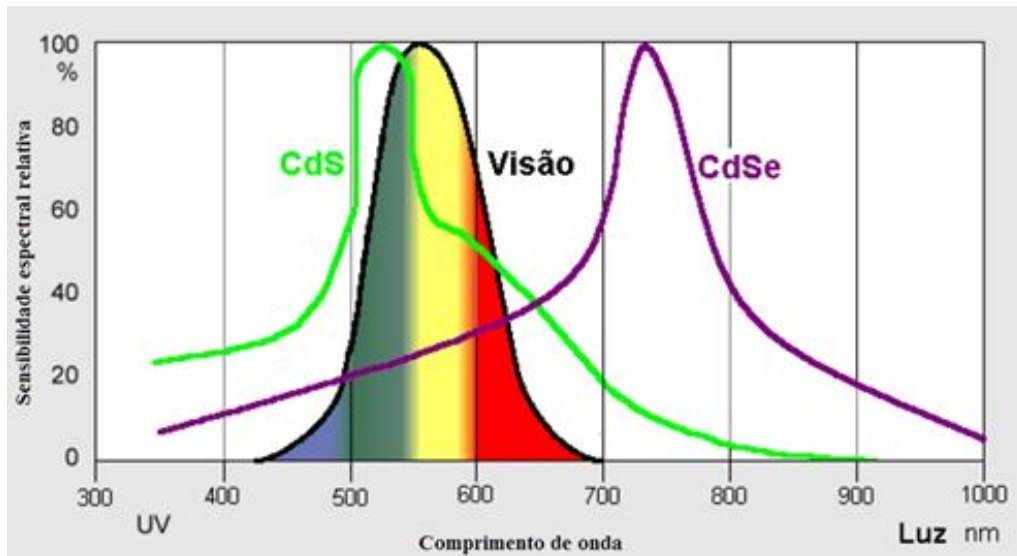


Figura 3.2: Respostas espectrais das células CdS, CdSe e Visão (comprimento de onda \times sensibilidade espectral relativa).

Os fotorresistores são dispositivos com tempo de resposta lento devido principalmente ao tempo de recombinação dos pares elétron/lacuna. De acordo com Silva et al. [30], este tempo é de aproximadamente 100 ms.

A resistência de um LDR varia não linearmente com a luz incidente, segundo a Equação 2:

$$R = C \cdot L^{\alpha} \quad (3-1)$$

Onde: R = resistência, em ohm; L = luminância, em lux; C e α = constantes dependentes do processo de fabricação e do material utilizado [10].

A curva característica da resistência *versus* luminosidade do LDR é ilustrada na Figura 3.3 (b). Ela também aparece em escala logarítmica na Figura 3.3 (a), que é bastante encontrada na literatura [8, 25, 37].

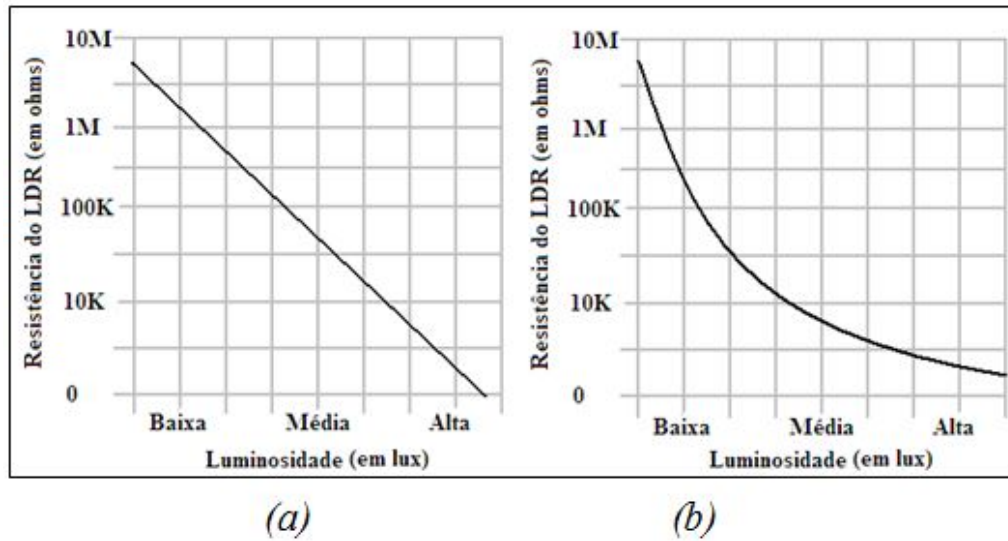


Figura 3.3: *Luminosidade × resistência:*
 (a) escala logarítmica; (b) escala real.

O LDR, por ser um elemento semiconductor, sofre a influência da temperatura, isto é, a sua resistência decresce com o aumento da temperatura [10].

A aplicação mais conhecida do LDR está na iluminação pública, onde ele é utilizado para que, de acordo com a claridade do ambiente, sejam acionados ou desligados relés que comandam automaticamente as lâmpadas, sem que seja necessária a intervenção de um ser humano para realizar esta tarefa. Outra aplicação é seu uso em câmeras para medir o nível de luz do ambiente, permitindo assim o controle do tempo de exposição para a captura de uma boa imagem. As utilizações menos usuais desses componentes são em mísseis que seguem o calor emanado pelos aviões e em detectores de radiação infravermelha para pesquisas astronômicas.

Apesar do baixo custo e dos inúmeros campos onde estes sensores podem ser aplicados, a sua não-linearidade, sensibilidade térmica e elevado tempo de resposta tornam seu uso limitado.

3.2.2 Sensores de fotojunção

Os sensores de fotojunção são construídos com material semiconductor do tipo P (positivo) e N (negativo). Os materiais mais comumente utilizados são o Si (silício) e o Ge (germânio), em que ambos são tetravalentes, ou seja, possuem quatro elétrons na camada de valência.

Semicondutores do tipo P e do tipo N são compostos por elétrons e lacunas. A diferença entre os dois é que o tipo P tem como portadores majoritários (maior quantidade) as lacunas, e o tipo N tem como portadores majoritários os elétrons.

Esta diferença ocorre pelo fato que no momento de dopagem, injeção de impurezas em suas estruturas, o semiconductor do tipo P é dopado por material trivalente (três elétrons na camada de valência), fazendo com que sobre lacunas não correlacionadas com elétrons. Já o do tipo N é dopado por material pentavalente (cinco elétrons na camada de valência), ocasionando elétrons livres neste material, como é mostrado na Figura 3.4.

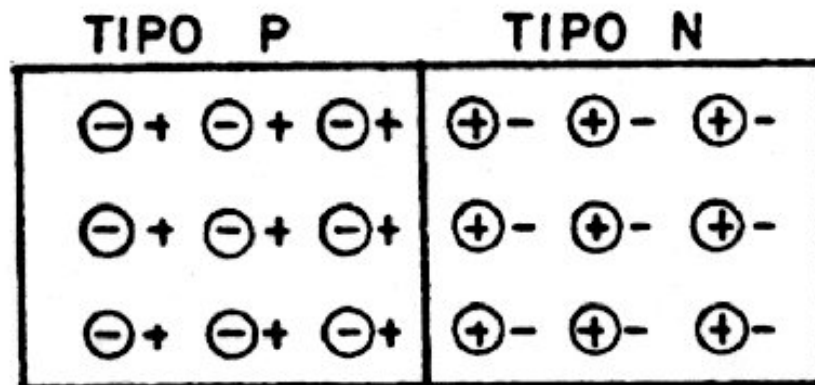


Figura 3.4: Semiconductor tipo P e tipo N. Fonte: [1]

Efetuada-se a união dos dois tipos de semicondutores, da forma que está ilustrada na Figura 3.5, o excesso de elétrons do material do tipo N tende a migrar para o material do tipo P, visando tanto o equilíbrio eletrônico como a estabilidade química. O equilíbrio eletrônico é o equilíbrio das densidades de elétrons nos dois terminais. A estabilidade química é realizada da seguinte forma: cada átomo do material do tipo N que perde um elétron fica com oito elétrons na sua camada de valência, o mesmo acontecendo com cada átomo do material do tipo P, que tem a sua lacuna ocupada por este elétron.

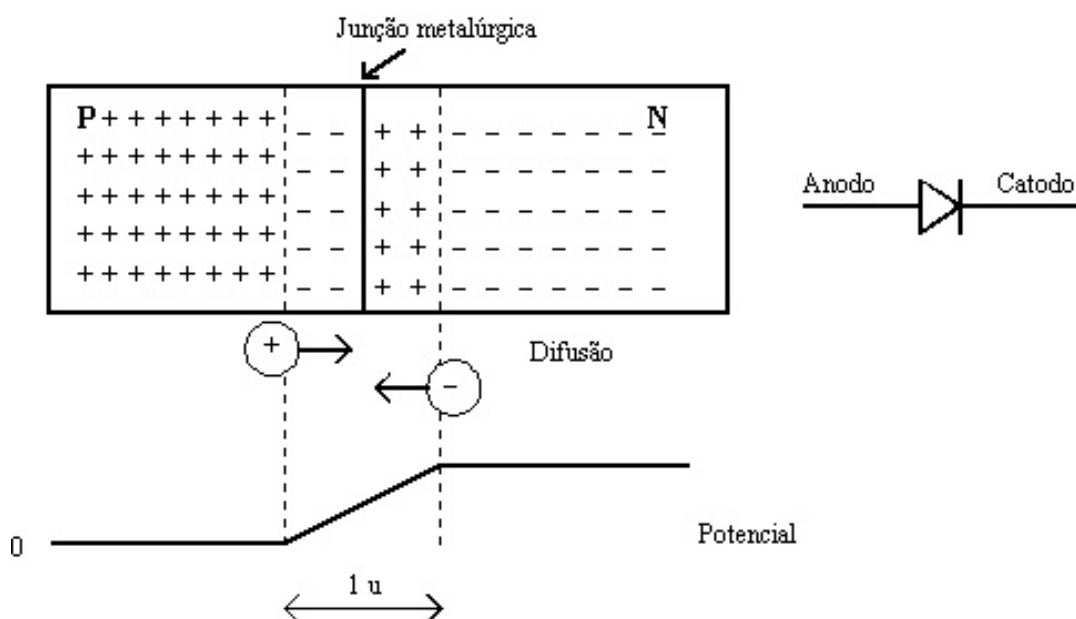


Figura 3.5: Junção PN. Fonte: [1]

Este fenômeno da ocupação de uma lacuna por um elétron é chamado de recombinação, como mostra a Figura 3.6.

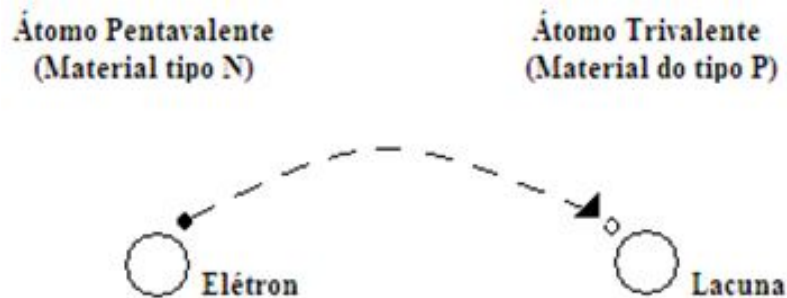


Figura 3.6: Recombinação elétron/lacuna.

Como o processo de recombinação dá-se inicialmente na região próxima à junção, ocorrerá neste local a formação da camada de depleção, que é a diminuição ou ausência de portadores majoritários na região próxima à junção PN [20].

A formação da camada de depleção ocorre à medida que os átomos do material tipo P próximos à junção recebem os primeiros elétrons preenchendo suas lacunas. No lado N forma-se uma região com íons positivos (falta de elétrons), dificultando ainda mais a passagem de elétrons do material do tipo N para o material do tipo P. Assim, a partir de certo momento, esse fluxo de elétrons cessa e essa região ionizada fica com ausência de elétrons e lacunas, que são os responsáveis pela corrente elétrica [20], como mostra a Figura 3.7.

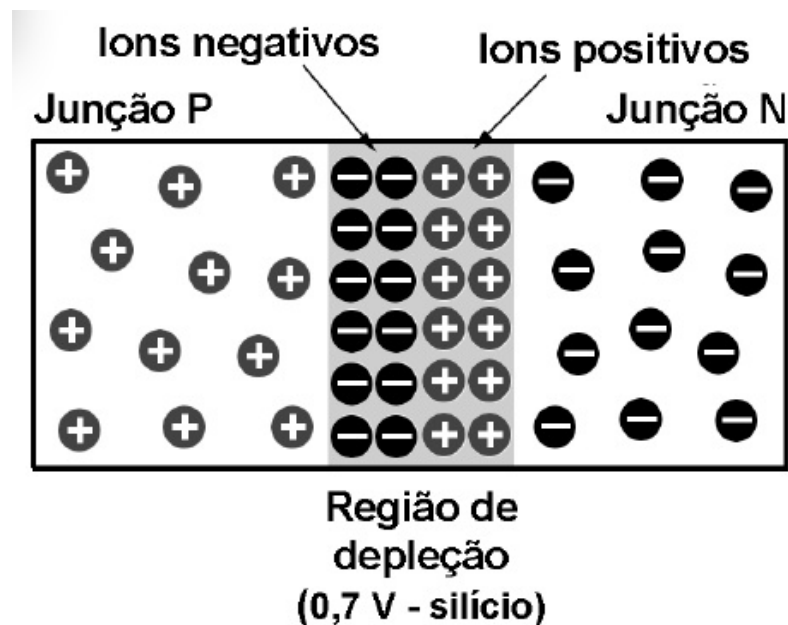


Figura 3.7: Camada de depleção. Fonte: [29]

Como a camada de depleção fica ionizada, cria-se uma diferença de potencial na junção chamada de barreira de potencial, cujo símbolo é V_p , como mostra a Figura 3.8.

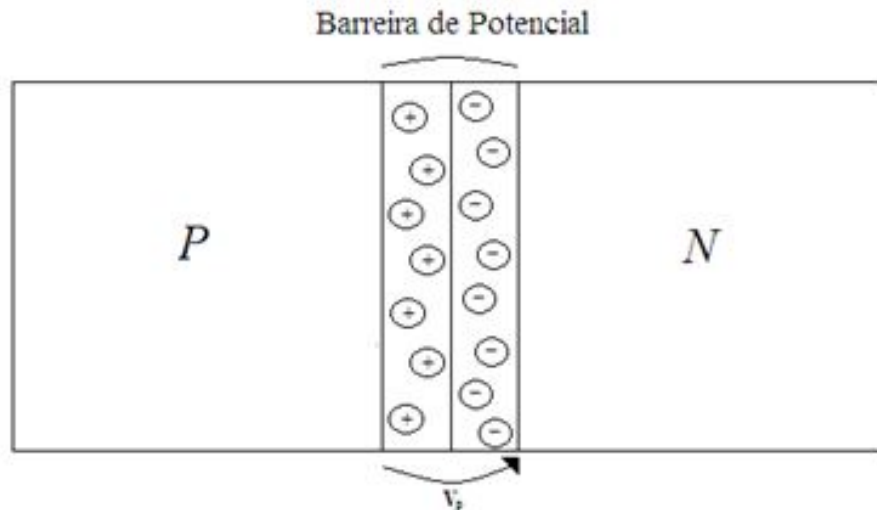


Figura 3.8: Barreira de potencial.

Essa diferença de potencial V_p é de aproximadamente 0.7V para semicondutores de silício e de 0.3V para semicondutores de germânio. A incidência de radiação eletromagnética na junção cria pares adicionais de elétron/lacuna que, por sua vez, geram uma diferença de potencial que pode ser verificada nos terminais do dispositivo. Uma vez que há aumento da intensidade de radiação na área sensível do dispositivo, nota-se também aumento de tensão nos terminais do mesmo.

Fototransistor

Assim como o transistor convencional, o fototransistor é uma combinação de dois diodos de junção, em um conjunto organizado de três camadas semicondutoras NPN ou PNP. Essas camadas são conhecidas como emissor, base e coletor. Seu esquema de funcionamento é ilustrado na Figura 3.9.

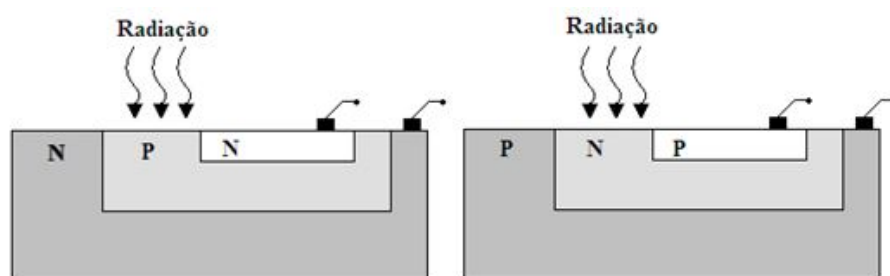


Figura 3.9: Esquema de funcionamento do fototransistor.

Entretanto, associado ao efeito transistor aparece o efeito fotoelétrico. Em geral, os fototransistores possuem apenas dois terminais acessíveis, o coletor e o emissor, sendo a base incluída apenas para eventual polarização ou controle elétrico [20]. O fototransistor pode detectar a incidência de luz e fornecer um ganho dentro de um único componente. Seu símbolo esquemático é ilustrado na Figura 3.10.

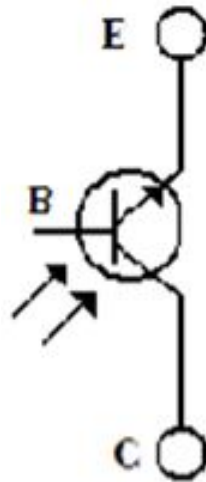


Figura 3.10: Símbolo esquemático do fototransistor.

Se certa quantidade de radiação luminosa atinge a base, ocorre a geração de portadores minoritários, por trabalhar na região reversa, aumentando a corrente de base. Isto implica em uma variação na corrente do coletor β vezes maior e proporcional à intensidade de luz incidente [20].

A corrente de saturação na base está diretamente relacionada ao fluxo luminoso incidente na junção fotossensível do fototransistor, conforme ilustrado na Figura 3.11.

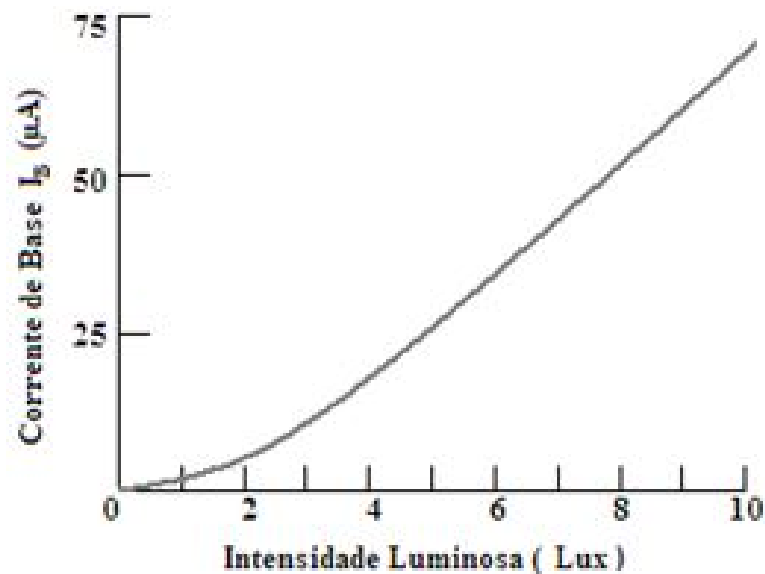


Figura 3.11: Corrente \times intensidade luminosa. Fonte: [20]

Geralmente, um fototransistor é conectado a um circuito na configuração emissor comum. Na ausência de um fluxo luminoso incidente em sua junção fotossensível, apenas uma pequena corrente de saturação reversa do coletor é originada pela ação dos portadores de carga minoritários gerados termicamente.

A configuração emissor comum, conforme ilustrada na Figura 3.12, é a mais utilizada em circuitos transistorizados. Por isso, os diversos parâmetros dos transistores fornecidos pelos manuais técnicos têm como referência tal configuração. Nela, a base é o terminal de entrada de corrente e o coletor é o terminal de saída de corrente do circuito, sendo que o terminal do emissor é comum às tensões de entrada e saída [20].

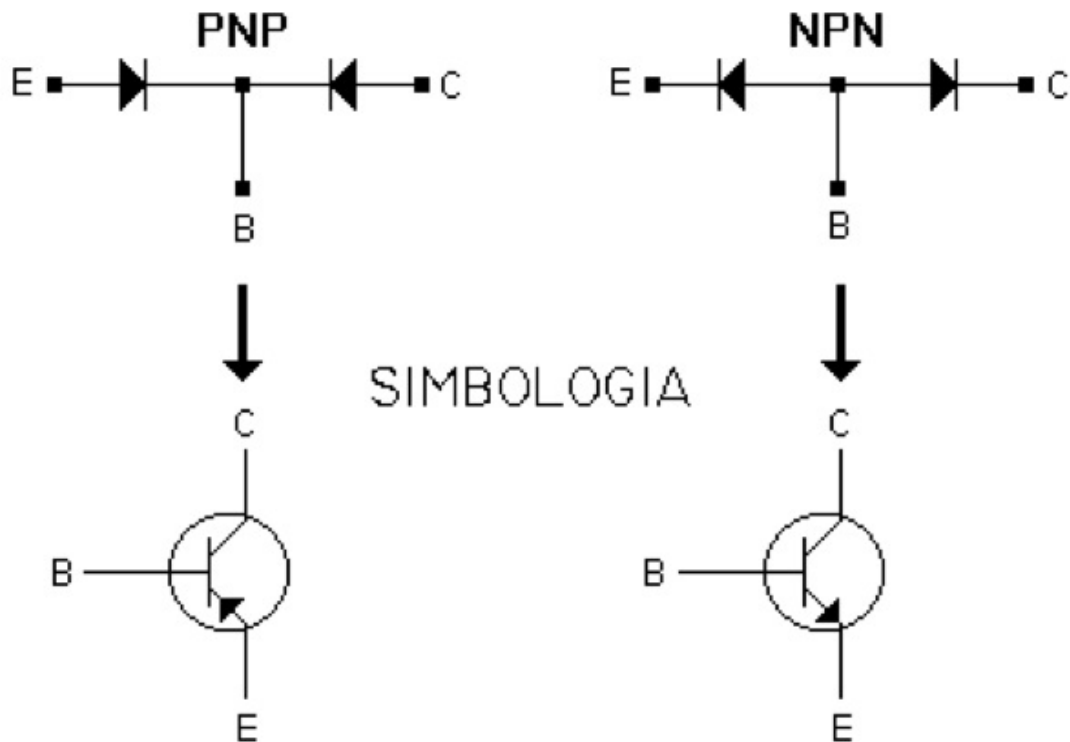


Figura 3.12: Configuração emissor comum

Em termos de encapsulamento, este dispositivo possui dois ou três terminais estando a junção base-coletor exposta à luz através de uma pequena janela transparente implantada no invólucro. Também é possível encontrar fototransistor com a base acessível.

O fototransistor pode ser utilizado em regime de comutação ou em regime linear. No regime de comutação, o dispositivo é utilizado apenas para a detecção da existência (ou não) de fluxo luminoso, restringindo-se a sua operação a dois pontos de funcionamento distintos, isto é, o transistor ou se encontra em corte ou saturado. Desta forma, o fototransistor pode assegurar o comando direto de, por exemplo, um relé ou uma porta lógica.

O componente funcionando em regime linear não é muito utilizado, pois a sua característica quando comparada, por exemplo a de um fotodiodo, possui uma maior não-linearidade. No entanto, para fototransistores cuja base estejam eletricamente acessíveis, é possível escolher um ponto de funcionamento onde a característica seja aproximadamente linear [11].

Tal como o LDR, o fototransistor está sujeito às variações de temperatura. Com o aumento da temperatura em torno de 8 a 10°C, a corrente que circula no componente enquanto não existe incidência de luz dobrará. Para temperaturas elevadas, essa corrente terá um valor significativo em relação à corrente total [34].

Em comparação com os fotodiodos, os fototransistores possuem a vantagem de terem maior sensibilidade pela introdução de uma função interna de amplificação. No entanto, a sua resposta é bem mais lenta, aproximadamente 10 μ s (microssegundos) [11].

As aplicações do fototransistor estão em leitores de cartões perfurados, circuitos de lógica em computadores, controle de iluminação (estradas etc.), indicação de nível, relés e sistemas de contagem [7].

Fotodiodo

Em um diodo comum polarizado reversamente, existe uma corrente reversa formada por portadores minoritários mantidos pela energia térmica a temperatura ambiente. Assim, se houver incidência de luz sobre a junção PN, essa energia também pode gerar portadores minoritários, contribuindo para aumentar a corrente reversa.

Embora qualquer diodo seja sensível à radiação eletromagnética, o fotodiodo é um dispositivo especialmente desenhado para aproveitar ao máximo este efeito. Seu símbolo esquemático está ilustrado na Figura 3.13.



Figura 3.13: Símbolo esquemático do fotodiodo.

Um fotodiodo é, portanto, um diodo com uma janela sobre a junção PN, que permite a entrada de luz - na forma de fótons - na estrutura atômica do dispositivo.

O número de elétrons livres gerados em cada material é proporcional à intensidade de luz incidente. Essa luz produz elétrons livres e lacunas, aumentando a quantidade de portadores minoritários e, conseqüentemente, controlando a corrente reversa. Desta forma, quanto maior a incidência de luz, maior a corrente no fotodiodo polarizado reversamente, sendo limitada a poucos μ A (microampères).

A resposta espectral dos fotodiodos depende do tipo de material usado em sua fabricação e do seu encapsulamento. No que se refere ao material utilizado, a maior parte destes sensores são fabricados a partir de silício, possuindo uma resposta espectral máxima para comprimentos de onda em torno dos 800nm. Contudo, quando se pretende

uma melhor resposta aos comprimentos de onda mais baixos, por exemplo na zona do infravermelho, o material usado normalmente é o germânio [11].

Os fotodiodos podem ser aplicados em detectores de luz, medidores de intensidade luminosa, alarmes, Luxímetros de boa qualidade, leitores de código de barras e sensores diversos.

3.2.3 Comparação entre os dispositivos fotoelétricos

Conforme o estudo realizado, foi possível elaborar uma comparação de forma conceitual entre os dispositivos fotoelétricos, como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: *Comparação entre os dispositivos fotoelétricos.*

Característica	LDR	Fototransistor	Fotodiodo
Resposta (tempo)	<i>ms</i>	<i>μs</i>	ηs
Sensibilidade	Elevada	Muito elevada	Muito elevada
Linearidade	Baixa	Média	Alta
Estabilidade com a temperatura	Baixa	Média	Média

Diante dos dados apresentados na Tabela 3.1, observou-se que para tomar a decisão sobre qual é o melhor dispositivo fotoelétrico deve-se levar em consideração o propósito para o qual ele será utilizado.

Os sensores estarão sempre sujeitos às variações das condições de trabalho, tais como: mudanças de temperatura, flutuações na tensão de alimentação, alterações ambientais, entre outras. Em decorrência dessas condições, ele deve variar o mínimo possível suas características originais, para não comprometer o seu desempenho final.

Embora seja possível fundamentar, com base neste estudo, a escolha do componente fotoelétrico mais adequado para a construção do aparelho medidor de luminosidade, optou-se por analisar a confecção de protótipos de teste, cada qual contendo um dos respectivos dispositivos fotoelétricos abordados. Além disso, os três protótipos analisados foram submetidos a testes de validação, em laboratório e em campo. A análise destes resultados determinou qual dos três foi o mais adequado para a construção do protótipo medidor de luminosidade de baixo custo proposto neste trabalho.

3.3 Medidor de luminosidade de baixo custo

Nesta seção, será apresentado o medidor de luminosidade Luxímetro, que pode ser utilizado como alternativa o equipamento LI-COR LI-1776.

3.3.1 Luxímetro

O Luxímetro é um equipamento utilizado por arquitetos, engenheiros eletricitas e profissionais afins para medir luminosidade em diversos ambientes, como centro cirúrgico, biblioteca, indústria de componentes eletrônicos, entre outros.

O aparelho Luxímetro utilizado neste estudo, de acordo com suas especificações técnicas, pode trabalhar com quatro escalas diferentes de valores medidos para a luminosidade, que são, em lux: 0-200, 200-2000, 2000-20000 e 20000-200000.

Apesar de ele ser um aparelho mais barato que o LI-COR LI-1776, utilizado para a medição da interceptação luminosa em pastagens, ele ainda tem um custo elevado para os pequenos e médios produtores.

3.4 Definição do cenário de testes

Os experimentos mostrados nesta seção tem como finalidade validar a hipótese de que o aparelho Luxímetro pode ser utilizado para medir a luminosidade como alternativa ao planímetro ótico LI-COR, modelo LI-1776, além de validar e calibrar os protótipos desenvolvidos. Os experimentos foram conduzidos por Morais e Franco [21].

3.4.1 Equipamentos utilizados nos experimentos

Para realização dos experimentos, Morais e Franco [21] construíram um arranjo utilizando:

- 01 lâmpada incandescente de 220V e 500W, utilizada nos ensaios em laboratório como fonte luminosa, de forma que houvesse a simulação do sol, por se tratar de um dispositivo que transforma energia elétrica em energias luminosa e térmica, ilustrada na Figura 3.14.



Figura 3.14: Lâmpada incandescente. Fonte: [21]

- 01 LI-COR, modelo LI-1776, no qual a sua região fotossensível possui formato de régua e é constituído por diversos sensores dispostos ao longo dela, como pode ser visto na Figura 3.15.



Figura 3.15: LICOR 1776. Fonte: [21]

Esse instrumento foi utilizado para validação do aparelho Luxímetro nos experimentos realizado tanto em laboratório quanto em campo.

- 01 Luxímetro digital Minipa, modelo MLM-1332, de 10 dígitos, com precisão de 3.0% da leitura + 0.5% de fundo de escala, na faixa de 1 a 200.000 lux, ilustrado na Figura 3.16.



Figura 3.16: Luxímetro Minipa, modelo MLM-1332. Fonte: [21]

Nos experimentos realizados em laboratório e em campo, esse equipamento foi testado e em seguida comparado ao LI-COR, modelo LI-1776.

- 01 varivolt com saída de 0–250V, conforme apresentado na Figura 3.17.



Figura 3.17: *Varivolt. Fonte: [21]*

Esse equipamento foi utilizado nos experimentos em laboratório, para propiciar a variação na tensão de alimentação da lâmpada que, por sua vez, provocou uma variação de luminosidade produzida pela mesma.

- 01 matriz de contato utilizada na implementação dos circuitos experimentais para construção dos protótipos, apresentada na Figura 3.18.

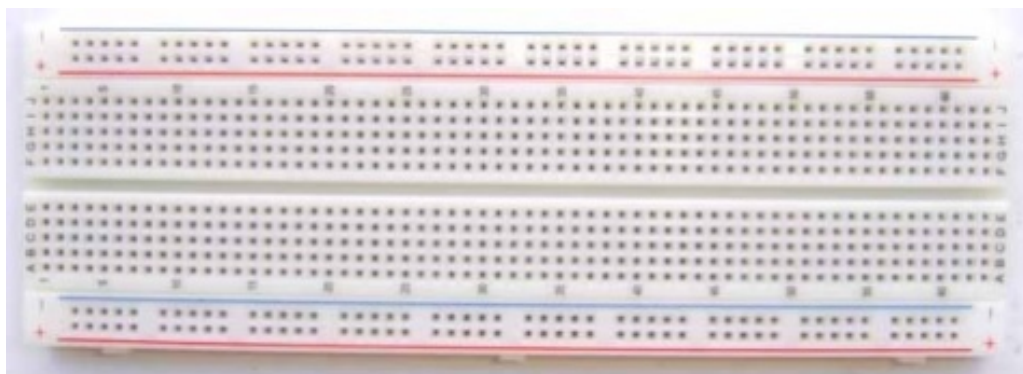


Figura 3.18: *Matriz de contato. Fonte: [21]*

- 02 multímetros digitais, Figura 3.19, utilizados nos experimentos em laboratório para a leitura das grandezas elétricas (tensão, corrente e resistência) dos dispositi-

vos fotoelétricos utilizados para a construção dos protótipos, bem como no monitoramento da tensão de saída do varivolt, que proporcionava à lâmpada sua tensão de alimentação.



Figura 3.19: *Multímetro digital. Fonte: [21]*

3.4.2 Procedimentos para medição

Para a realização dos experimentos, o laboratório utilizado foi adaptado de modo que não houvesse interferência de luz externa, mesmo que de baixa intensidade, nos resultados obtidos. Em seguida, os equipamentos foram interconectados para a realização dos experimentos. Na Figura 3.20, tem-se o esquema de ligação desses equipamentos.

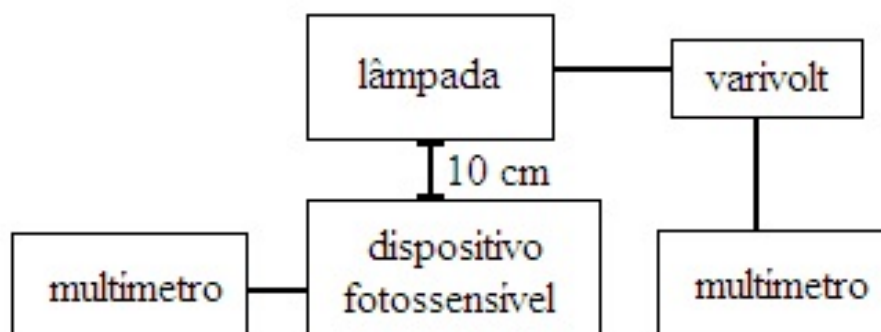


Figura 3.20: *Esquema do arranjo experimental. Fonte: [21]*

No esquema apresentado, a lâmpada e o multímetro, usado para controlar a tensão de alimentação a ser transferida para a lâmpada, foram ligados ao varivolt que,

por sua vez, foi conectado à rede elétrica de 220V. A lâmpada foi condicionada a um suporte de ferro que possibilitava o seu deslocamento e sob ela foram posicionados, individualmente, os aparelhos LI-COR e Luxímetro de modo que o fluxo luminoso incidisse perpendicularmente em suas regiões fotossensíveis, conforme apresentado na Figura 3.21.

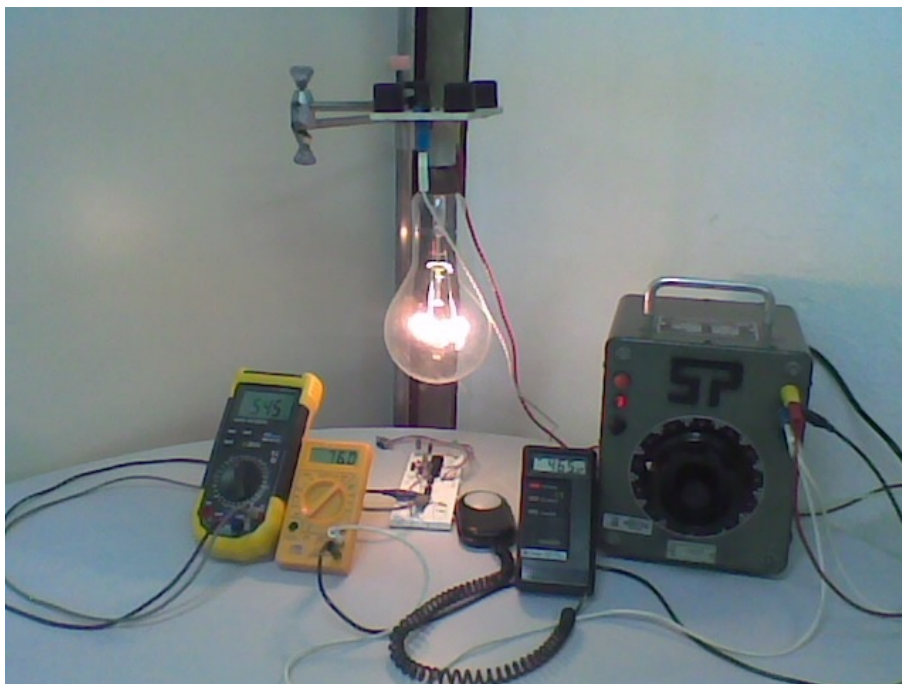


Figura 3.21: Arranjo experimental em laboratório. Fonte: [21]

Em todos os experimentos realizados, foram coletadas 26 amostras de dados referentes aos valores de tensão na faixa de 0 a 250 volts, ou seja, a cada 10 volts um dado foi coletado. O multímetro, conectado à saída do varivolt, auxiliou no monitoramento desta tensão aplicada na lâmpada, que foi crescente, variando de 10 em 10 volts entre cada amostra.

Foi necessário determinar a distância mais adequada entre a lâmpada e os aparelhos fotossensíveis, de forma que a incidência de sua luz não os danificasse devido a sua energia térmica. Além disso, esta distância deve ser de tal forma que a luminosidade da lâmpada fique centralizada mais sobre o equipamento em teste. Após vários experimentos, verificou-se que a distância de 10cm atendia tais especificações, sendo, portanto, utilizada em todos os testes realizados, exceto no experimento para determinar a região mais sensível do LI-COR, modelo LI-1776.

3.5 Luxímetro como medidor de IL em pastagens

As Seções 3.3 e 3.5 analisam trabalhos já realizados por Morais e Franco [21] com o intuito de, a partir disso, construir uma proposta de sensor de luminosidade de baixo custo adequado.

Deve-se observar que esta seção apresenta a análise dos experimentos realizados e faz a validação dos dados apresentados por Morais e Franco [21].

3.5.1 Apresentação dos resultados obtidos

Os experimentos realizados com os aparelhos LI-COR, modelo LI-1776 e com o Luxímetro, que serão abordados nesta seção, tiveram como objetivo comparar suas respostas comportamentais, já que eles trabalham na mesma faixa de frequência de 400-700nm. Essa faixa do espectro, que é utilizada pelos vegetais como fonte de energia para as suas atividades metabólicas, é comumente chamada em fisiologia das plantas de RFA. A PPF (Photosynthetic Photon Flux Density) ou DFFF (Densidade de Fluxo de Fótons Fotossintéticos) é a grandeza física mensurada pelo LI-COR, modelo LI-1776, cuja resposta é dada em: $\mu E \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} = \mu mol \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$, onde $1 \mu mol = 6022 \cdot 10^{17}$ fótons, expressa a irradiância da RFA nesta faixa do espectro.

Entretanto, outras terminologias como candela e lux, unidade métrica da resposta do Luxímetro, também são utilizadas com menor frequência [31], devido ao fato da RFA e luz serem definições, usadas em diferentes áreas, para a mesma grandeza física (radiação existente no espectro visível).

LI-COR LI-1776

O experimento realizado com o aparelho LI-COR, modelo LI-1776, visava levantar a curva característica da tensão de alimentação da lâmpada (TAL) versus RFA. Como a régua, região fotossensível do LI-COR, possui 1m de comprimento e a fonte luminosa tem característica pontual, foi necessário determinar em qual ponto ao longo dela iria concentrar-se o fluxo luminoso.

Para isso, em outra experiência realizada, a lâmpada foi posicionada a 2cm de distância do LI-COR 1776, a fim de ser obter o máximo valor de saída (RFA) desse aparelho. Em seguida, dividiu-se a régua em quatro partes iguais de 25cm cada, conforme ilustrado na Figura 3.22, obtendo-se assim cinco pontos distintos (0, 25, 50, 75 e 100cm) nos quais fixou-se a fonte luminosa.

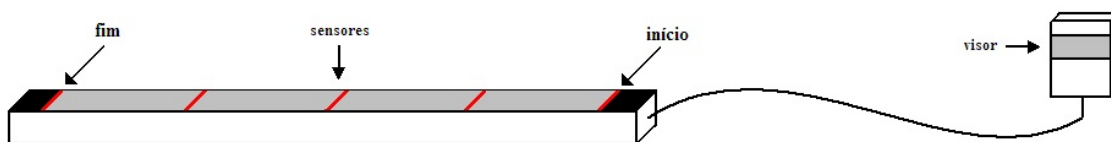


Figura 3.22: *Desenho esquemático do LI-COR LI-1776.*

Em cada um dos pontos marcados na régua do LI-COR foram realizadas coletas de medidas de luminosidade, que foram posteriormente comparadas. O valor máximo alcançado em cada ponto foi: 1237, 62, 26, 16 e 8, respectivamente. O resultado obtido com essa experiência indicou que a régua possui maior sensibilidade em seu início e à medida que se afaste o fluxo luminoso da região inicial, essa sensibilidade diminui significativamente.

Tabela 3.2: *Dados de referência do LI-COR LI-1776.*

Tensão (V)	Dados LI-COR
0	0,000
10	0,000
20	0,000
30	0,000
40	0,000
50	0,000
60	0,000
70	3,000
80	7,000
90	12,000
100	18,000
110	24,000
120	31,000
130	40,000
140	52,000
150	66,000
160	83,000
170	105,000
180	130,000
190	157,000
200	188,000
210	222,000
220	256,000
230	292,000
240	332,000
250	378,000

Na Tabela 3.2 são mostrados os valores de referência medidos pelo LI-COR LI-1776.

Analisando-se os resultados, o ponto determinado para levantar a curva característica da TAL *versus* RFA foi o de distância 0cm, ou seja, no início da região fotossensível da régua, sendo esse local o mais sensível à variação de luminosidade.

O procedimento realizado para levantar a curva característica foi variar a tensão aplicada à lâmpada de 10 em 10 volts e em seguida coletar o valor de saída que o LI-COR proporcionava. Lembre-se que a distância da fonte luminosa ao aparelho é de 10cm. A Figura 3.23 mostra a curva levantada com os dados obtidos no experimento.

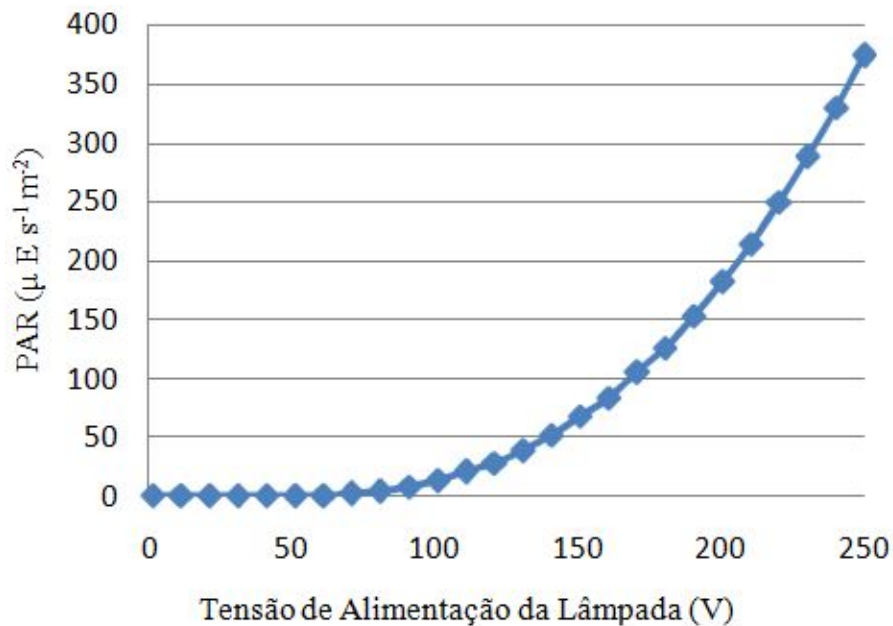


Figura 3.23: TAL \times RFA.

Após a execução desse experimento, o resultado obtido mostra que a curva da TAL *versus* RFA é bastante semelhante a uma exponencial. Isso ocorre devido ao fato de que a intensidade luminosa produzida pela lâmpada não é proporcional à tensão de alimentação na mesma.

Luxímetro

A região fotossensível do Luxímetro, delimitada pelo círculo vermelho na Figura 4.11, se comparada à região fotossensível do LI-COR, possui pequenas dimensões. Isso possibilitava a incidência direta do fluxo luminoso sobre a região.



Figura 3.24: Delimitação da região fotossensível do Luxímetro.

Tabela 3.3: Dados de referência do Luxímetro.

Tensão (V)	Dados Luxímetro
0	0,000
10	0,000
20	0,000
30	0,000
40	0,000
50	0,000
60	0,000
70	342,600
80	795,363
90	1356,558
100	2024,455
110	2685,431
120	3450,802
130	4429,577
140	5728,458
150	7232,668
160	9143,500
170	11627,639
180	14471,104
190	17567,193
200	21144,307
210	25096,320
220	29087,553
230	33346,407
240	38105,895
250	43603,645

Na Tabela 3.3, são mostrados os valores de referência medidos pelo LI-COR LI-1776.

O procedimento para levantar a curva característica do Luxímetro é semelhante ao realizado para o LI-COR, modelo LI-1776. Dessa forma, a curva característica da TAL *versus* iluminamento é apresentada na Figura 3.25.

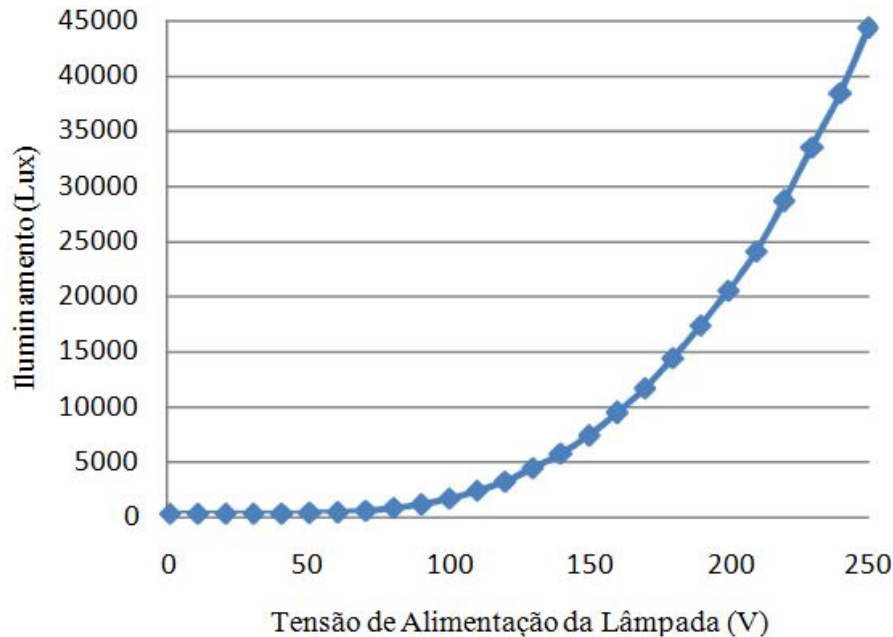


Figura 3.25: Tensão de alimentação da lâmpada \times iluminamento.

Como pode-se observar, a resposta comportamental obtida com este experimento, utilizando o Luxímetro, é bastante similar à resposta do experimento detalhado anteriormente utilizando o LI-COR, modelo LI-1776. A única diferença é que os valores da resposta do Luxímetro, apresentados no eixo das coordenadas na Figura 3.25, são muito maiores que os valores de resposta do LI-COR, apresentados no eixo das coordenadas na Figura 3.23, devido ao aspecto construtivo e a forma como os aparelhos foram calibrados.

Para demonstrar a similaridade dos comportamentos do LI-COR e do Luxímetro, as curvas características de ambos foram plotadas simultaneamente. Porém, para isso ser possível, houve a necessidade de multiplicar os valores de saída do Luxímetro por uma constante $k = 0.008669$ de forma que os valores superiores apresentados no gráfico fossem iguais, como ilustra a Figura 3.26.

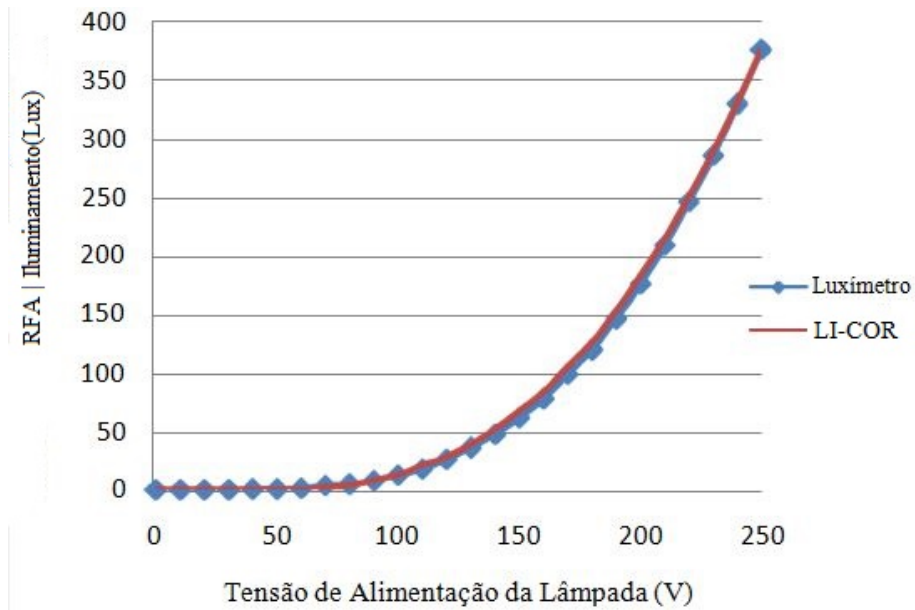


Figura 3.26: $TAL \times RFA/iluminamento$.

O grau de similaridade entre os dois aparelhos pode ser definido gerando um gráfico LI-COR LI-1776 *versus* Luxímetro e agregando a esse gráfico o coeficiente de correlação linear de Pearson (r), conforme ilustrado na Figura 3.27.

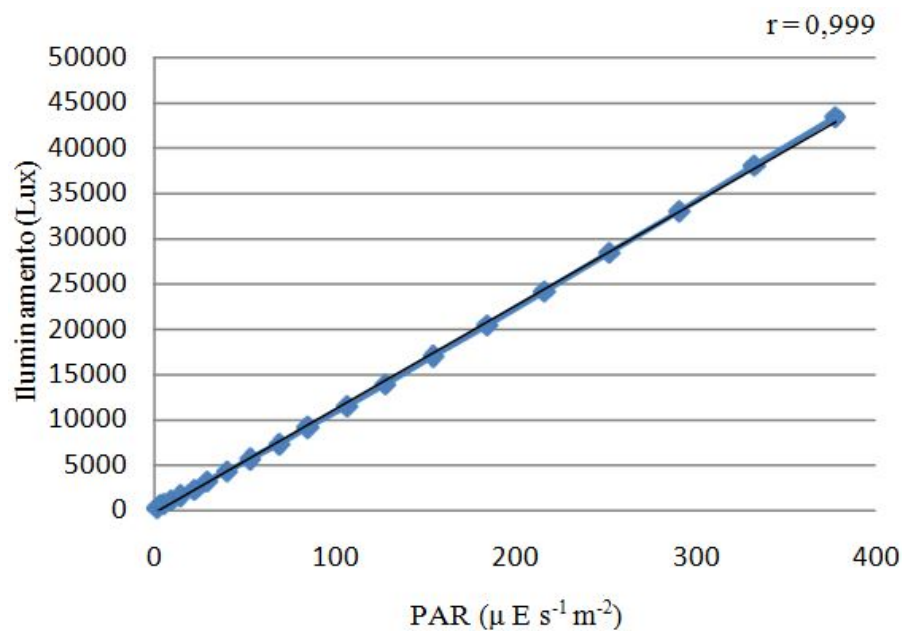


Figura 3.27: $RFA \times iluminamento$.

A intensidade da associação linear existente entre as variáveis pode ser quantificada através do chamado coeficiente de correlação linear de Pearson. Essa variável indica o quanto uma série de dados se aproxima de outra e assume apenas valores entre -1 (menos um) e 1 (um), conforme ilustrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Coeficientes de correlação de Pearson r . Fonte: [3]

Valores de r (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Uma correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Uma correlação fraca
0,40 a 0,69	Uma correlação moderada
0,70 a 0,89	Uma correlação forte
0,90 a 1,00	Uma correlação muito forte

Pela definição de correlação, para $r = -1$ tem-se uma correlação linear negativa perfeita, ou seja, conforme uma série de dados aumenta a outra diminui. Já para $r = 1$, tem-se uma correlação linear positiva perfeita e, neste caso, as séries de dados crescem ou decrescem equivalentemente. Mas se $r = 0$, isso indica que não existe correlação linear entre as séries de dados [3].

Neste experimento, o valor de r é bem próximo a 1 (um). Sendo assim, baseando-se no conceito de correlação, pode-se concluir que os equipamentos possuem comportamentos muito semelhantes. Dessa forma, é possível fazer uso do Luxímetro como alternativa ao LI-COR, modelo LI-1776, nos posteriores testes, em laboratório, para validação dos protótipos a serem construídos. Portanto, o próximo passo será avaliar se este resultado se repetirá nos experimentos em campo.

Experimentos realizados em campo

Para a realização dos experimentos em campo, com os aparelhos LI-COR e Luxímetro, foi realizado o procedimento de coleta de medidas de luminosidade utilizado pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias). Para que isso fosse possível, algumas exigências tiveram de ser acatadas. Devido ao uso do LI-COR, foi exigida a presença de um técnico de prontidão no horário estabelecido (entre 11h00min e 13h00min) e condições ambientais favoráveis como céu limpo e sol pleno.

No experimento, foi utilizado um piquete de pastagem de 200m², que por sua vez foi dividido em quatro áreas de 50m² cada, denominadas de área I, II, III e IV. As medições foram realizadas de maneira distribuída, visando abranger toda a área monitorada. Primeiro, fez-se a coleta usando o LI-COR e, logo em seguida, com o Luxímetro.

Para coletar as medidas de luminosidade, seguiu-se o procedimento:

- em cada área foi realizada uma coleta de luminosidade;
- uma coleta de luminosidade foi definida da seguinte forma: foram coletadas seis amostras de dados, medindo uma vez acima do capim e as outras cinco, medindo de maneira distribuída na área, no pé do capim.

Com as informações obtidas das amostras de luminosidade coletadas nas áreas, o próximo passo foi calcular a porcentagem de interceptação luminosa (IL) de cada uma delas. O cálculo da IL, segundo Carnevalli [9], é realizado da seguinte forma:

1. somam-se os valores das cinco amostras, coletadas ao pé do capim, de cada área;
2. divide-se o resultado da soma por cinco, que é o número de amostras coletadas por área. Dessa forma, tem-se a média das amostras de luminosidade;
3. divide-se o resultado da operação anterior pelo valor da amostra coletada acima do capim;
4. multiplica-se o resultado da divisão anterior por 100. Desta forma, obtém-se a porcentagem de luminosidade que o capim não interceptou, ou seja, atingiu a base da planta; e
5. subtrai-se de 100 o valor do resultado da operação anterior. O resultado final será a porcentagem de luminosidade que o capim interceptou, ou seja, a porcentagem de IL.

Portanto, esse processo de cálculo da IL, para as áreas, pode ser demonstrado pela Equação 3:

$$\%IL = 100 - [(a_1 + a_2 + \dots + a_5)/5/a_c \cdot 100] \quad (3-2)$$

Onde: %IL = porcentagem de interceptação luminosa; a_1, a_2, \dots, a_5 = amostras de luminosidade coletadas ao pé do capim da área; a_c = amostra coletada acima da pastagem da área.

Após serem calculadas as %IL de cada área, tanto para a coleta utilizando o LICOR, modelo LI-1776, quanto para a coleta utilizando o Luxímetro, estes dados foram plotados em um gráfico, como mostra a Figura 3.28.

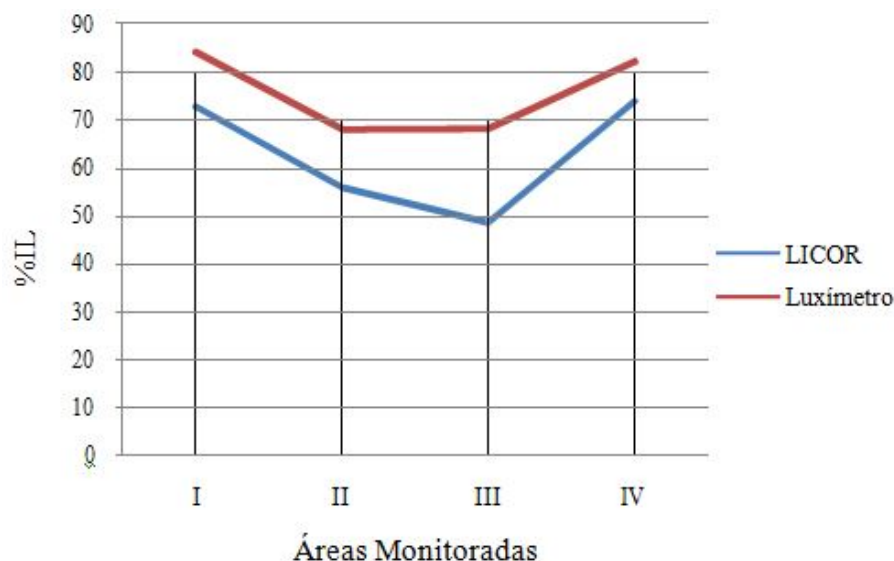


Figura 3.28: Áreas Monitoradas × Interceptação Luminosa.

Analisando o gráfico e comparando as curvas, percebe-se que, de uma forma geral, o LI-COR e o Luxímetro mostraram comportamentos bastante similares. Apenas na área III nota-se uma distorção insignificante na similaridade, que pode ser explicada pela diferença de tempo entre a realização das medições com os equipamentos. Além disso, no tempo entre as medidas, a luminosidade pode ter sido alterada pela passagem de pequenas nuvens.

3.5.2 Análise em relação aos valores de referência

A análise dos resultados dos experimentos realizados em laboratório e em campo mostrou que é possível utilizar o aparelho Luxímetro como uma alternativa no processo de medição de luminosidade para o cálculo da IL. Constatou-se também que ele pode ser utilizado como instrumento para validação dos protótipos, ao invés do LI-COR, devido ao fato de que suas respostas apresentam comportamentos bastante similares a este aparelho.

Deve-se observar que adotar o Luxímetro no processo de medição de luminosidade para o cálculo da IL, mesmo que também necessite de mão-de-obra especializada, traz uma independência aos experimentos, pois não é necessária mais a solicitação e disposição do equipamento LI-COR, modelo LI-1776, pela Embrapa. Também é relevante ressaltar que o Luxímetro apresenta as vantagens de ser simples, pequeno, leve, de fácil manuseio e de baixo custo, em relação ao LI-COR.

Como foi observado nos testes realizados, o aparelho Luxímetro pode ser utilizado como uma alternativa para a realização do processo de medição de luminosidade para o cálculo de IL em pastagens. Entretanto, mesmo que ele seja mais barato que o aparelho LI-COR, ele possui custo elevado para ser utilizado por pesquisadores e criadores, com valores atualmente variando de R\$100,00 a R\$900,00. Portanto, é necessário construir um medidor que tenha a mesma funcionalidade, mas utilizando componentes de baixo custo.

Esse medidor de luminosidade e a sua posterior adaptação para a concepção de um nó sensor que seja capaz de automatizar o processo de medição de luminosidade usando a tecnologia de Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) será composto por um dos sensores fotoelétricos estudados no Capítulo 2. Serão analisados os experimentos realizados visando comparar as respostas comportamentais dos protótipos de testes às obtidas com o Luxímetro.

A Seção 3.6 apresentará as análises e os resultados dos experimentos efetuados em laboratório com os protótipos construídos.

3.6 Protótipos de medidores de luminosidade de baixo custo

Nesta seção, serão apresentados os protótipos de medidores de luminosidade de baixo custo construídos por Moraes e Franco [21]. São dois protótipos utilizando LDR (PT1LDR e PT2LDR) e um protótipo usando fototransistor (PT1FT).

Também serão apresentados dois protótipos utilizando fotodiodo (PT1FD e PT2FD), que foram construídos para a apresentação de uma proposta de medidor de luminosidade adequado.

Observe que medidor de luminosidade é apenas o circuito eletrônico responsável pela aferição da luminosidade, seja em laboratório ou em um ambiente real. Já o nó sensor é um circuito mais completo, que possui microcontrolador, memória e transmissão RF, já estando preparado para o uso.

Os experimentos realizados em laboratório com os protótipos de teste construídos tiveram como objetivo levantar suas curvas características e posteriormente compará-las a fim de verificar se esses medidores possuem comportamentos similares em relação às respostas apresentadas pelos aparelhos Luxímetro e LI-COR, modelo LI-1776.

O arranjo experimental, apresentado na Seção 3.5, elaborado por Moraes e Franco [21] para levantar as curvas características dos aparelhos Luxímetro e, consequentemente, LI-COR, também foi utilizado nos experimentos realizados com os protótipos de teste.

O medidor de luminosidade bem como o nó sensor é formado por cinco componentes fundamentais: o sensor, o processador, o transceptor, a bateria e a memória, conforme ilustrado na Figura 3.29.

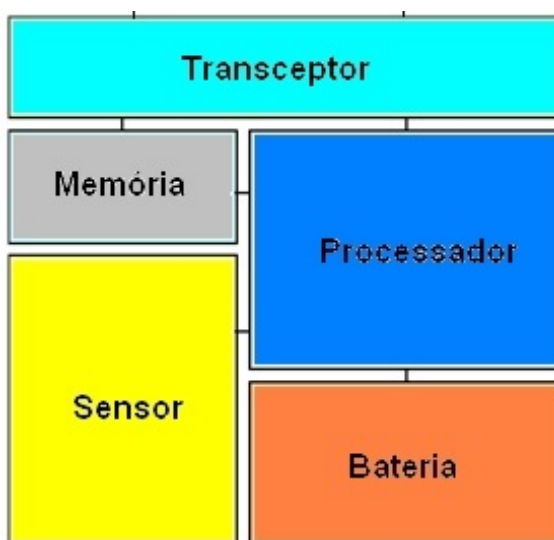


Figura 3.29: Componentes básicos de um nó sensor. Fonte: [26].

Todos os experimentos aos quais os protótipos foram submetidos tiveram como finalidade verificar a resposta comportamental digitalizada do dispositivo sensor que os compõem. Os protótipos foram constituídos com os seguintes componentes:

- um microcontrolador PIC16F877A, utilizado para realizar a conversão a 10 bits da entrada analógica da resposta comportamental do sensor em sua respectiva saída digital e também para transferir esse resultado ao transceptor (componente responsável pela comunicação do protótipo). Silva et al. [31] apresenta a descrição detalhada desse componente utilizado para construção do módulo de processamento desses protótipos;
- quatro pilhas AA para alimentar o circuito. Como o PIC16F877A suporta tensão máxima de alimentação de 5.5V, foi inserido um LM7805 para regular a tensão de entrada do circuito em 5V;
- um barramento MAX232 para realizar o interfaceamento entre a porta serial e o PIC16F877A, devido a tensão de saída da porta serial ser de $\pm 15V$;
- um módulo de comunicação. Para o protótipo do medidor manual de luminosidade a comunicação acontece via porta serial RS232, representado na Figura 3.30 pelo DB9. Já para o protótipo do nó sensor essa comunicação se dará através de um módulo de transmissão/recepção sem fio.

Os desenhos esquemáticos gerais dos circuitos eletrônicos projetados para a construção dos protótipos do nó sensor e do medidor de luminosidade são apresentados nas Figuras 3.31 e 3.30, respectivamente.

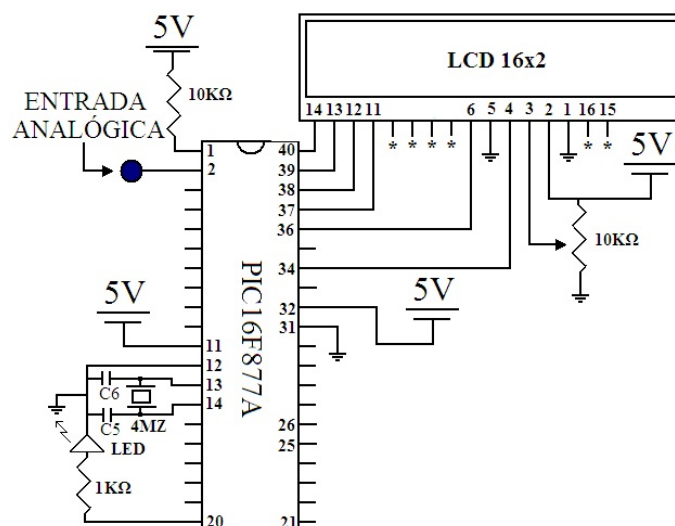


Figura 3.30: Esquema elétrico geral do protótipo do medidor de luminosidade. Fonte: [21]

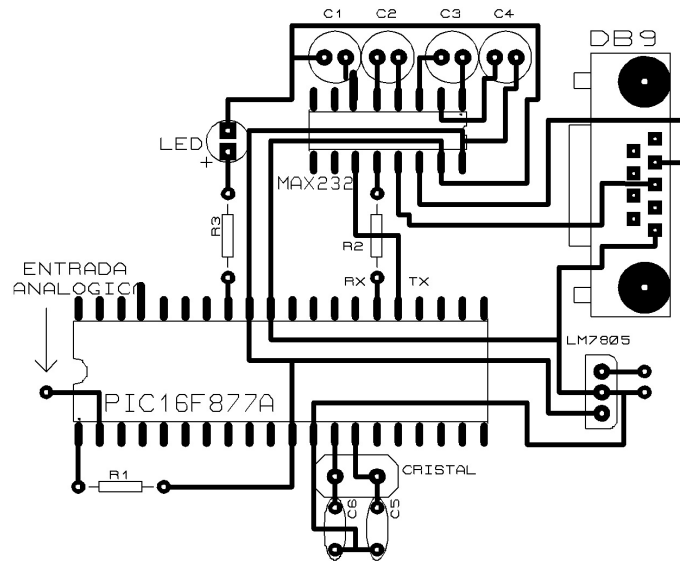


Figura 3.33: Esquema do circuito impresso em uma placa de fenolite do nó sensor. Fonte: [21]

Para a visualização do processo de desenvolvimento desses protótipos, uma coletânea de imagens foi realizada, conforme ilustrado na Figura 3.34.

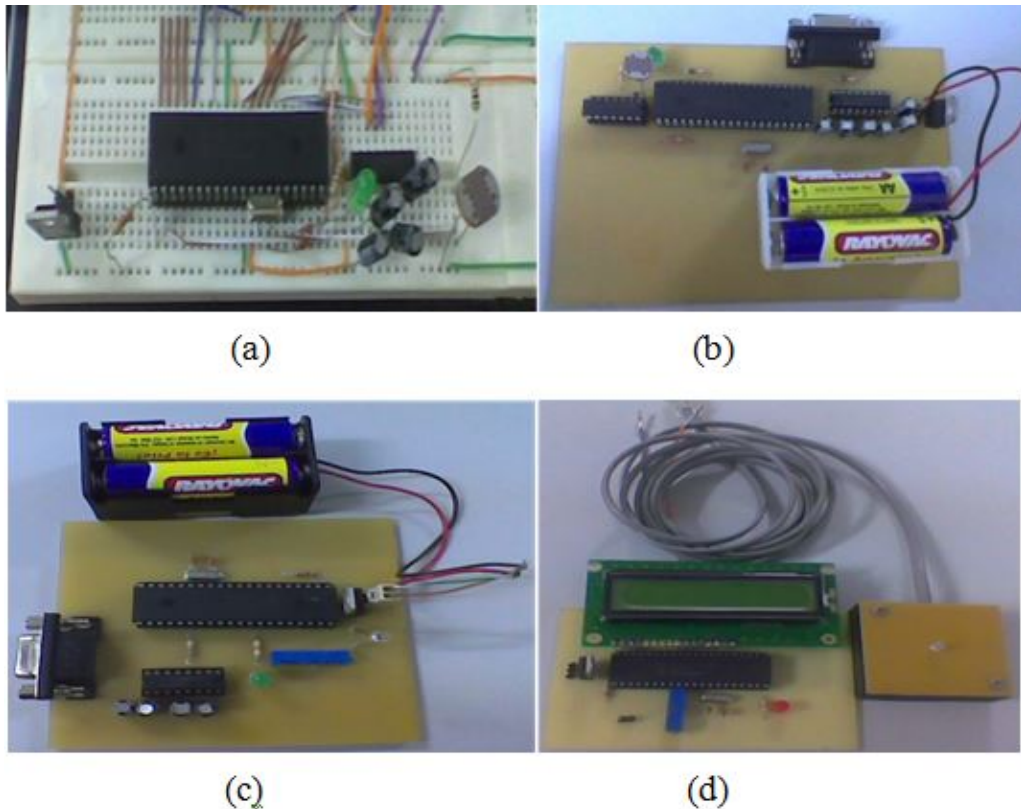


Figura 3.34: (a) PT1LDR em protoboard; (b) PT2LDR em placa de circuito impresso; (c) PT1FT disposto como nó sensor; e (d) PT1FT disposto como medidor de luminosidade.

Como são utilizados 10 bits para a conversão A/D (Analogico/Digital) tem-se 1024 (2^{10}) valores possíveis para representar a luminosidade. Portanto, para cada variação de 4.88mV (denominado degrau) de tensão haverá um correspondente valor digital para a luminosidade.

A $V_{saída}$ (tensão de saída), resposta analógica gerada pelo módulo de sensoria-mento, é a entrada do módulo de processamento, dos protótipos, que por sua vez a con-verterá em uma saída digital denominada $T_{Digital}$.

3.6.1 Protótipos usando o LDR

A construção dos protótipos de teste foi iniciada utilizando o sensor fotoelétrico LDR, devido ao fácil acesso deste componente eletrônico. Com este dispositivo, foram construídos dois protótipos. No primeiro, denominado de PT1LDR, o LDR foi inserido em uma configuração divisor de tensão e no segundo, denominado de PT2LDR, foi agregado à saída do PT1LDR um amplificador logarítmico.

Nas análises dos gráficos, a faixa de tensão de alimentação da lâmpada de 0–30V não foi avaliada, porque nesse intervalo a lâmpada não gera fluxo luminoso significante. Portanto, toda distorção apresentada no sinal da resposta será desprezada por não acarretar algum tipo de erro.

Configuração divisor de tensão

Em muitas aplicações, pode-se encontrar o LDR como componente integrante de uma configuração divisor de tensão, seja no ramo positivo ou no ramo negativo. Nos protótipos de teste construídos, o LDR foi posicionado no ramo positivo do divisor, conforme ilustrado na Figura 3.35.

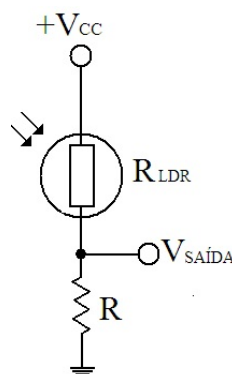


Figura 3.35: LDR na configuração divisor de tensão. Fonte: [21]

Se o LDR estiver no ramo positivo do divisor, o aumento da intensidade luminosa será responsável pelo aumento da tensão de saída desse divisor, devido à redução da resistência do LDR. Já se o LDR estiver no ramo negativo do divisor, o aumento da

intensidade luminosa será responsável pela redução da tensão de saída desse divisor, também em função da redução da resistência do LDR.

Desta forma, toda vez que houver uma variação de luminosidade, consequentemente, haverá uma variação da resistência do LDR. Portanto, será possível mensurar a variação de tensão (V_{saida}) do divisor, seja com o auxílio de um multímetro ou digitalizando esta saída.

Utilizando a configuração divisor de tensão com o LDR no ramo positivo e uma resistência R de 135Ω no ramo negativo, foi levantada a curva tensão de alimentação da lâmpada *versus* $T_{Digital}$ do PT1LDR, ilustrada na Figura 3.36.

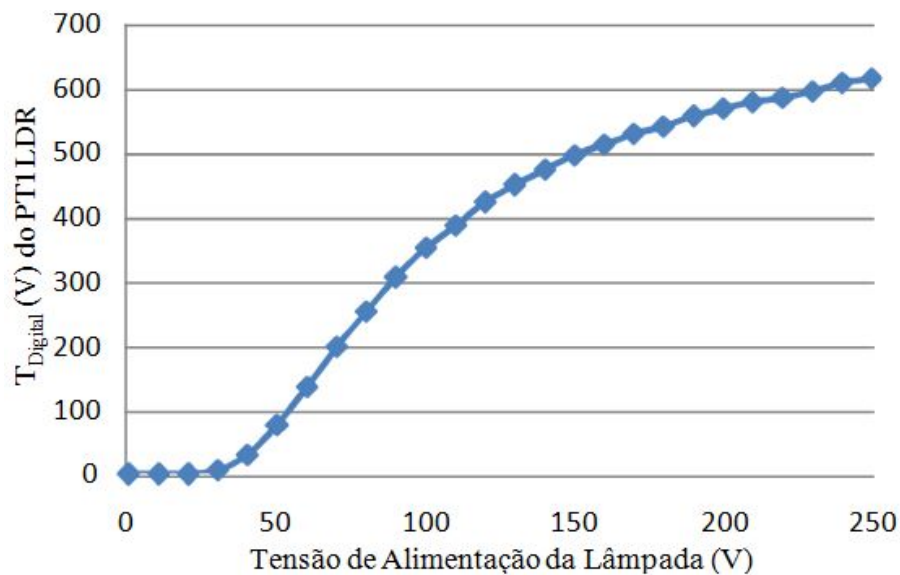


Figura 3.36: $TAL \times T_{Digital}$ do PT1LDR.

A curva apresentada para a saída do PT1LDR pode ser analisada em duas partes distintas. A Equação 3-3 descreve seu comportamento ao longo dela.

$$T_{Digital} = [V_{CC} \cdot R / (R_{LDR} + R)] / 4.88 \cdot 10^{-3} \quad (3-3)$$

Onde: $T_{Digital}$ = Tensão digitalizada do circuito; V_{CC} = tensão de alimentação do circuito; R = resistência do ramo negativo do divisor de tensão; e R_{LDR} = resistência do LDR.

Na primeira parte, delimitada pela faixa de tensão de alimentação da lâmpada de 40 a 130V, observa-se que com pouca incidência de luz há um rápido crescimento da $T_{Digital}$. Isto ocorre porque houve uma grande queda no valor da R_{LDR} que passou da ordem de $M\Omega$ (megaohm) para Ω (ohm). Na segunda parte, acima de 130V, para qualquer aumento do fluxo luminoso incidente obteve-se uma pequena diminuição do valor da R_{LDR} , que resultou em uma pequena variação da $T_{Digital}$ do circuito, acarretando a saturação da resposta deste protótipo.

Após a análise da resposta do PT1LDR, foi realizada uma comparação visual das respostas obtidas com o uso do protótipo e do aparelho Luxímetro, conforme é mostrado na Figura 3.37.

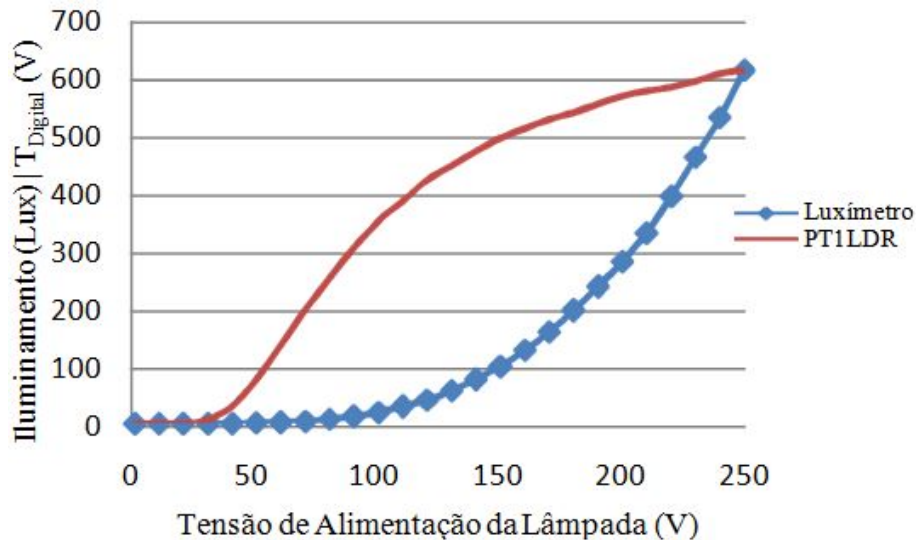


Figura 3.37: $TAL \times \text{iluminamento} \mid T_{Digital}$.

Para que fosse possível a visualização das curvas em um mesmo gráfico, foi necessário ajustar os valores de saída do Luxímetro multiplicando-os por uma constante $k = 13.93258 \cdot 10^{-3}$ de tal forma que o máximo valor de saída do Luxímetro e do PT1LDR fossem iguais.

Analisando os resultados obtidos, constatou-se que os comportamentos dos equipamentos são bem diferentes, visto que a resposta do Luxímetro aumentou quase que gradativamente, enquanto que a do PT1LDR aumentou bruscamente, tendendo à saturação. Deve-se observar que este comportamento é inadequado para a aplicação objetivo deste trabalho.

Para mostrar o grau de similaridade entre as duas séries de dados, foi gerado um gráfico de iluminamento *versus* $T_{Digital}$ do PT1LDR, ilustrado na a Figura 3.38.

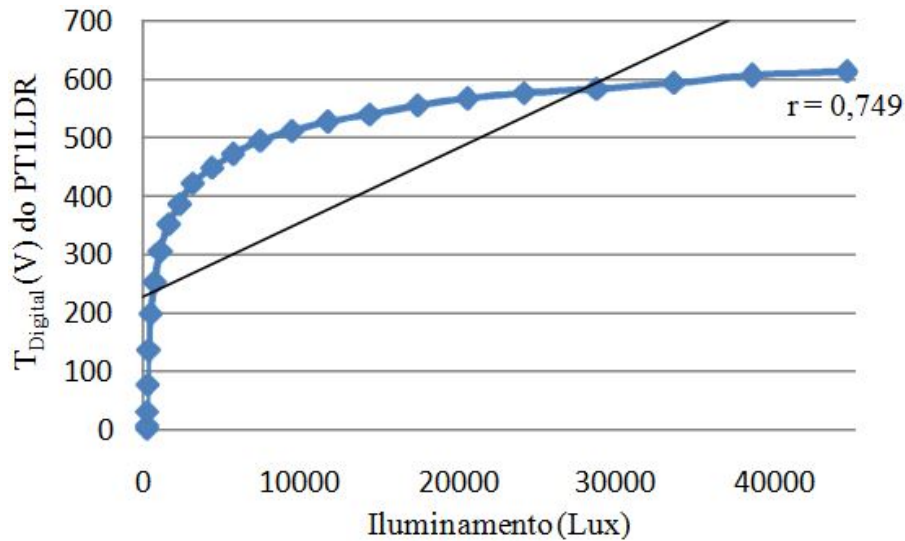


Figura 3.38: *Iluminamento* \times $T_{Digital}$ do PT1LDR.

Protótipo usando o LDR e um amplificador logarítmico

Com a finalidade de aumentar o grau de correlação entre o PT1LDR e o Luxímetro, um segundo protótipo denominado PT2LDR foi desenvolvido. Foi acrescentado um amplificador logarítmico, utilizando o amplificador operacional LM324, à saída do PT1LDR, conforme ilustrado na Figura 3.39.

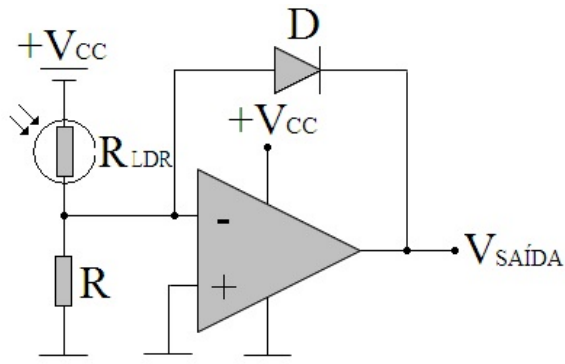


Figura 3.39: *Esquema do PT2LDR. Fonte: [21]*

O objetivo esperado com a aplicação do amplificador logarítmico na saída do PT1LDR era o de obter uma resposta linear tal qual a curva característica da luminosidade *versus* resistência apresentada na Figura 3.3(a) no Capítulo 2 e verificar o quanto o grau de correlação entre o PT2LDR e Luxímetro aumentaria. A Figura 3.40 mostra o resultado obtido no experimento utilizando o PT2LDR.

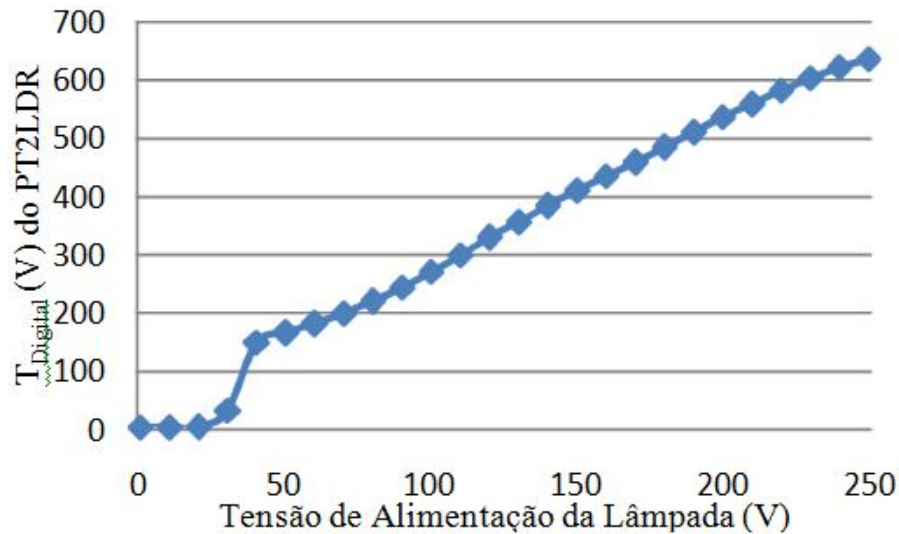


Figura 3.40: $TAL \times T_{Digital}$ do PT2LDR.

Essa resposta é aproximadamente linear porque a variação da resistência do LDR ocorre em escala logarítmica, de forma similar ao amplificador logarítmico. Após a obtenção desta resposta, foi plotado um gráfico para a comparação visual das respostas do PT2LDR e do Luxímetro, conforme ilustrado na Figura 3.41.

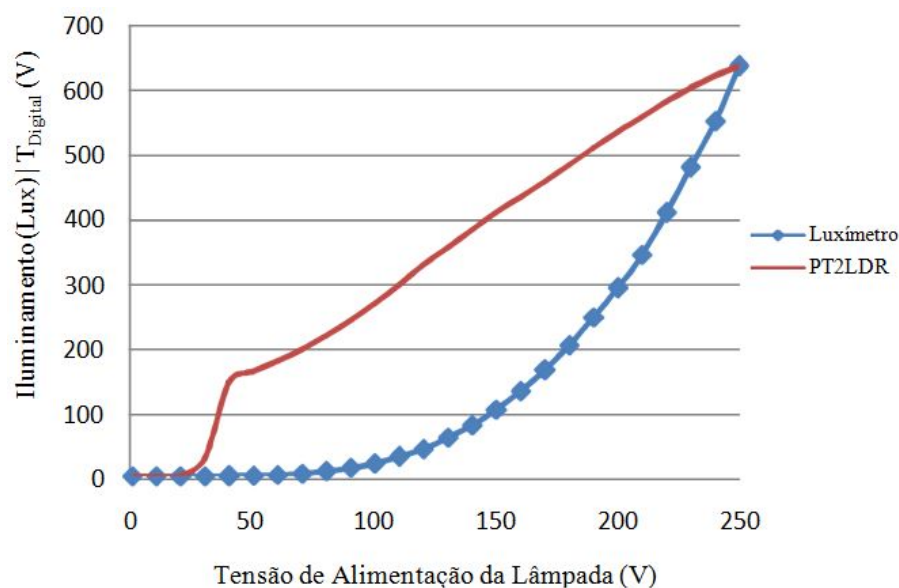


Figura 3.41: $TAL \times \text{iluminamento} | T_{Digital}$.

Observe que, enquanto a resposta gerada pelo Luxímetro cresce exponencialmente, a resposta obtida com o PT2LDR cresce linearmente, ou seja, ela não acompanha o aumento de luminosidade gerado a cada intervalo de 10V proporcionado pela tensão de alimentação da lâmpada.

Foi possível observar também que a diferença entre as comparações visuais realizadas entre o Luxímetro e o PT1LDR e entre o Luxímetro e o PT2LDR é perceptível.

Assim, ao plotar o gráfico do iluminamento *versus* $T_{Digital}$ do PT2LDR, nota-se que o grau de correlação foi maior que o obtido com o PT1LDR, ou seja, de 0.854, conforme mostrado na Figura 3.42.

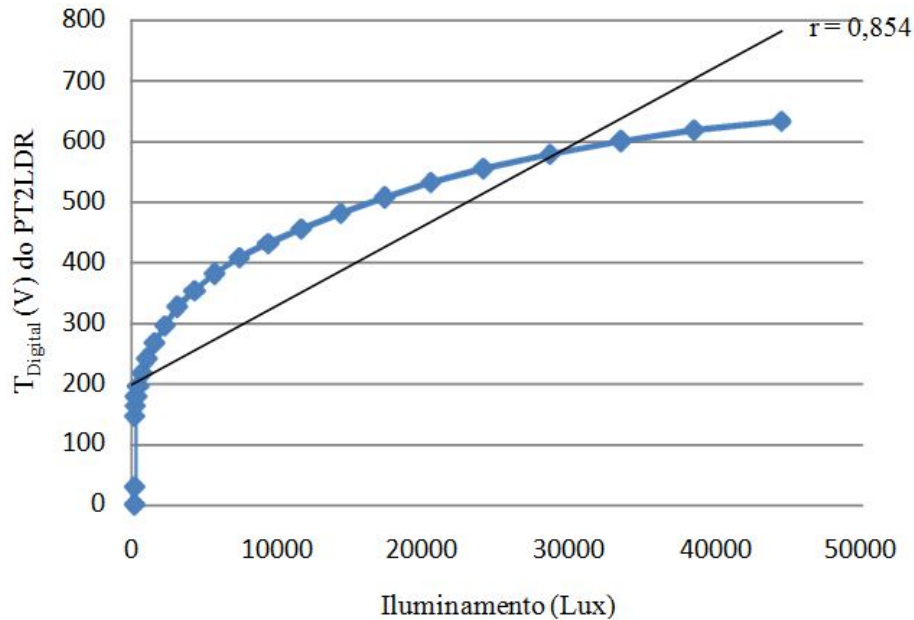


Figura 3.42: Iluminamento *versus* $T_{Digital}$ do PT2LDR.

Análise em relação aos valores de referência

Na Figura 3.38, é possível verificar que a correlação obtida entre o Luxímetro e o PT1LDR é de 0.749, ou seja, moderada, conforme a classificação estabelecida na Tabela 3.4 do Capítulo 2. Se comparada à correlação adquirida entre o Luxímetro e o LI-COR, modelo LI-1776, que foi de 0.999, fica explícito que a resposta do PT1LDR não é satisfatória. Logo, esse protótipo não pode ser usado como alternativa no processo de determinação da IL.

Mesmo com o aumento do grau de correlação de 0.749 para 0.854, a resposta obtida com o PT2LDR ainda não pode ser considerada satisfatória, porque a resposta comportamental esperada tem que possuir uma correlação de no mínimo 0.98 e o objetivo é o de se obter uma correlação positiva quase que perfeita para o protótipo. Portanto, esse protótipo também não pode ser usado como alternativa no processo de determinação da IL.

Dessa forma, observa-se que os protótipos PT1LDR e PT2LDR não satisfizeram os requisitos necessários para serem utilizados como medidores de luminosidade em alternativa ao Luxímetro e, conseqüentemente, ao LI-COR LI-1776.

Estes resultados já eram esperados, visto que o componente LDR tem tempo de resposta relativamente lento (ms) e a linearidade e estabilidade com a temperatura são baixas, conforme explicitado na Tabela 3.1.

3.6.2 Protótipo usando o fototransistor

Com o objetivo de validar os três dispositivos fotoelétricos abordados neste trabalho, Moraes e Franco [21] realizaram os mesmos experimentos utilizando o fototransistor inserido em uma configuração divisor de tensão tal qual o ocorrido com o LDR na elaboração do PT1LDR.

Nestes experimentos foi utilizado o fototransistor TIL78 no ramo positivo do divisor de tensão, com uma resistência R de $2K\Omega$ no ramo negativo, conforme ilustrado na Figura 3.43.

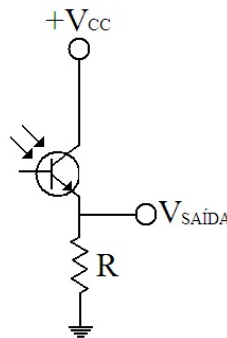


Figura 3.43: Fototransistor na configuração divisor de tensão.

Fonte: [21]

Analisando os resultados obtidos nos experimentos, verificou-se que essa resistência R no ramo negativo do divisor de tensão tem a função de regular o ponto de operação do fototransistor. Se R for muito grande, acima de $3K\Omega$ por exemplo, um pequeno fluxo luminoso que incidir na região fotossensível do fototransistor será suficiente para que este sature, ou seja, o $T_{Digital}$ estabilizará em 5V (tensão de alimentação do circuito).

Caso contrário, se o valor de R for muito pequeno, abaixo de 100Ω , o fototransistor não irá saturar, porém a $T_{Digital}$ do circuito ficará restrita a uma pequena faixa de tensão (próximo a 0V para ausência de luminosidade e 2V para a máxima luminosidade alcançada em laboratório), ou seja, com uma grande variação de luminosidade haverá uma pequena variação da $T_{Digital}$. Essa restrição tornará o sistema instável, pois ocasionará erros no procedimento de conversão desse nível de tensão analógica em uma saída digital.

Utilizando o mesmo procedimento para mensurar os valores de luminosidade, foi levantada a curva da TAL *versus* $T_{Digital}$ do PT1FT, como apresentado na Figura 3.44.

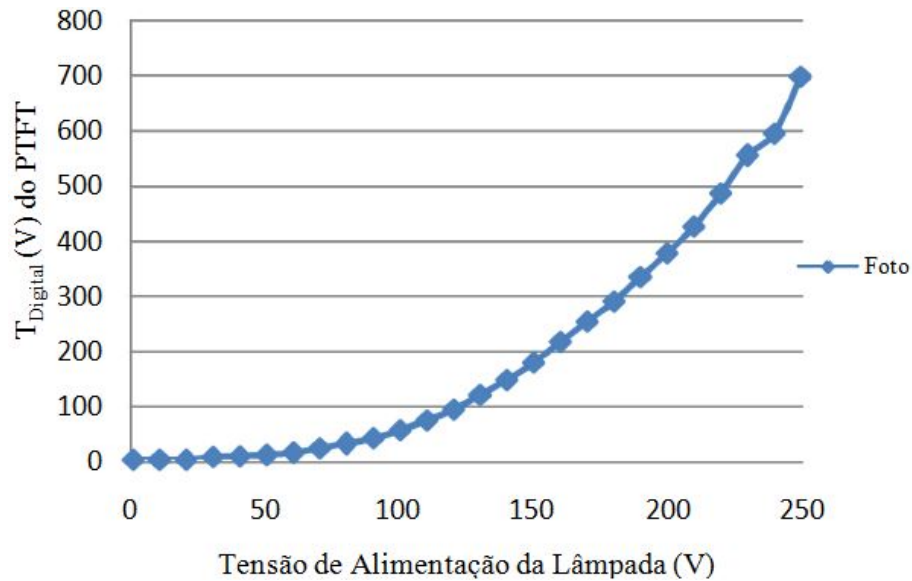


Figura 3.44: $TAL \times T_{Digital}$ do PT1FT.

A resposta comportamental do PT1FT apresentada possui características bem similares às levantadas do Luxímetro e do LI-COR.

Para mostrar este grau de similaridade entre as curvas do PT1FT e do Luxímetro, foram plotadas suas respostas comportamentais em um mesmo gráfico, conforme ilustrado na Figura 3.45.

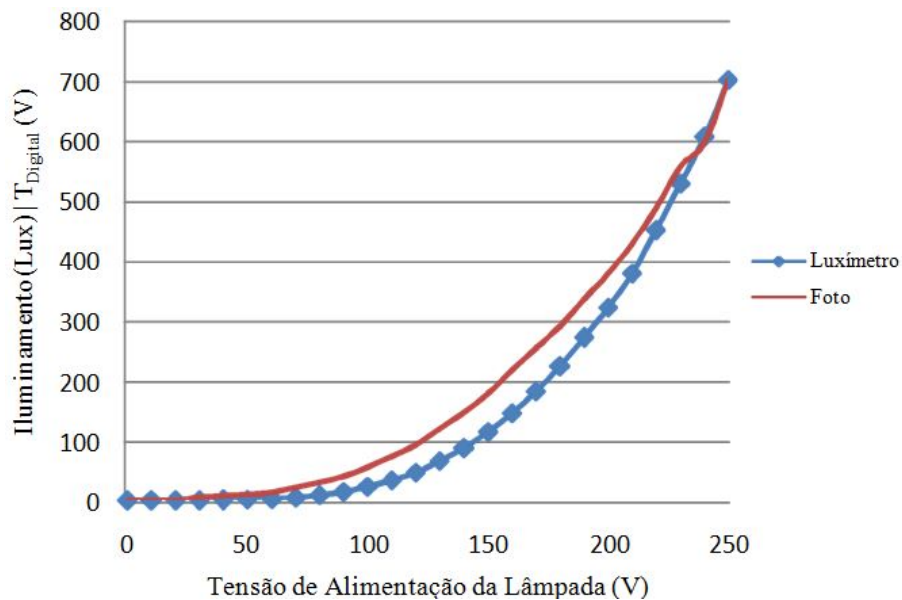


Figura 3.45: $TAL \times \text{iluminamento} | T_{Digital}$.

Analisando as curvas plotadas, nota-se que suas respostas comportamentais são bastante similares ao longo da faixa de funcionamento delimitada pela tensão de alimentação da lâmpada.

Como citado anteriormente, para que fosse possível a visualização das respostas comportamentais em um mesmo gráfico, foi necessário ajustar os valores de saída do

Luxímetro multiplicando-os por uma constante $k = 0.0158427$ de tal forma que o máximo valor de saída do Luxímetro e do PT1FT fossem iguais.

Para verificar o quanto a resposta comportamental do PT1FT possui a mesma característica a resposta obtida com o Luxímetro, foi gerado o gráfico do iluminamento *versus* $T_{Digital}$ do PT1FT, conforme mostra a Figura 3.46.

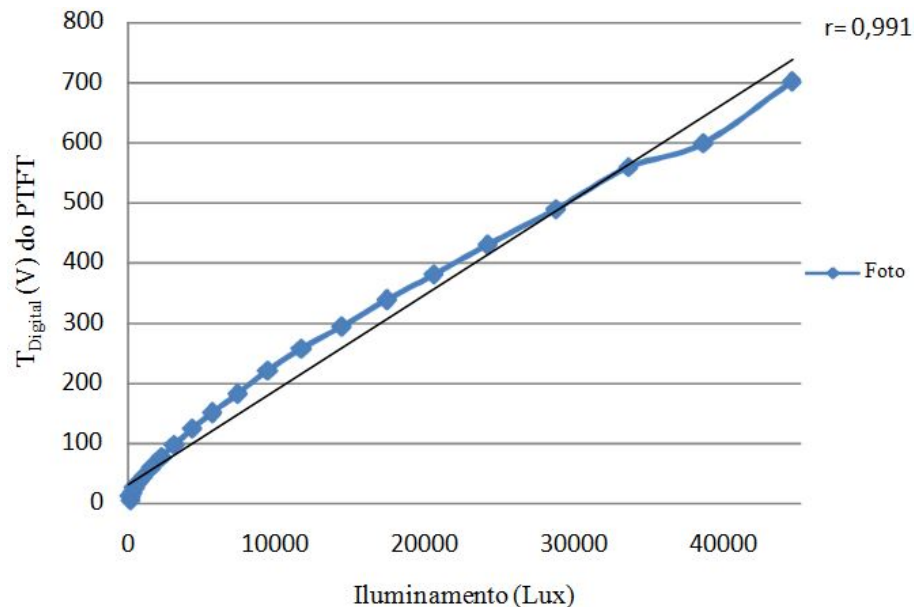


Figura 3.46: Iluminamento $\times T_{Digital}$ do PT1FT.

Fazendo o uso do coeficiente de correlação de Pearson r observa-se que o seu valor indica que a similaridade da resposta comportamental de ambos é de 0.991. Esse resultado demonstra a possibilidade de utilização do fototransistor como elemento sensor de um medidor de luminosidade.

Análise em relação aos valores de referência

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 3.46, o coeficiente de correlação de Pearson é $r = 0.991$. Isto indica que a correlação entre o Luxímetro e o PT1FT é muito forte. Portanto, o PT1FT pode ser utilizado como uma alternativa ao Luxímetro e, conseqüentemente, ao LI-COR LI-1776.

Devido a questões de tempo, Moraes e Franco [21] não construíram o nó sensor utilizando o componente fotoelétrico fototransistor. Neste trabalho, não foi dada continuidade a este trabalho porque um outro componente fotoelétrico, o fotodiodo, mostrou-se mais adequado para a aplicação.

3.6.3 Protótipo usando o fotodiodo

Existe no mercado uma infinidade de fotodiodos, cada qual com suas especificações, tais como: tipo de lente, faixa de comprimento de onda que ele deverá operar, de que material deverá ser composto, entre outros, que facilitam na escolha do tipo mais adequado conforme a aplicação a ser desenvolvida.

De acordo com as pesquisas realizadas, foi escolhido o fotodiodo S7686 para a construção dos dois protótipos descritos nesta seção. Sua escolha baseou-se no fato de ele ser componente integrante do aparelho Luxímetro, que pode ser usado como alternativa ao aparelho LI-COR, modelo LI-1776, como mostrado na Seção 3.5.

Fotodiodo S7686

Para medir a luminosidade foi utilizado o fotodiodo S7686, fabricado pela empresa japonesa Hamamatsu Photonics KK. Este componente possui a sensibilidade próxima ao olho humano e incorpora as seguintes características: resposta espectral análoga à eficiência do espectro luminoso da CIE (Comissão Internacional de L'Eclairage), resposta espectral na faixa de 480 até 660 nm, possui o comportamento de onda do pico de sensibilidade de 550 nm, apresenta encapsulamento em cerâmica para maior confiabilidade, tem uma área ativa de $2.4 \times 2.8\text{mm}$ e resposta de alta velocidade de $0.5 \mu\text{s}$. Mais detalhes em [15]. O Fotodiodo S7686 está ilustrado na Figura 3.47.

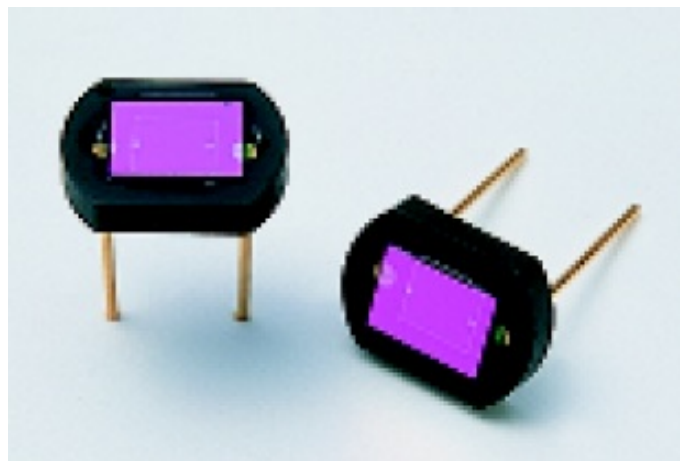


Figura 3.47: Fotodiodo S7686. Fonte: [15].

Apesar do fotodiodo S7686 ser um componente fotoelétrico de custo relativamente baixo, ele possui a dificuldade de ser importado e ter sua venda controlada pela possibilidade do uso em armas.

A Figura 3.48 ilustra uma sugestão, projetada pela Hamamatsu, para a confecção de um Luxímetro, utilizando o fotodiodo S7686.

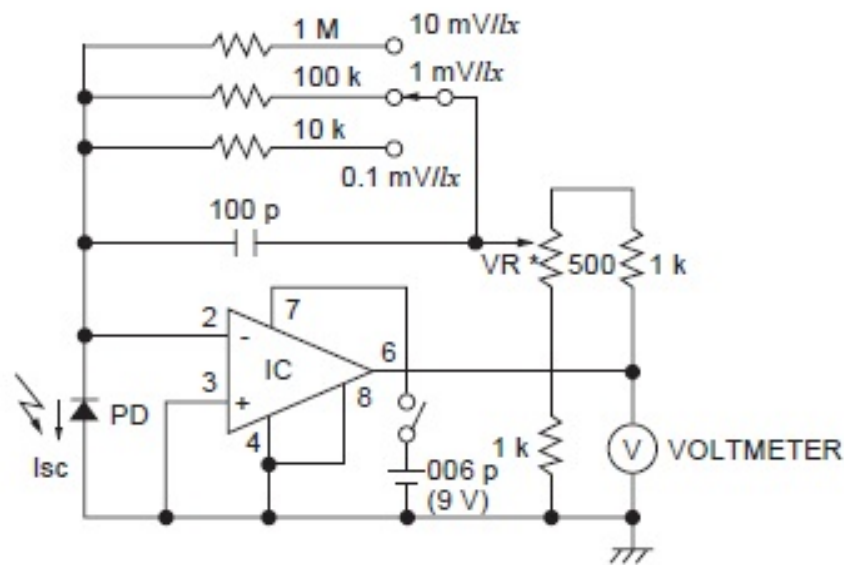


Figura 3.48: Luxímetro utilizando o fotodiodo S7686 da Hamamatsu Photonics. Fonte: [16].

Testes de validação

Primeira etapa: leituras obtidas sem as médias aritméticas para os resistores de 1KΩ e de 10KΩ

Nesta etapa, foram realizados testes com os resistores de escala, com os valores de 1KΩ e de 10KΩ, sem serem efetuadas as médias aritméticas, com objetivo de verificar o comportamento desses resistores através da verificação da ocorrência de instabilidades no recebimento dos dados sem cálculo das médias.

Para comparar a similaridade das curvas foi necessário multiplicar os valores de saída do software por uma constante $k = 217.6829268$, de forma que os valores superiores obtidos fossem iguais. A Figura 3.49 apresenta essa comparação quando o resistor de escala era de 1KΩ.

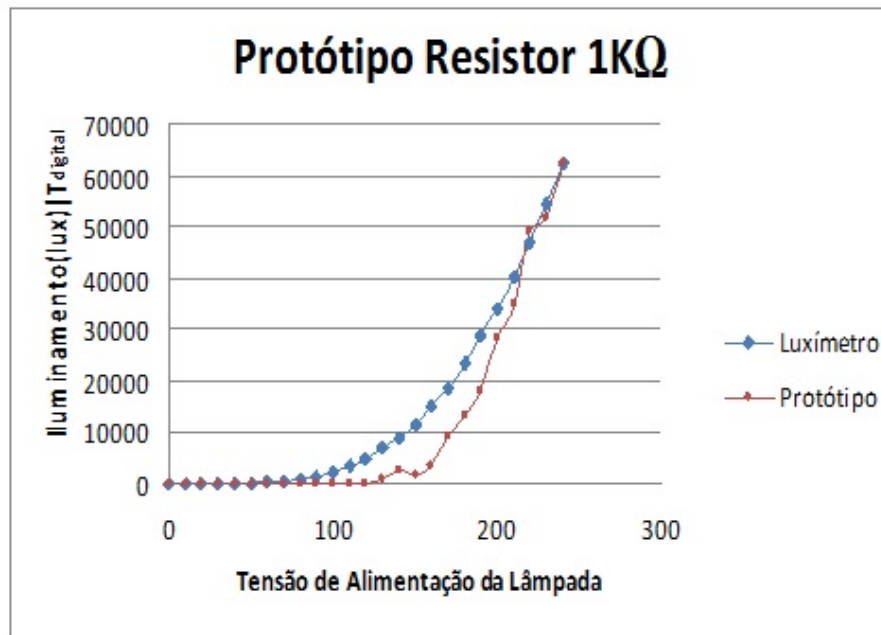


Figura 3.49: $TAL \times \text{iluminamento} \mid T_{Digital}$ com resistor de $1K\Omega$.

Após a captura dos dados, foram plotadas as curvas da TAL *versus* tensão digitalizada do protótipo e a curva da TAL *versus* o resultado do Luxímetro. Para cada valor de resistência do protótipo (escala), foram plotadas as curvas. A Figura 3.50 apresenta o gráfico comparativo entre o Luxímetro e protótipo PT1FD, quando o resistor de escala usado era de $10K\Omega$, onde para igualar os valores saída dos dois equipamentos foi usada a constante $k = 46.61458333$.

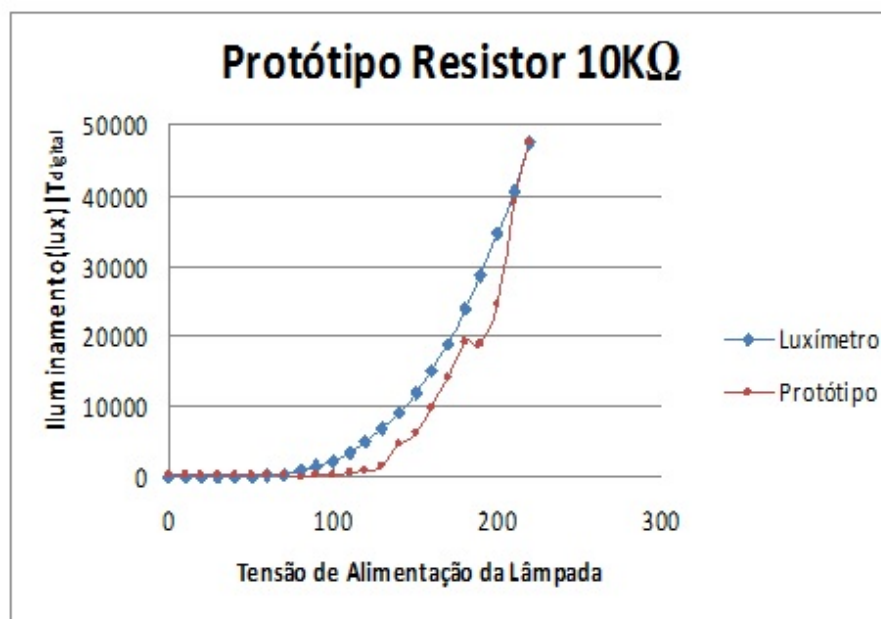


Figura 3.50: $TAL \times \text{iluminamento} \mid T_{Digital}$ com resistor de $10K\Omega$.

Conforme observado nos gráficos, os resultados obtidos nesta etapa de testes fo-

ram semelhantes aos descritos anteriormente. As curvas características do protótipo, tanto para o resistor de $1K\Omega$ quanto o para o resistor de $10K\Omega$, conforme ilustrados nos gráficos 3.50 e 3.49, ao serem comparadas com o Luxímetro, revelaram um comportamento irregular em alguns instantes, demonstrando que os dois equipamentos não possuem comportamentos semelhantes ao desempenharem o mesmo papel, que é o de captar dados da luminosidade do ambiente.

Portanto, conclui-se que, para o protótipo usando o fotodiodo, precisa haver maior eficiência no tratamento dos dados de luminosidade capturados pelo sensor, pois estes não foram considerados satisfatórios.

Segunda etapa: utilização da média das leituras obtidas

Para que o protótipo tenha o comportamento semelhante ao do Luxímetro, e conseqüentemente ao do LI-COR, foi preciso melhorá-lo, pois o desenvolvimento do presente protótipo visava substituir o LI-COR na coleta dados de luminosidade para cálculo de IL no pasto. Dessa forma, foi feito um novo protótipo PT2FD, no qual foi inserido no PT1FD o cálculo da média aritmética no microcontrolador, em uma tentativa de tornar a resposta do dispositivo mais precisa.

Além disso, foram inseridos mais resistores, constituindo-se uma escala, com os valores de $1M\Omega$, $100K\Omega$ e 100Ω (além dos resistores de $10K\Omega$ e $1K\Omega$), visando um ganho na faixa de abrangência da medição de luminosidade do protótipo. Então, o objetivo era permitir que o medidor operasse com maior eficiência tanto para baixa quanto para alta luminosidade.

Após a captura dos dados, como realizado na primeira etapa, foram plotadas as curvas da TAL *versus* tensão digitalizada do protótipo e a curva da TAL *versus* o resultado do Luxímetro. Foram também levantadas as curvas com o coeficiente de correlação linear do protótipo *versus* Luxímetro, para todos os resistores.

Durante os experimentos realizados em laboratório, as mudanças de escalas no referido aparelho ocorriam geralmente nos seguintes intervalos de valores de tensão gerados na lâmpada: 60-70V (era o primeiro a fazer a mudança manual de escala da primeira para a segunda escala), 100-110V (da mesma forma, da segunda para a terceira escala) e 180-190V (idem, da terceira para a quarta escala).

Os testes realizados com os resistores para as mudanças de escalas no protótipo demonstraram que os mesmos atuaram de forma semelhante ao aparelho Luxímetro. Isso ficou evidenciado nas curvas dos resistores de $1M\Omega$, $100K\Omega$ e $10K\Omega$, apresentadas nas Figuras 3.51, 3.53 e 3.55.

Cada um destes resistores fez com que o sensor de luminosidade trabalhasse com até determinada variação de tensão na lâmpada. Os valores foram de 60V, 110V e 210V, respectivamente. Para tensões maiores, ou seja, para luminosidades maiores, ocorreu a saturação do sensor e ele não conseguiu mais obter uma medida precisa dos dados que

estava coletando. Com isso, observou-se que estas resistências são recomendadas para baixas luminosidades.

As Figuras 3.51 e 3.52 apresentam a comparação das curvas características do Luxímetro com o resistor de $1M\Omega$ e a curva gerada entre os aparelhos com o coeficiente de correlação linear, respectivamente.

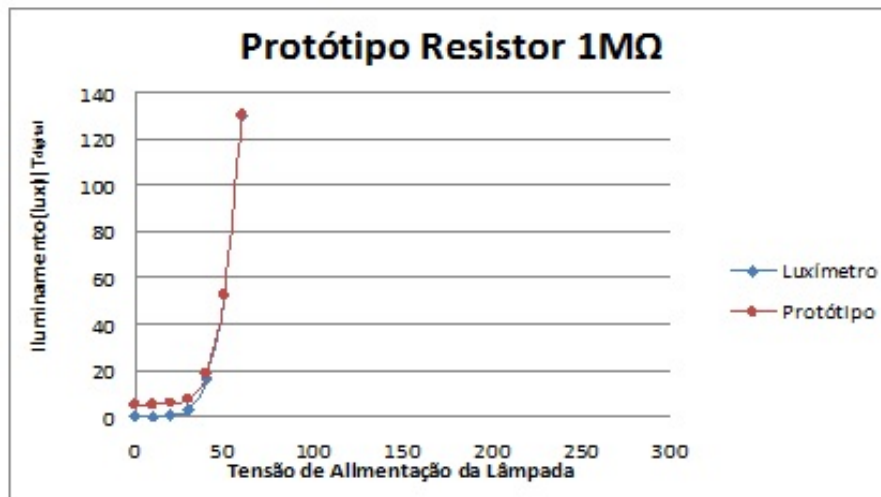


Figura 3.51: Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de $1M\Omega$.

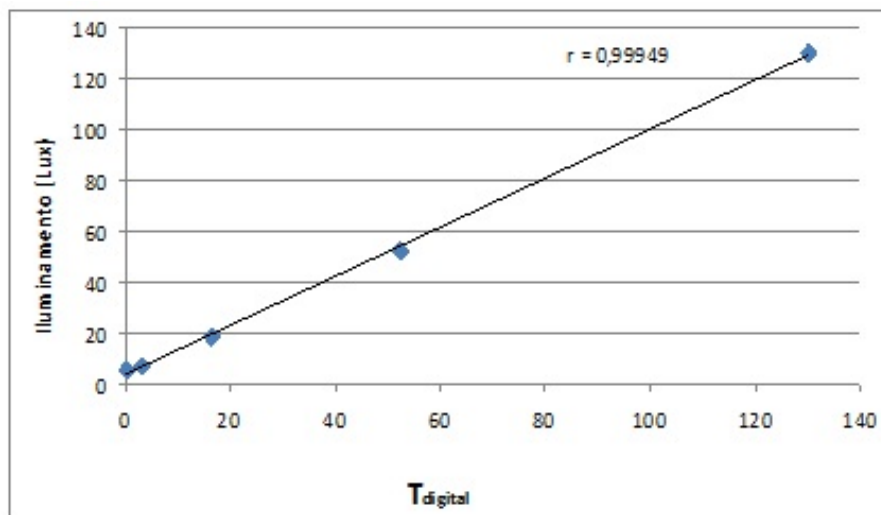


Figura 3.52: Protótipo com resistor de $1M\Omega \times$ Luxímetro.

A curva característica do resistor de $1M\Omega$, Figura 3.51, mostra que o resistor possui uma alta sensibilidade para baixas luminosidades. Nota-se uma pequena diferença quanto aos valores iniciais de iluminamento em relação à curva do Luxímetro, para os mesmos valores de tensão medidos. A partir do valor de tensão igual a 40V, as duas curvas se sobrepõem demonstrando que possuem comportamentos similares para valores maiores.

Essa similaridade pode ser comprovada, observando-se a Figura 3.52, com o valor de r que é bem próximo a 1 (um). Sendo assim, baseando-se no conceito de correlação, pode-se concluir que os equipamentos possuem comportamentos muito semelhantes.

Quanto à diferença para os valores iniciais mostrada na Figura 3.51, acredita-se que os mesmos podem ser descartados, uma vez que, para aplicação a qual o protótipo medidor de luminosidade confeccionado neste trabalho se propõe atender, não se encontrará semelhante situação no pasto. Ou seja, o horário de medição será com sol pleno (por volta de meio dia - conforme especificação do LI-COR - com maior luminosidade). Por mais que, no momento da medição, se tenha um céu nublado e chuvoso e ela seja realizada sob a planta, não alcançará os valores para baixas luminosidades, quanto ao ambiente simulado em laboratório (ambiente totalmente escuro), e apresentado por esses valores.

As Figuras 3.53 e 3.54 apresentam, respectivamente, as curvas características do resistor de $100K\Omega$ comparada como o Luxímetro e o gráfico de correlação linear entre eles. Já as Figuras 3.55 e 3.56 apresentam os mesmos gráficos para o resistor de $10K\Omega$.

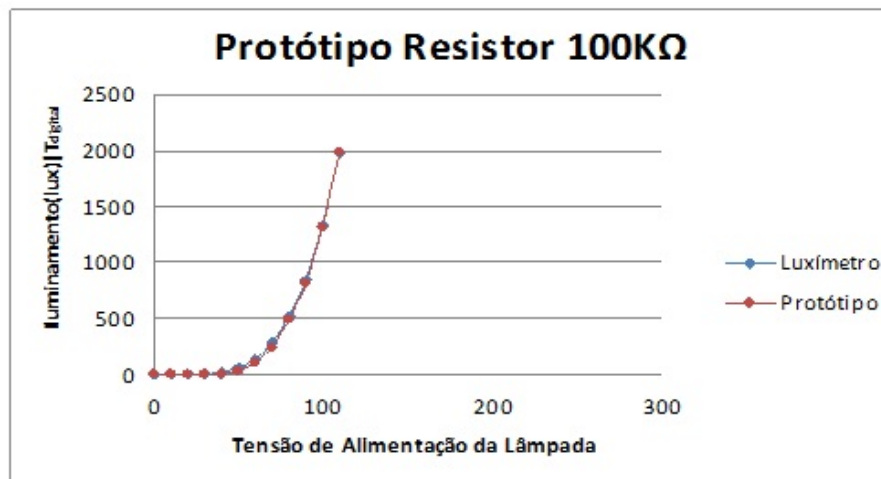


Figura 3.53: Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de $100K\Omega$.

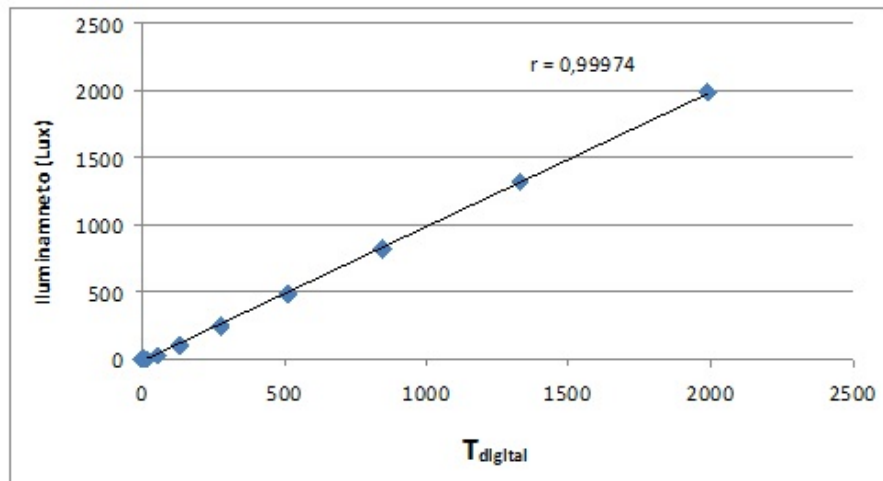


Figura 3.54: Protótipo com resistor de $100K\Omega$ versus Luxímetro.

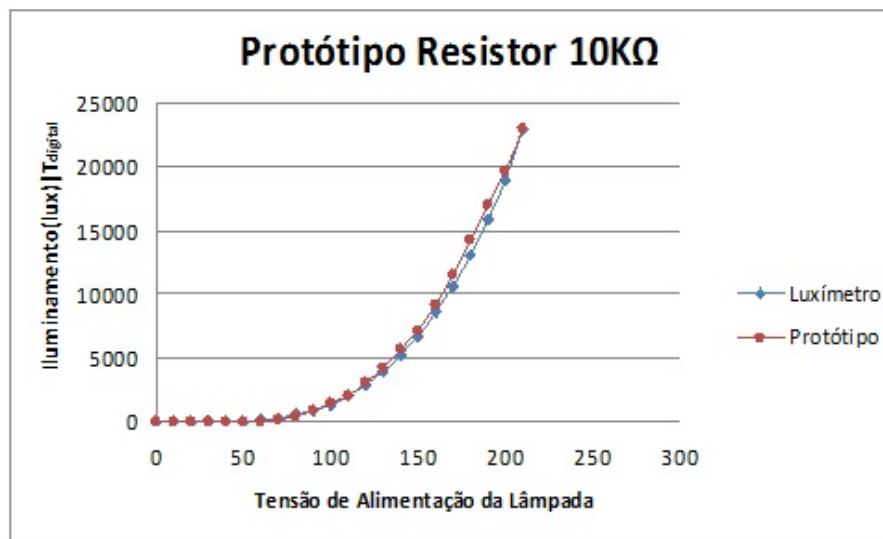


Figura 3.55: Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de $10K\Omega$.

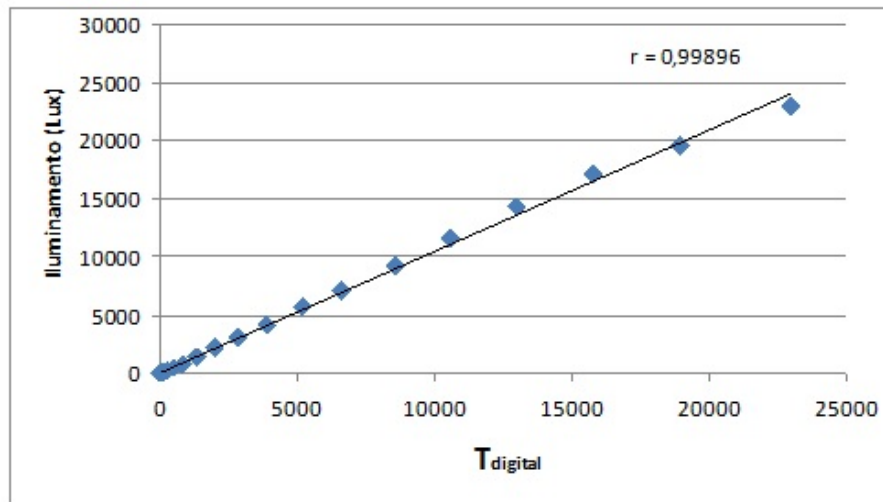


Figura 3.56: Protótipo com resistor de $10K\Omega \times$ Luxímetro.

A Figura 3.55 apresenta uma pequena distorção na curva de $10K\Omega$ em relação à do Luxímetro, enquanto que na Figura 3.53 percebe-se uma uniformidade maior entre as curvas do resistor de $100K\Omega$ em relação ao Luxímetro. Contudo, a similaridade com o Luxímetro, para ambos os resistores, é comprovada pelos respectivos gráficos de correlação linear, pois os valores de r também são bem próximos de 1 (um).

Para os resistores de $1K\Omega$ e 100Ω , de acordo com as Figuras 3.57 e 3.59, o sensor de luminosidade não atingiu seu ponto de saturação com a tensão gerada na lâmpada em 240V, tensão máxima alcançada nestes experimentos. Isto mostra que os mesmos suportam ambientes com luminosidade mais elevada.

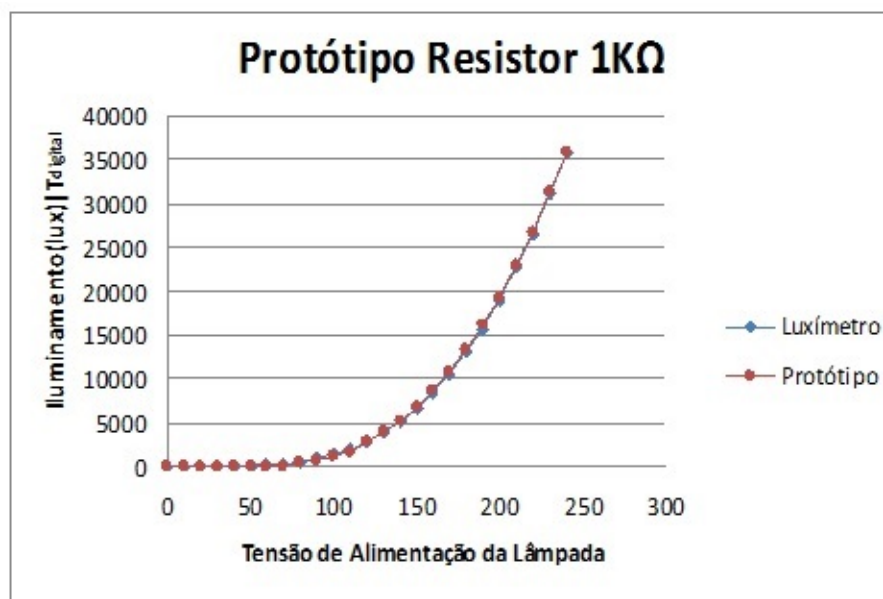


Figura 3.57: Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de $1K\Omega$.

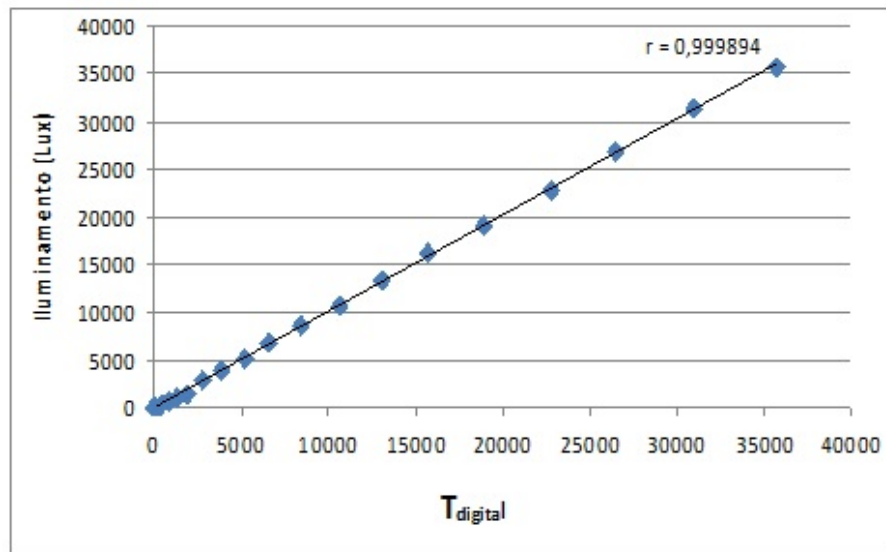


Figura 3.58: Protótipo com resistor de $1K\Omega \times$ Luxímetro.

Quanto aos gráficos de correlação linear dos resistores, mostrados nas Figuras 3.58 e 3.60, constatou-se que os comportamentos das curvas dos aparelhos foram semelhantes ao do Luxímetro, com os valores de r bem próximos a 1 (um).

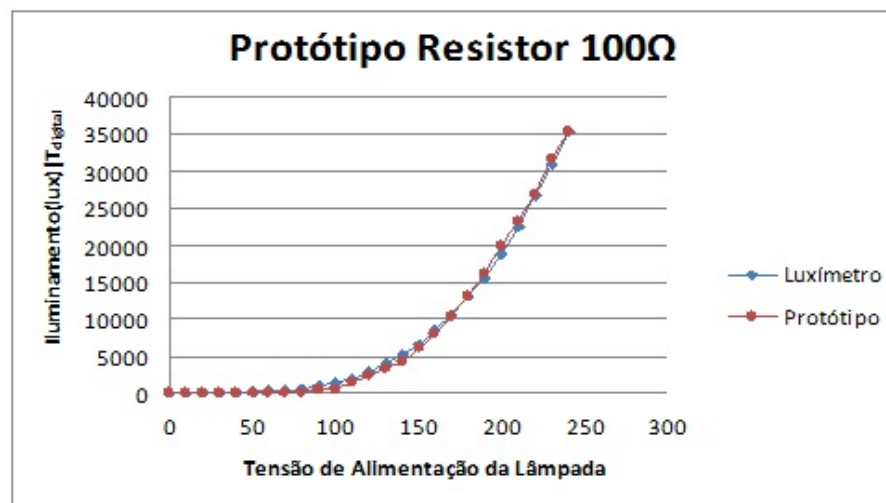


Figura 3.59: Comparação das curvas características do Luxímetro e do protótipo com resistor de 100Ω .

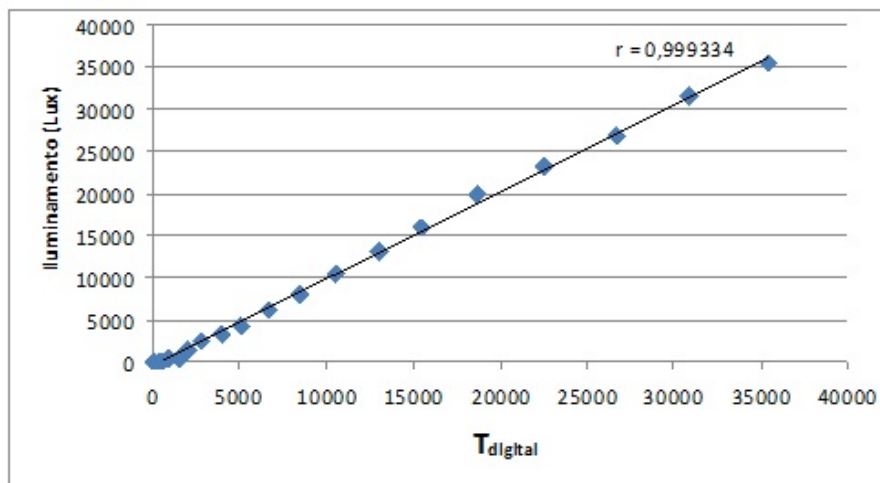


Figura 3.60: Protótipo com resistor de $100\Omega \times$ Luxímetro.

Os comportamentos de todos os resistores avaliados, através do coeficiente de correlação linear, obtiveram uma ótima aproximação do aparelho Luxímetro, corrigindo o problema da instabilidade. Dessa forma, nota-se que esses resistores podem ser utilizados nas escalas que medem desde baixas até altas luminosidades no protótipo proposto.

O resistor de $1M\Omega$, por atuar melhor em condições de baixíssimas luminosidades, fica opcional, em casos de dias nublados ou chuvosos.

Os dados da saída do protótipo foram ajustados, multiplicando-os por uma constante k de modo que o valor máximo de saída do Luxímetro e do protótipo fossem iguais. Os valores k estão descritos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Valores da constante k .

Resistor de escala	Valor de k
$1M\Omega$	2.475124378
$100K\Omega$	6.507537688
$10K\Omega$	46.61458333
$1K\Omega$	217.6829268
100Ω	472.0000000

Terceira etapa: análise dos valores que compõem as médias aritméticas das leituras obtidas

O objetivo dessa etapa é o de analisar os dados que foram calculados nas médias aritméticas da etapa anterior, agrupá-los de dez em dez, vendo os 10 valores, e então analisar um por um, com o intuito de observar a confiabilidade do seu uso nesse projeto.

Nesta etapa, foram realizados testes com o mesmo arranjo experimental da segunda etapa, contudo, sem a implementação do cálculo da média aritmética. Cada dado de luminosidade recebido pelo microcontrolador era transmitido ao computador e armazenado, de forma agrupada, totalizando dez valores para cada valor de tensão gerado

na lâmpada (simulando a fonte de luminosidade, ou seja, o sol) nos testes em laboratório, conforme a atuação dos respectivos resistores de escalas.

Para análise dos dados recebidos foram gerados gráficos Boxplot para todas as resistências testadas, pois estes permitem avaliar a simetria dos dados, sua dispersão e a existência ou não de *outliers*, ou valores discrepantes (que não fazem parte do comportamento esperado do grupo em estudo), sendo especialmente adequado para a comparação de dois ou mais conjuntos de dados correspondentes às categorias de uma variável qualitativa. Nesse tipo de gráfico, quando a distribuição dos dados é simétrica, a linha que representa a mediana estará localizada mais ou menos no centro do retângulo e as duas linhas que partem das extremidades do retângulo terão aproximadamente os mesmos comprimentos.

As Figuras de 3.61 à 3.65 apresentam a distribuição da variável $T_{Digital}$ segundo as categorias da variável TAL (em volts) para as resistências de $1M\Omega$, $100K\Omega$, $10K\Omega$, $1K\Omega$ e 100Ω , respectivamente.

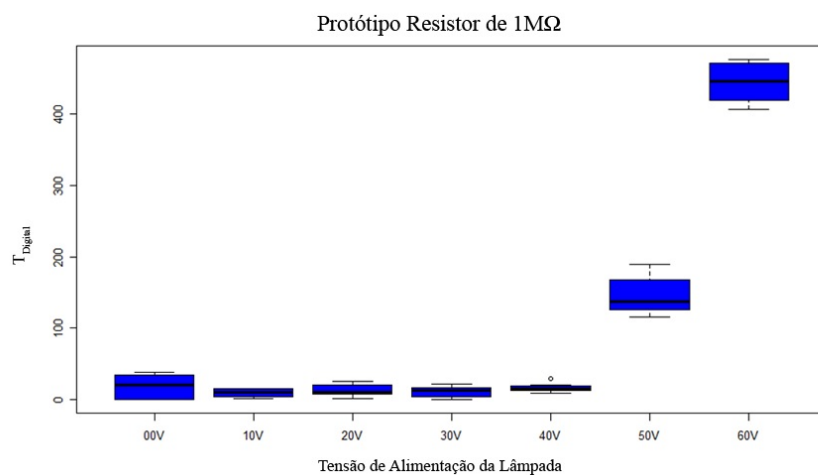


Figura 3.61: Gráfico boxplot protótipo com resistor $1M\Omega$.

Observando o gráfico da Figura 3.61 observa-se uma grande variabilidade nos pontos de 0V, 50V e 60V, os outros pontos apresentam uma pequena variabilidade. No ponto de 40V, é apresentado um valor discrepante.

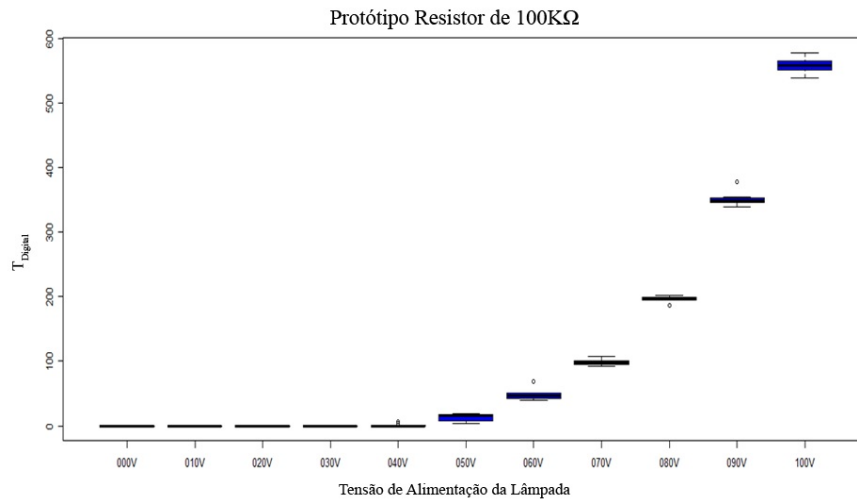


Figura 3.62: Gráfico boxplot protótipo com resistor de 100KΩ.

Já no gráfico da Figura 3.62 observa-se que os pontos em geral possuem uma pequena variabilidade. Porém, ele apresenta alguns valores discrepantes nos pontos de 60V, 80V e 90V. No intervalo de 0 até 40V os valores são zeros, o que significa que o valor de luminosidade é muito pequeno para ser percebido utilizando essa resistência de 100KΩ.

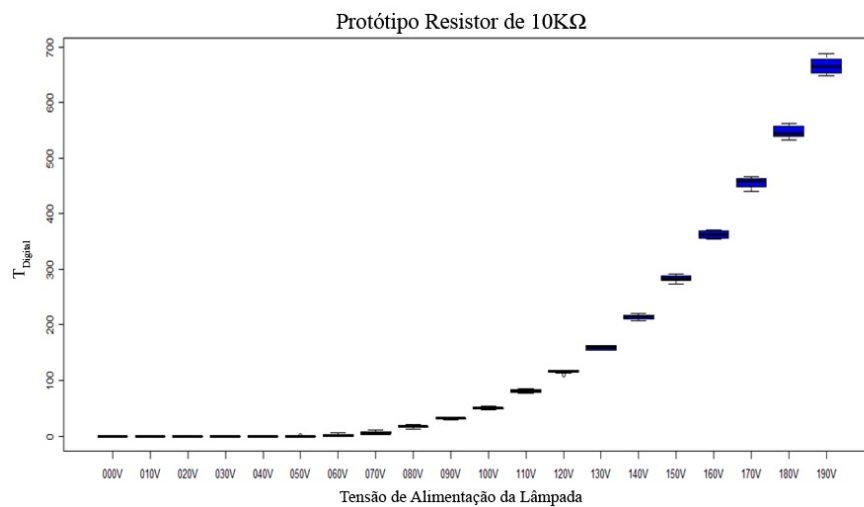


Figura 3.63: Gráfico boxplot protótipo com resistor de 10KΩ.

No gráfico da Figura 3.63 observa-se que o intervalo que o sensor não consegue captar vai de 0 até 70V, apresentando alguns poucos pontos acima de 0V. Quanto à variabilidade dos pontos, ela é pequena em todas as tensões observadas, ocorrendo um pequeno aumento nas últimas tensões (170V, 180V e 190V).

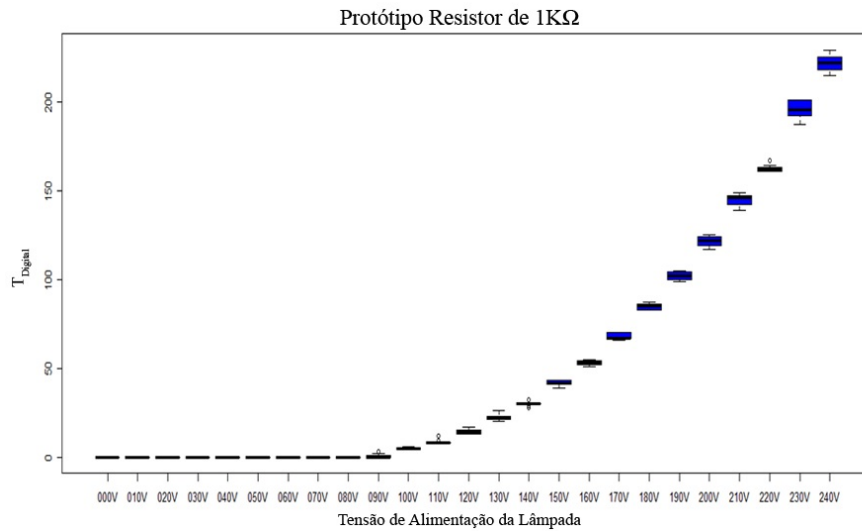


Figura 3.64: Gráfico boxplot protótipo com resistor de 1KΩ.

O gráfico da Figura 3.64 mostra que para a resistência de 1KΩ o sensor consegue captar luminosidade gerada pela lâmpada acima dos 90V, também apresenta alguns valores discrepantes e em geral apresenta variabilidade pequena.

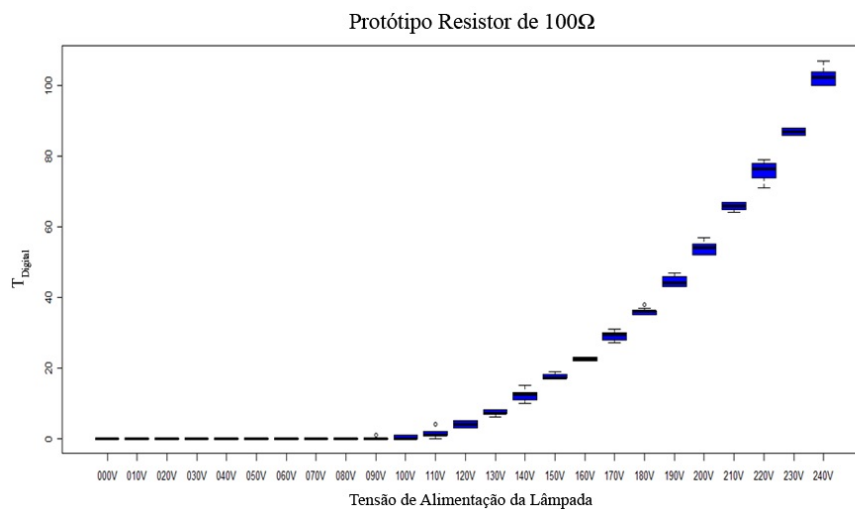


Figura 3.65: Gráfico boxplot protótipo com resistor de 100Ω.

O gráfico da Figura 3.65 é semelhante ao das Figuras 3.64 e 3.63. A variabilidade para esta resistência é um pouco maior, mas não muito significativa.

Desse modo, observou-se que em geral o uso de da média é uma boa estratégia, porque diminui a instabilidade nos dados e não distorce a medida de luminosidade capturada pelo sensor. A variabilidade apresentada no gráfico da Figura 3.61 para o resistor de 1MΩ não é significativa, pois os testes realizados em campo demonstraram que as resistências de 10KΩ e 1KΩ são suficientes para a medida de luminosidade apresentada pela aplicação. Além disso, os resistores de 100KΩ e 100Ω também podem ser utilizados aumentando assim a faixa de operação do sensor.

Análise em relação aos valores de referência

Pode-se observar que os resultados obtidos pelos experimentos com o fotodiodo utilizando os resistores de $1K\Omega$ e $10K\Omega$ não foram tão satisfatórios, pois existiu uma discrepância entre os valores aferidos pelo Luxímetro e pelos protótipos quando a TAL foi de 90–210V. Isto significa que a uma certa luminosidade do dia, os valores seriam divergentes, mesmo que a correlação de Pearson esteja próximo a 1.

Já os protótipos utilizando os resistores de 100Ω , $100K\Omega$ e $1M\Omega$, apresentaram valores muito próximos ao do Luxímetro e poderiam ser utilizados como uma alternativa a este equipamento e, conseqüentemente, ao LI-COR LI-1776.

3.7 Proposta de sensor de baixo custo adequado

Os testes realizados em campo e em laboratório com o aparelho Luxímetro demonstraram que ele pode ser usado como medidor de luminosidade para a realização do cálculo da IL em pastagens, como uma alternativa ao aparelho LI-COR, modelo LI-1776. Entretanto, o foco deste projeto é construir um equipamento medidor de luminosidade com um dos componentes fotoelétricos abordados neste trabalho, visando adaptá-lo posteriormente a fim de se construir nós sensores e aplicá-los em uma RSSF, para automatizar assim o processo de monitoramento da IL em pastagens.

Os experimentos realizados em laboratório com o LDR utilizando as configurações divisor de tensão e amplificador logarítmico não apresentaram resultados satisfatórios, pois a máxima correlação obtida foi de 0.854. Porém, este componente pode ser usado em outras configurações a fim de se conseguir melhorar a similaridade de sua resposta em relação ao Luxímetro. Infelizmente, isso acarretaria aumento no custo de produção dos protótipos, sendo assim, descartada esta possibilidade, uma vez que o propósito deste trabalho é o de construir equipamentos medidores de baixo custo.

Já o resultado do protótipo utilizando o fototransistor foi considerado satisfatório, pois o mesmo apresentou uma similaridade de 0.991 com o Luxímetro, nos experimentos realizados em laboratório. Portanto, há a necessidade de realização dos testes em campo com esse protótipo para comprovar esta similaridade e validá-lo em relação ao LI-COR, modelo LI-1776.

O modelo de rede implementado é simples e fácil de configurar, porém necessita de mais testes *in loco* e pesquisas para comprovar sua eficácia para automatização do processo de monitoramento de IL em pastagens.

Diante das versões apresentadas para os protótipos usando fotodiodo, o PT2FD se mostrou mais adequado para implementação da rede. Esta versão foi construída de

forma modular, a qual possibilita o melhoramento de uma unidade sem afetar as outras, caso essas melhorias não afetarem a interligação das unidades envolvidas.

O custo estimado para produção do PT2FD é de R\$600,00, distribuídos da seguinte forma:

- R\$116,58 do TLC271P, produto importado;
- R\$130,00 do fotodiodo S7686, produto importado;
- R\$119,90 do módulo XBee, disponível no Brasil;
- R\$149,90 do PIC18F1320; e
- R\$83,62 dos demais componentes eletrônicos.

Tendo em vista que o medidor de luminosidade LI-COR LI-1776, utilizado atualmente para as medições feitas pela EMBRAPA, tem custo aproximado de R\$50.000,00 e o PT2FD tem custo aproximado de R\$600,00, tem-se que o valor da construção do protótipo sugerido corresponde a 1,2% do valor gasto atualmente. Em relação ao LI-COR LAI2200C, sucessor do LI-1776, o protótipo corresponde a 2% do valor gasto para adquiri-lo.

Deve-se observar que o custo estimado para a produção do protótipo PT2FD deve ser ainda menor caso ele seja construído em uma escala comercial.

Diante dos dados apresentados, tem-se que o PT2FD é uma proposta de sensor de luminosidade de baixo custo que alcança os objetivos esperados, podendo ser utilizado até por pequenos produtores, que não tinham condições financeiras para utilizar os medidores de alto custo existentes no mercado.

3.8 Considerações finais

Neste capítulo, foi apresentado um estudo sobre os sensores de luminosidade, mostrando uma comparação entre eles.

Posteriormente, foram detalhados os testes em laboratório que validam o Luxímetro como medidor de luminosidade alternativo ao LI-COR.

Em seguida, foram apresentados e analisados os três protótipos construídos por Moraes e Franco [21], sendo dois utilizando o LDR e um utilizando o fototransistor. Estes protótipos não apresentaram resultados satisfatórios e por isso os autores não construíram os nós sensores correspondentes.

Finalmente, foi apresentada a construção do protótipo de medidor adequado que utiliza o fotodiodo S7686, é de baixo custo e conseguiu alcançar os objetivos esperados.

RSSF PARA MONITORAMENTO DE LUMINOSIDADE NA AP

Neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos referentes a Rede de Sensor Sem Fio (RSSF) e também serão descritos os componentes da rede proposta e apresentados os protótipos de nós sensores construídos.

O equipamento será utilizado, principalmente, no período chuvoso, em que o pasto cresce bastante.

4.1 Definição de RSSF

Uma Rede de Sensor Sem Fio (RSSF) é uma rede que tem por objetivo monitorar algum fenômeno – como temperatura, umidade, pressão, dentre outras. Geralmente, é utilizada com intuito de monitorar ou gerenciar áreas de difícil acesso, tais como plantações, oceanos, desertos, florestas, áreas industriais, etc. No caso deste trabalho, é uma rede que monitora a interceptação luminosa em pastagens.

Nesta seção, serão apresentados as características, aplicações, tratamentos dos dados, processamento, requisitos de CPU e memória, transmissão de dados, fonte de energia e arquitetura da rede de uma RSSF.

4.1.1 Características de uma RSSF

Basicamente, uma RSSF é constituída por elementos chamados nós. Os elementos são implementados com multifuncionalidades e dotados, ou não, de placa de sensoriamento.

Os nós possuem capacidade de coletar e processar dados e a parte de comunicação sem fio. Cada nó sensor pode estabelecer uma comunicação origem e destino, também podendo ser uma comunicação multissaltos, ou seja, utilizando um nó intermediário para realizar a comunicação da origem com o destino.

Segundo Puccinelli e Haenggi [23], altas taxas de amostragem de sensores digitais modernas normalmente não são necessárias em redes de sensores. A eficiência energética de sensores e seu tempo de ligamento e desligamento são muito mais importantes.

Problemas adicionais são o tamanho físico do hardware de detecção, a fabricação, a montagem e a compatibilidade com outros componentes do sistema. Usar um microcontrolador com um comparador analógico é uma técnica de economia de energia que permite que o nó evite valores de amostragem que não se enquadrem em um determinado intervalo [23].

Todas as redes de comunicação sem fio possuem uma característica crucial, as falhas na comunicação entre seus elementos, interferindo diretamente nas informações geradas pela rede.

Algumas características cruciais de uma RSSF são: restrições de hardware e software, tolerância a falhas de comunicação entre os elementos, topologia de rede dinâmica, alta densidade de nós, perda de elementos da rede e realização de tarefas colaborativas pelos nós.

Os nós sensores tipicamente são compostos por um terminal de comunicação sem fio, unidade de energia e dispositivo sensor, além de possuir algumas características como tamanho portátil, limitação de capacidade de processamento e armazenamento, comunicação sem fio, limitação de energia e multifuncionalidades.

Segundo Puccinelli e Haenggi [23], o número de nós sensores em uma rede de sensores típica é muito mais elevada do que em uma típica rede ad hoc, em que os nós se auto-organizam em uma topologia de rede dinâmica. Para garantir a cobertura e conectividade, deve-se usar uma quantidade maior de nós sensores e, por esta razão, o hardware utilizado na rede de sensores deve ser barato.

Os nós sensores têm tipicamente rigorosas limitações de energia, que os tornam mais sujeito a falhas. Segundo Puccinelli e Haenggi [23], idealmente, o hardware de rede de sensores deve ser eficiente em termos de energia, pequeno, barato e confiável, para maximizar a vida útil da rede, aumentar a flexibilidade, facilitar o recolhimento de dados e minimizar a necessidade de manutenção.

O funcionamento satisfatório de uma RSSF depende de vários fatores, podemos citar o tráfego dos dados como uma característica crucial para funcionamento, ou seja, recebimento dos dados capturados pelos nós sensores no concentrador da rede.

4.1.2 Aplicações de uma RSSF

As RSSF são utilizadas em ambientes hostis como florestas, vulcões, gasodutos, entre outros. Há aplicação de RSSF nas áreas militares, comerciais, científicas e industriais.

Na maioria, as RSSF em suas aplicações são encontradas com grande quantidade de nós e os recursos dos seus elementos são limitados conforme suas características tecnológicas.

Segundo Puccinelli e Haenggi [23], existem possíveis aplicações para rede de sensores nos mais diversos campos, como monitoramento de ambientes, guerra, educação de crianças, vigilância, micro cirurgias, agricultura, dentre outras. Redes de sensores também podem ser usados para monitorar e estudar os fenômenos naturais que intrinsecamente desencorajam presença humana, tais como furacões e incêndios florestais.

A pesquisa médica e de saúde podem se beneficiar muito a partir de redes de sensores: monitoramento de sinais vitais e reconhecimento de acidente são as aplicações mais naturais.

Uma aplicação interessante para a engenharia civil é a ideia de Edifícios Inteligentes: a rede de sensores e atuadores sem fio integrada dentro dos edifícios poderia permitir monitoramento e controle distribuídos, melhorando as condições de vida e reduzindo o consumo de energia, por exemplo, controlando temperatura e fluxo de ar.

4.1.3 Tratamento de dados em uma RSSF

Segundo Puccinelli e Haenggi [23], a rede de sensores deve ser capaz de proteger a si mesmo e seus dados contra ataques externos, mas as limitações graves de hardware de baixo nível do nó sensor podem tornar a segurança um verdadeiro desafio.

Esquemas de criptografia típicos, por exemplo, exigem grandes quantidades de memória que não estão disponíveis nos nós sensores. A confidencialidade dos dados deve ser preservada por meio da criptografia de dados com uma chave secreta compartilhada com o receptor pretendido.

A integridade dos dados deve ser assegurada para evitar a alteração de dados não autorizada. Uma transmissão autenticada deve permitir a verificação da legitimidade das e os seus dados de remetente.

Em uma série de aplicações comerciais, um grave desserviço para o usuário de uma rede de sensores é comprometer a disponibilidade de dados (negação de serviço), que pode ser alcançado através da tortura da privação do sono: as baterias podem ser drenadas por serviço contínuo de solicitações ou exigências para as tarefas legítimas, mas intensivo, impedindo que o nó de entrar no modo de sono.

Para garantir a confiabilidade dos dados e funcionamento da rede é necessário utilização do gerenciamento da RSSF, sendo definido conforme sua aplicação e operação. Em aplicação agrícola, devido às condições de instalação deste ambiente, muitas vezes

não permitindo a movimentação dos seus elementos, são utilizadas as abordagens Requisição/Resposta (RR) e Notificação de Eventos [32].

4.1.4 Comunicação em uma RSSF

Segundo Puccinelli e Haenggi [23], a maioria das redes de sensores usam comunicação por rádio, mesmo sabendo que existem soluções alternativas oferecidas por laser e infravermelho. Quase todas as plataformas de radiocomunicações utilizam componentes COTS (Commercial Off-The-Shelf). As escolhas populares incluem o TR1000 de RFM (utilizado no MICA *notes*) de CC1000 e o Chipcon (escolhido para a plataforma MICA2). Soluções mais recentes usam padrões da indústria como IEEE 802.15.4 (MICAz e Telos *notes* com CC2420 de Chipcon) ou pseudo-padrões, como Bluetooth. Normalmente, as faixas de potência de transmissão entre -25 dBm (potência em decibéis) e 10 dBm, enquanto que a sensibilidade do receptor pode ser tão boa como -110 dBm.

Rádios com taxa de bits relativamente baixa (até 100kbps) são vantajosas em termos de consumo de energia. Na maioria das redes de sensores, as altas taxas de dados não são necessários, embora elas permitam tempos de produção mais curtos assim permitindo ciclos mais baixos e alívio na contenção do canal de acesso. É também desejável para um rádio que ele mude rapidamente de um modo de suspensão ou sono para um modo de funcionamento [23].

Transceptores ópticos, tais como lasers, oferecem uma forte vantagem de poder, principalmente devido à sua alta direcionalidade e o fato de que apenas é necessário o processamento de banda base. Além disso, a segurança é intrinsecamente garantida (sinais interceptados são alterados). No entanto, a necessidade de uma linha de visão e localização precisa torna essa opção inviável para a maioria das aplicações [23], como para o trabalho em questão.

A abordagem de gerenciamento RR foi escolhida, baseado em estudos comprovando as vantagens em relação às outras existentes e aplicáveis em agricultura segundo Silva [32]. Na abordagem RR, quando ocorre perda de uma resposta o gerente poderá agir após identificar o motivo da perda. A principal desvantagem dessa abordagem é o grande volume de dados no momento da requisição/resposta dos elementos próximos aos gerentes, ocorrendo aumento dos pacotes que transitam na rede, aumento de processos nos elementos, perda de dados e causando maior consumo de energia e utilização da largura da banda.

4.1.5 Processamento de uma RSSF

Apesar de FPGAs (dispositivos semicondutores largamente utilizados para o processamento de informações digitais) de baixa potência se tornarem uma opção viável

em um futuro próximo, microcontroladores (MCUs) são agora a principal escolha para o processamento em nós sensores. A métrica fundamental na seleção de um MCU é o consumo de energia. O modo de suspensão ou sono merece atenção especial, como em muitas aplicações ciclos baixos são essenciais para a extensão da vida. Assim como no caso do módulo de rádio, o tempo de despertar rápido é importante [23].

4.1.6 Requisitos de CPU e memória de uma RSSF

A maioria das CPUs utilizadas em nós sensores de baixo nível têm velocidades de clock de poucos MHz. Os requisitos de memória dependem da aplicação e da topologia da rede: o armazenamento de dados não é crítica, se os dados são frequentemente transmitidos a uma estação base, como é o caso da RSSF tratada neste trabalho. Plataformas mais sofisticadas, como a Intel iMote e nós Rockwell WINS, usam processadores de 32 bits da Intel StrongArm / XScale [23].

4.1.7 Transmissão de dados

Segundo Puccinelli e Haenggi [23], é comum que todos os dados sejam transmitidos para uma estação de base, mas esta forma de coleta de dados centralizado pode encurtar a vida útil da rede. Os dados enviados para um nó intermediário faz com que os padrões de consumo de energia sejam não-uniformes, o que pode sobrecarregá-lo. Isto é particularmente severo em nós intermediários que se ligam às estações base, o que pode acumular o tráfego proveniente de todos os outros nós, formando assim um ponto crítico para o rendimento da rede.

Uma técnica interessante é o agrupamento: um conjunto de nós formam *clusters* e transmitem suas informações para o nó *cluster head*, que funde os dados e os envia para um sorvedouro. Menos pacotes são transmitidos e um padrão de consumo de energia uniforme pode ser conseguido por periódica reaglomeração. A redundância de dados é minimizada, já que o processo de agregação combina medições fortemente correlacionados.

Muitas aplicações exigem que as consultas sejam enviadas para os nós de detecção. Isso é verdade, por exemplo, sempre que o objetivo é recolher dados sobre uma determinada área, onde vários sensores foram implantados. Esta é a lógica pela qual trata-se uma rede de sensores como um banco de dados [23]. A RSSF proposta neste trabalho não utilizará *clusters* e sim nós sensores, que se comunicam diretamente com a estação base, em uma topologia estrela.

A transmissão de dados pode ser feita através de RF, 3G, bluetooth, dentre outras tecnologias. A seguir, será apresentada uma opção de transmissão de dados RF, que foi utilizada neste trabalho.

Módulos XBee

Os módulos XBee são fabricados pela Digi International, que é uma empresa membro da Aliança ZigBee a qual desenvolve produtos e tecnologias para conectar e gerenciar dispositivos eletrônicos locais ou remotos sobre uma rede sem fio ou pela internet.

XBee é uma família de módulos compactos que implementam a pilha de protocolos 802.15.4/ZigBee para fornecer conectividade sem fio para aplicações que exigem baixo consumo de bateria, baixo custo, baixa taxa de transferência de dados e alta confiabilidade na transmissão de dados. Além disso, estes módulos já vêm de fábrica prontos para se conectarem e se comunicarem sem fio.

Há duas versões disponíveis para os módulos XBee: XBee e XBee Pro, sendo que a única diferença entre eles reside na potência máxima de transmissão: 1mW para o módulo XBee e 63mW para o módulo XBee-PRO. Os dois tipos de módulos operam dentro de uma frequência ISM 2.4 GHz e são compatíveis pino-a-pino. Estes módulos estão ilustrados na Figura 4.1.



Figura 4.1: Módulos XBee e XBee Pro serie 1 e serie 2 [42],[43].
Fontes: [16].

Uma das grandes vantagens dos módulos XBee é a facilidade de uso e configuração. A sintaxe para a configuração é através de comandos semelhantes aos comandos AT (*Attention*), utilizados em modems antigos. Os módulos da série 1 implementam somente o padrão definido pelo IEEE 802.15.4. Este padrão especifica as camadas MAC e PHY e abordam apenas duas topologias de rede: ponto-a-ponto e ponto-a-multiponto ou estrela.

Os módulos da série 2 implementam toda a pilha de protocolo ZigBee. Eles foram projetados para suportar, além das topologias da série 1, a topologia *mesh*. Outras funcionalidades importantes desta série é a possibilidade de haver repetidores na rede, tal como roteador, e a capacidade de configuração dos dispositivos para que permaneçam em estado de inatividade, ou dormindo (*sleep*), por longos períodos enquanto a série 1 não suporta roteamento e o seu período máximo de inatividade é de 268 segundos.

Os módulos XBee podem operar em uma rede de duas formas:

- **Modo transparente:** quando operando no modo transparente, o módulo atua como um substituto de uma linha de transmissão serial. Todos os dados recebidos no pino de entrada (DIN) são empilhados para serem transmitidos via RF. Quando os dados são recebidos via RF, são imediatamente enviados para o pino de saída serial (DOUT). Este modo é o mais simples para se trabalhar, pois envolve menos dados de endereçamento e pouca preocupação com a interpretação de pacotes.
- **Modo API:** é uma alternativa ao modo transparente. Neste, as informações são transmitidas em pacotes que interagem com as funções de rede do módulo, permitindo uma iteração maior com a rede. O modo API facilita muitas operações, tais como: informações podem ser enviadas para múltiplos destinos sem a necessidade de alterar parâmetros; recebimento de sucesso/falha para cada pacote recebido; identificação do endereço de origem de cada pacote.

Utilizando o protocolo de rede Zigbee, as RSSF podem ser configuradas em diversas topologias diferentes, cada uma com seu próprio conjunto de desafios, vantagens e desvantagens.

Na configuração de topologia estrela, todos os nós comunicam-se diretamente com o ponto de acesso, não havendo nenhum tipo de comunicação entre eles. Neste tipo de topologia, a área de cobertura fica limitada ao alcance de comunicação dos nós (*nodes*), e obstáculos pode impedir a comunicação em alguns pontos da rede.

Nesse trabalho, foi utilizado o módulo XBee Pro, série 1, na comunicação da rede sem fio e topologia estrela.

O software X-CTU

A empresa Digi disponibiliza gratuitamente, em seu site, um software denominado X-CTU desenvolvido para a plataforma Windows, que visa facilitar a comunicação e teste com os módulos XBee, bem como a configuração dos seus parâmetros.

O X-CTU é compatível com as seguintes versões do Windows: 98, 2K, Me e XP. As principais características da interface X-CTU são:

- é suportada por todos dispositivos XBee;
- é fácil de usar;
- possui um terminal integrado;
- mostra na forma de gráfico o RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*);
- detecta automaticamente o tipo do módulo;
- mostra cada parâmetro de configuração do módulo; e
- permite atualização do firmware.

A Figura 4.2 ilustra a interface do software X-CTU.

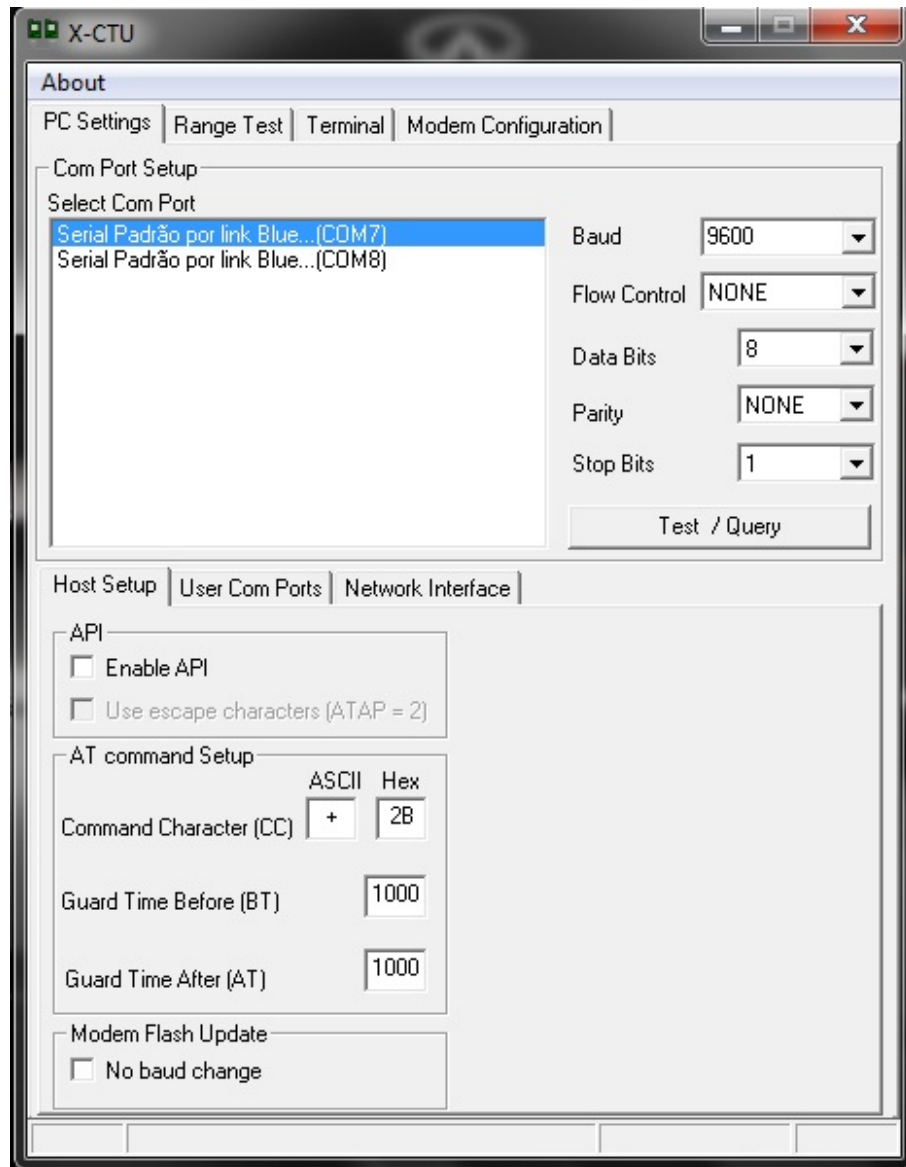


Figura 4.2: Interface do software XCTU.

4.1.8 Fonte de energia

A grande maioria das plataformas comerciais e de pesquisa existentes depende de baterias, que dominam o tamanho do nó sensor. Baterias primárias (não-recarregáveis) muitas vezes são escolhidas, principalmente AA, AAA e tipo de moeda.

As pilhas alcalinas AAA oferecem uma elevada densidade de energia a um preço baixo, compensada por uma descarga não-plana, de um tamanho físico grande em relação a um nó sensor característico e uma vida útil de apenas 5 anos. A regulação da tensão poderia, a princípio, ser empregada, mas a sua elevada ineficácia e grandes consumo de corrente de repouso para o uso de componentes que podem lidar com grandes variações na tensão de alimentação os tornam impraticáveis. Células de lítio são muito compactos e possuem uma curva de descarga plana.

As baterias secundárias (recarregáveis) tipicamente não são desejáveis, uma vez que oferecem uma menor densidade de energia e um custo mais elevado, sem mencionar o fato de que na maioria das aplicações a recarga não é uma tarefa prática.

Segundo Puccinelli e Haenggi [23], usar a energia armazenada ou captar a energia do mundo exterior são as duas opções para o módulo de potência. O armazenamento de energia pode ser conseguido com o uso de baterias ou dispositivos alternativos, tais como células de combustível ou motores de calor miniaturizados, em que as possibilidades de eliminação de energia são fornecidos pela energia solar, de vibrações, ruído acústico, e os efeitos piezoelétricos.

As células de combustível são dispositivos de conversão de energia eletroquímica recarregáveis onde eletricidade e calor são produzidos, enquanto que o hidrogênio é fornecido para reagir com o oxigênio. A poluição é mínima, porque a água é o principal subproduto da reação. O potencial de células de combustível para o armazenamento e poder de entrega da energia é muito mais elevado do que o das tecnologias tradicionais de bateria, mas o fato de que eles requerem hidrogênio complica a sua aplicação. A utilização de energias e técnicas renováveis são uma alternativa interessante.

Segundo Puccinelli e Haenggi [23], o tempo de vida é extremamente crítico para a maioria das aplicações e o principal fator limitante é o consumo de energia dos nós, que precisam de ser auto alimentados. Embora geralmente assume-se que a potência de transmissão associado com a transmissão de pacotes tenha grande consumo de energia, sensores, processamento de sinais e até mesmo a operação do hardware em modo *standby* (repouso) consomem uma consistente quantidade de energia. Em algumas aplicações, energia extra é necessária para atuação em macro-escala.

Muitos pesquisadores sugerem que o consumo de energia poderia ser reduzido, considerando as interdependências existentes entre as camadas individuais na pilha de protocolo de rede. “Protocolos de roteamento e acesso a canais, por exemplo, poderiam se beneficiar muito em uma troca de informação com a camada física. Na camada física, os benefícios podem ser obtidos com menores ciclos de rádio e dimensionamento de modulação dinâmica (variando o tamanho da constelação para minimizar o consumo de energia)”. Puccinelli e Haenggi [23].

Usar o modo de baixa potência para o processador ou desativar o rádio é geralmente vantajoso, embora transformá-lo em um subsistema ligado e desligado pode ser mais caro do que mantê-lo sempre ligado. Técnicas destinadas a reduzir a corrente de fuga do modo ocioso em processadores baseados em CMOS (semicondutor metal-óxido complementar empregado na fabricação de circuitos integrados) também são interessantes.

Segundo Puccinelli e Haenggi [23], soluções de controle de acesso ao meio (MAC) têm um impacto direto sobre o consumo de energia, como algumas das principais

causas de desperdício de energia são encontradas na camada MAC: colisões, controle de sobrecarga de pacotes e escuta ociosa. Economia de energia e técnicas de controle de erro não são fáceis de implementar, devido à alta quantidade de poder computacional que necessitam e ao fato de que os pacotes longos normalmente não são práticos.

Roteamento de eficiência energética deve evitar a perda de um nó devido ao esgotamento da bateria. Muitos protocolos propostos tendem a minimizar o consumo de energia em vias de roteamento, mas se alguns nós estiverem localizados na maioria dos caminhos de roteamento (por exemplo, perto da estação base), o seu tempo de vida será reduzido.

4.1.9 Arquitetura da rede

Para automatizar o processo de IL em pastagens utilizando RSSF foram desenvolvidos os seguintes componentes: nós sensores, estação base e software monitor. O esquema da arquitetura da rede de sensores está ilustrado na Figura 4.3.

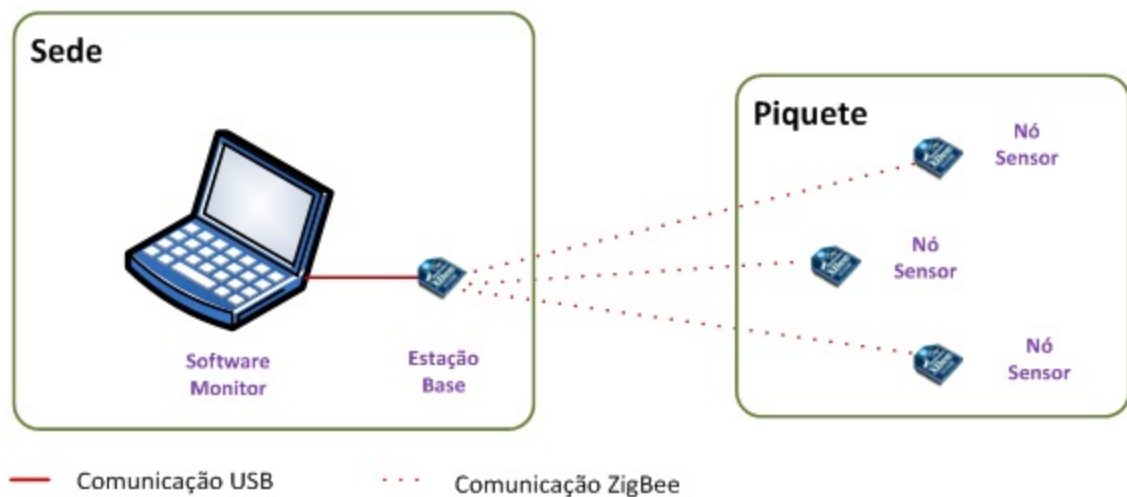


Figura 4.3: *Arquitetura da rede de sensores.*

A aquisição de dados da IL e o encaminhamento até a base central estão ilustrados na Figura 4.4, que apresenta os vários componentes responsáveis pelo processo de medição de dados.

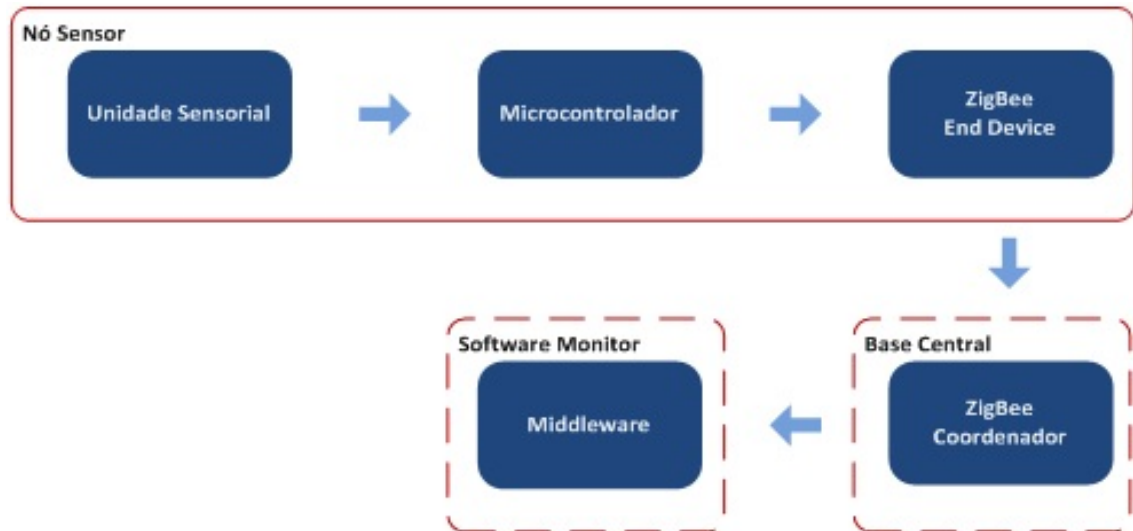


Figura 4.4: Esquema de envio de pacotes.

O processo de medição inicia-se com a coleta dos dados de IL sob responsabilidade da unidade sensorial. Em seguida os dados são repassados ao microcontrolador, que fará o processamento adequado antes de encaminhá-los para o módulo RF Xbee do nó sensor. Então, este o módulo transmite os dados coletados em uma mensagem API ZigBee, via rádio-frequência até a estação base, através da rede.

Na abordagem de gerenciamento Requisição/Resposta (RR), a entidade de gerenciamento, por exemplo, o medidor de luminosidade envia periodicamente mensagens de requisição aos elementos gerenciados, por exemplo, o nós sensores. Os nós sensores recebem a requisição, recuperam as informações solicitadas em sua base de dados local, alimenta essas informações em uma mensagem resposta e a envia para a base central. A base central recebe a resposta, realiza o processamento e análise dessa resposta, tomando as decisões necessárias relativas ao gerenciamento, que muitas vezes podem ser ajustes e configurações de parâmetros dos nós sensores.

O funcionamento da rede como um todo não pode ser ameaçada por falhas inevitáveis de nós únicos, que pode ocorrer por uma série de razões, como o esgotamento da bateria e com a ocorrência de eventos externos imprevisíveis e podem ser independentes ou estar correlacionados espacialmente.

A tolerância a falhas é particularmente importante visto que a manutenção contínua raramente é uma opção em aplicações de rede de sensores.

4.2 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentadas as características de uma RSSF assim como a comunicação entre os nós sensores, o software gerenciador e uma possível arquitetura de rede.

ESPECIFICAÇÃO DOS REQUISITOS DA REDE DE NÓS SENSORES E DA INTERFACE WEB

Antes de iniciar a implementação de um projeto, é extremamente importante realizar um procedimento conhecido como especificação de requisitos. Nesta etapa, todas as características relevantes do projeto são discutidas com o usuário, identificando todos os aspectos importantes da aplicação que precisam ser solucionados durante a implementação. Este capítulo apresenta as informações relacionadas ao processo de levantamento de requisitos.

Buscou-se que o software fosse amigável para ser utilizado, inclusive, por produtores com baixa escolaridade e pouca experiência com computadores. É importante que o sistema alerte aos usuários o momento ideal de se soltar o gado de forma bastante objetiva e clara.

Visto que os pastos são ambientes sobre os quais não se tem um controle absoluto e vários animais transitam nos pastos, desde cobras até o próprio gado, deve-se ter alguns cuidados com os nós sensores. Por exemplo, cobras poderiam fazer seu ninho em cima de um sensor, ou algum animal poderia pisar ou defecar sobre ele. Alguns outros problemas são previstos, como chuva e sol forte.

A Seção 5.1 apresenta os requisitos identificados para a rede de comunicação. Serão apontadas as necessidades para se construir uma rede que seja transparente ao usuário, demonstrando seus objetivos, uma descrição geral e os requisitos encontrados. A Seção 5.2 demonstra os requisitos identificados para a implementação de um *front-end web*, apresentando os objetivos, o diagrama de casos de uso e os requisitos funcionais e não funcionais.

5.1 Requisitos da rede

O objetivo desta especificação de requisitos de rede é demonstrar as necessidades para se implementar uma rede RSSF para ser utilizada em medições automatizadas de IL em pastagens.

Estes requisitos servirão de base para o projeto do sistema. Com as informações obtidas, é possível especificar as tecnologias de comunicação adequadas para a montagem da rede ou identificar os aspectos técnicos mais relevantes para o desenvolvimento de uma tecnologia própria.

A missão desta rede é funcionar como um meio de comunicação, transportando os dados captados pelos nós sensores da RSSF, possibilitando a medição automatizada de IL em pastagens. A implementação desta rede evitará a necessidade do deslocamento de técnicos até as pastagens para fazer a medição manual destas informações.

5.1.1 Descrição geral

Atualmente, todas as informações de IL são coletadas manualmente por técnicos que deslocam-se até o pasto e fazem todas as medições. Em média, são realizadas leituras em 15 pontos diferentes para cada 1.000m².

Segundo Carnevalli [9], o número de pontos de monitoramento por pastagem é 6, compostas de 5 leituras cada, totalizando 30 pontos de monitoramento por unidade experimental. Já o número de leituras por ponto é quatro a nível do solo e um acima do dossel.

De acordo com a rede proposta, a quantidade de nós sensores PT2FD depende do tamanho dos piquetes, respeitando a quantidade de pontos citada anteriormente.

De forma geral, os dados referentes a IL são obtidos pelo sensor que compõem o nó. Após a medição, os dados são transmitidos para a estação base onde são processados e guardados para futuras consultas feitas pelo usuário por meio da aplicação para monitoramento de pastagens, como demonstrado na Figura 5.1. Assim, serão apresentados os requisitos para a transmissão das informações capturadas nos nós até a estação base.

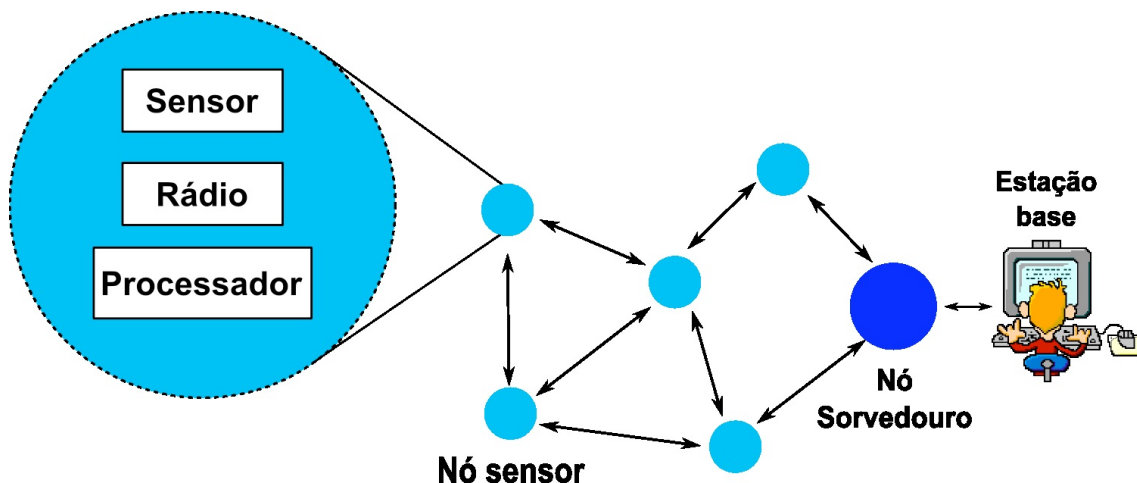


Figura 5.1: Rede de sensores sem fio.

5.1.2 Requisitos específicos

É necessário que exista um sistema de identificação de nós sensores, para que eles sejam adequadamente administrados em eventuais casos de falha ou mesmo em uma manutenção periódica. Também é interessante que os nós sejam facilmente localizáveis, ainda que para isto sejam necessários recursos adicionais, como mapas de posicionamento.

O sistema deve estar disponível para que sejam realizadas várias leituras por dia, tendo obrigatoriedade de atender pelo menos uma. Como não existe a necessidade de realizar medições durante a noite, o sistema deverá estar disponível apenas no período diurno, entre o nascer e o pôr do sol, o que pode contribuir para a economia de energia.

Para maior confiabilidade, a rede deve possuir uma baixa taxa de falhas. No caso de alguma ocorrência em um ou mais nós da rede, o sistema deve ser capaz de funcionar com os nós que ainda estão operando, sendo estes capazes de realizar toda reconfiguração da rede. Para facilitar e conseguir uma maior rapidez na sua manutenção, o sistema deve ser capaz de identificar qual é o nó defeituoso. Também é interessante o uso de protocolos que realizem a verificação da entrega dos dados na estação base.

Visto que não é necessário realizar muitas leituras por dia, prevê-se um tráfego reduzido de dados. Por esta razão, o desempenho da rede não será afetado se o sistema possuir baixas velocidades de transmissão. É ideal que esta velocidade possa ser ampliada ou reduzida com o crescimento ou redução da rede.

As baterias devem ser capazes de alimentar o nó sensor durante toda a etapa de monitoramento, mesmo no período chuvoso da região. Todos os esforços devem ser realizados para se economizar energia, considerando que esta característica evita a necessidade de visitas de manutenção no pasto.

A segurança precisa ser analisada em dois aspectos. O primeiro aspecto é a preocupação com os dados transmitidos e, para isto, é desejável que o sistema possua algum tipo de segurança nativa, como criptografia. É importante que a inserção destes novos recursos de segurança no sistema não aumente o consumo de bateria ou prejudique significativamente o desempenho da rede.

O outro aspecto diz respeito ao dispositivo contra danos físicos. Considerando que os nós sensores estarão expostos no pasto, é preciso que ele tenha um invólucro de proteção contra intempéries climáticas, como chuvas, sol e ventos fortes. Outro ponto a ser observado é que eles serão colocados no solo, onde possivelmente existirá trânsito de animais. É necessário que os nós sensores suportem algum peso, resistindo, por exemplo, ao impacto da pisada de um animal.

A instalação e a manutenção da rede serão feitas por pessoas do meio rural, a *priori* com pouca qualificação e baixo conhecimento técnico. É fundamental que o equipamento seja de fácil manutenção e que exista uma boa apreensibilidade. O ideal é que os equipamentos sejam construídos em módulos, facilitando a troca de alguma de suas partes em casos de falha das baterias.

É necessário existir uma documentação clara e objetiva, com linguagem simples e facilmente compreensível. São necessários um manual de instalação, um manual de uso e um manual de manutenção.

5.2 Requisitos da interface web

Esta seção apresenta as descrições e especificações do *software front-end web*, a ser utilizado para a monitoração de pastos. A missão deste *front-end web* é a de ser uma interface para o usuário final, informando ao produtor rural o momento adequado para colocar o gado no pasto, baseado em dados obtidos por meio das medições de IL.

Através de uma decisão correta a respeito do momento de colocar o gado no pasto, é possível obter um melhor aproveitamento do potencial nutritivo do capim, otimizando o rendimento do manejo das pastagens para o produtor rural [9].

5.2.1 Requisitos funcionais

Os requisitos descrevem as funções que o software oferece. Nessa seção, será apresentado uma visão geral do diagrama de casos de uso, explicando os casos visualizados na Figura 5.2.

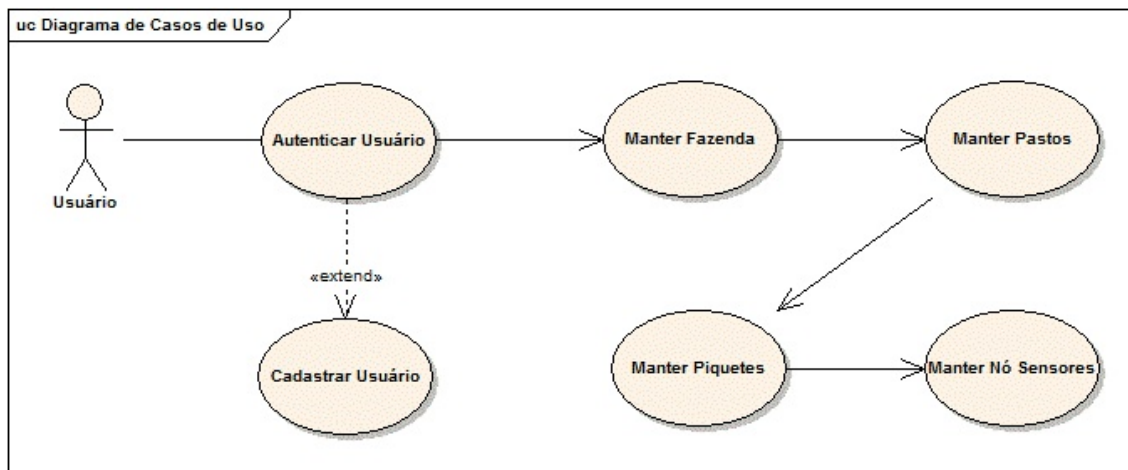


Figura 5.2: Diagrama de casos de uso.

Ao aparecer a tela de *login* para o usuário é necessário que ele informe a sua identificação e senha. Quando este usuário for autenticado, passa a ter acesso a todas as informações. Se este usuário não estiver cadastrado, deverá solicitar o seu cadastramento, por e-mail, ao administrador.

O sistema já vem configurado com usuário e senha de administrador padrão. No seu primeiro acesso, o usuário deverá logar-se com este usuário e senha padrão e então alterar a senha de acesso padrão ou criar um novo usuário para si. O usuário administrador é responsável pela configuração de todos os usuários, podendo criar, alterar ou excluir cadastros.

Após a autenticação do usuário, o primeiro campo que surge é FAZENDA. Aqui o usuário pode escolher, conforme uma lista, em qual fazenda irá fazer as medições de IL. Se a fazenda não estiver cadastrada no sistema, o usuário poderá criar, alterar e excluir a mesma.

Logo depois da escolha da fazenda aparece a opção PASTO, tendo em vista que uma fazenda pode ter vários pastos, a seleção de pasto a ser utilizado deverá ser feita neste momento. Como no campo anterior, aqui também será dado ao usuário a opção de criar, alterar e excluir pastos.

Em seguida aparece o campo PIQUETE, que é a subdivisão dos pastos, que serão monitorados. Aqui também será dado ao usuário a opção de criar, alterar e excluir piquetes. Nos piquetes será instalada a RSSF, através de kits de nó sensores, que fará todas as medições e informará ao usuário as informações da IL.

O kit é um conjunto de nós sensores, que são colocados em uma determinada área e que transmitem a IL a um software do tipo *middleware* que receberá esses valores e os guardará no banco de dados utilizado pela aplicação *web*.

Nos piquetes, existe a possibilidade de se colocar mais de um kit. Portanto, existem os campos para se gerenciar todas estas RSSF criando-as, alterando-as ou

excluindo-as.

5.2.2 Requisitos não funcionais

A segurança do sistema deve começar pela autenticação do usuário. Como existe a possibilidade do acesso simultâneo pela rede ou pela internet de vários usuários, é interessante que se utilize algum tipo de protocolo que aumente a segurança dos dados trafegando entre o cliente e o servidor, como por exemplo o HTTPS (*Hypertext Transfer Protocol over Secure Socket Layer*) ou o SSL (*Secure Socket Layer*). Também é preciso que se feche a sessão do usuário que permaneça muito tempo sem utilizar o sistema.

Para manter a confiabilidade do sistema, é necessário assegurar que o software não mostre ao usuário informações incorretas, portanto, quando uma consulta for solicitada e não for possível mostrar como esperado os dados certos, o sistema deve mostrar uma mensagem de erro. Diferentemente da RSSF, os dados já coletados devem ter uma alta disponibilidade e estarem disponíveis 24 horas por dia, facilitando as análises, relatórios e, principalmente, as tomadas de decisão.

Uma boa eficiência deve ser sempre buscada. Por isso, é interessante que o sistema possua rapidez nas respostas das solicitações do usuário e no caso do projeto do sistema de monitoramento de pastagens é muito interessante que ele possa ser capaz de funcionar com equipamentos de poucos recursos. Isto também ajuda na portabilidade ideal, que é a de funcionar em qualquer máquina, com qualquer sistema operacional e com qualquer navegador.

Para a facilidade de manutenção do software, é interessante que ele seja construído em módulos. É ainda fundamental que este possua uma boa documentação. Estas medidas facilitam a correção de erros de codificação, execução de alterações solicitadas por usuários ou ainda evoluções que permitam agregar novas funcionalidades.

A usabilidade é melhorada quando se consegue utilizar uma interface intuitiva, que não seja ambígua e que possua uma padronização. Para ajudar na utilização, é importante que o sistema se comunique com o usuário por meio de mensagens mostrando quais são as opções possíveis.

Para uma boa documentação é preciso ter um manual de instalação, mostrando passo-a-passo a configuração do sistema, um manual técnico, descrevendo todas as funções e as formas corretas de utilizá-las, e ainda um sistema de ajuda *online*, disponível ao usuário no momento em que ele utiliza o software.

5.3 Descrição dos componentes da rede

Esta seção apresenta os principais componentes de cada dispositivo desenvolvido, identificando suas principais características e justificando suas escolhas.

Os componentes de hardware utilizados para o desenvolvimento do protótipo do nó sensor que exercem funções relevantes, além de resistores, capacitores e reguladores de tensão, são: um sensor de luminosidade S7686, descrito na Seção 3.6.3; um microcontrolador PIC18F1320; e um Módulo XBee. Esses dispositivos serão descritos posteriormente, juntamente com o Software X-CTU, que é o responsável pela configuração dos módulos XBee.

Como foi dito anteriormente, o Luxímetro é um aparelho utilizado para medir o nível de luminosidade dos ambientes. O circuito apresentado na Figura 3.48 foi a base para a implementação do circuito do nó sensor construído nesse trabalho, responsável pela captação de dados de luminosidade.

5.3.1 Nós sensores

Os nós sensores são pequenos dispositivos, com baixo consumo de energia, capazes de auto-organização, cooperação, processamento, comunicação e monitoramento de objetos, animais, condições meteorológicas, etc. Colônias (*clusters*) de sensores podem ser lançadas ou estrategicamente posicionadas em locais inóspitos ao ser humano, provendo informações cruciais para a tomada de decisão ou para pesquisas científicas [27].

O nó sensor é um dispositivo que tem por finalidade fazer um monitoramento de um determinado fenômeno e efetuar a transmissão dos dados ou das “medidas” observadas através de uma comunicação sem fio. Os nós sensores “fontes” podem ser equipados com vários tipos de transdutores, capazes de medir diferentes magnitudes físicas, tais como calor, temperatura, pressão, umidade, pH, concentração de nitrogênio no solo, etc. Um nó sensor fonte consiste, tipicamente, de uma unidade de sensoriamento com processador embarcado, memória, fonte de energia e um transmissor-receptor [27].

No caso deste trabalho, eles são responsáveis pela coleta dos dados de interceptação luminosa. Estes nós serão posicionados de modo que garantam boa cobertura de todo o piquete. Além de coletar os dados de intensidade luminosa, eles transmitem os dados para a estação base, que poderá estar localizada na sede da fazenda.

5.3.2 Estação base

A estação base é responsável pelo controle e recepção de dados, provenientes dos nós sensores. O hardware da base é composto por um módulo XBee e uma placa de

interface USB, que acompanha o Kit de Desenvolvimento XBee/XBee-PRO, série 1. Este Kit é fabricado pela empresa Digi, conforme ilustrado na Figura 5.3.



Figura 5.3: Base central.

A placa USB permite a comunicação com o módulo XBee, bem como a configuração e os testes com os módulos. Para isso é necessário a instalação de um driver no computador, que é disponibilizado no site da Digi.

5.3.3 Software monitor

O software monitor é um software do tipo middleware, com a finalidade de fornecer uma interface de comunicação da aplicação como *front-end* com a rede de sensores. Comunica-se exclusivamente com a estação base conectado à porta da USB.

A Figura 5.4 ilustra o diagrama de blocos do modo de funcionamento do software monitor.



Figura 5.4: Diagrama de blocos do software monitor.

O software inicia com a configuração da comunicação serial do computador (porta USB), informando qual a taxa de bits, bit de paridade, entre outros parâmetros. Em seguida, ele monitora constantemente esta porta USB até o recebimento de algum pacote. Quando ocorre a chegada de pacotes, recebidos pela estação base, eles são decodificados pelo software monitor e são impressos na console de saída, juntamente com a identificação do nó sensor que enviou o dado.

5.4 Protótipos de nós sensores construídos

Foram desenvolvidas duas versões de protótipos, que serão apresentados nesta seção. Os sensores remotos são dispositivos que possuem módulos XBee configurados como *End Device*. No caso do monitoramento de IL, estes dispositivos possuem a

responsabilidade de coletar as informações de luminosidade na parte inferior e superior do pasto.

5.4.1 Nó sensor - versão 1.0 - PT1FD

Para o projeto, a princípio, foi desenvolvido o protótipo do nó sensor, mostrado na Figura 5.5, denominado de PT1FD.

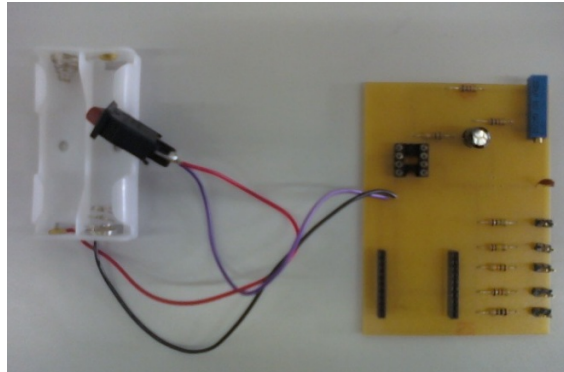


Figura 5.5: Protótipo nó sensor PT1FD.

A fonte de alimentação deste nó sensor é composta por duas pilhas de 1.5V cada, ligadas em série, para gerar um tensão de 3 V com o objetivo de alimentar o módulo XBee e os outros componentes do nó sensor.

Para o circuito responsável pela captação de intensidade luminosa foi adicionado um resistor de $1K\Omega$ e um resistor de 100Ω ao circuito do Luxímetro, apresentado na Seção 3.6.3, visando aumentar a escala e efetuar medições de IL. Também foi conectado um filtro em paralelo na saída do circuito sensor, composto por um capacitor de $100\mu F$ em série com um resistor de $10K\Omega$, para evitar oscilações apresentadas em baixas luminosidades.

A Figura 5.6 ilustra o esquema do circuito do nó sensor PT1FD, no qual se distingue o circuito que realiza a captação de luminosidade e o dispositivo XBee responsável por enviar os dados coletados a estação base.

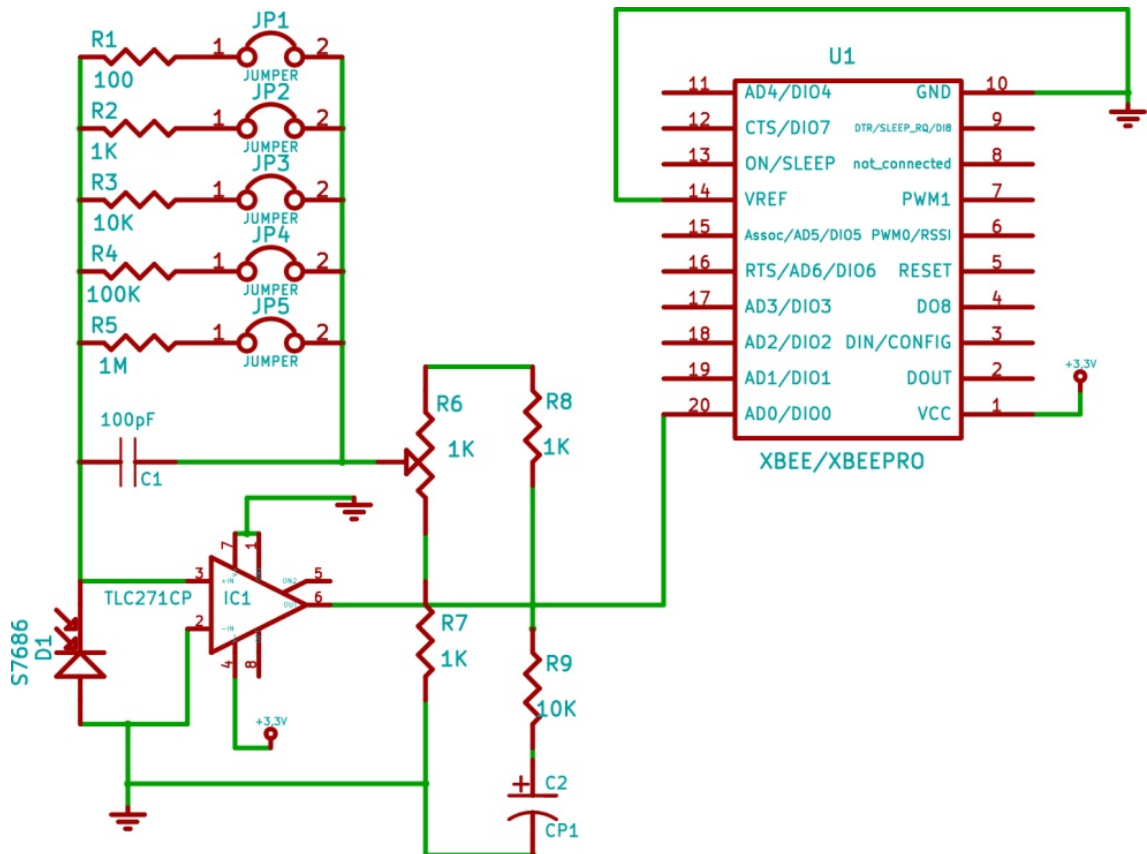


Figura 5.6: Esquema elétrico do protótipo do nó sensor PT1FD.

Nos testes realizados em laboratório foi constatado que os dados recebidos pelo sensor de luminosidade não estavam sendo lidos corretamente pelo dispositivo de comunicação sem fio XBee, pois a tensão com que os dados chegavam ao pino do dispositivo sem fio, responsável pela conversão analógico/digital, estava superior à tensão máxima suportada pelo mesmo. Conforme especificado no *datasheet*, essa tensão máxima é 35% da tensão de alimentação do dispositivo que neste caso é 3V, o que gerava um erro na leitura destes dados.

Para a solução desse problema foram propostas duas soluções:

- A primeira alternativa seria redimensionar a tensão com que o sensor de luminosidade enviaria os dados coletados para o dispositivo XBee. Entretanto, isso levaria a uma perda significativa, pois haveria uma redução na faixa de valores com que este sensor poderia trabalhar, o que afetaria diretamente a eficiência do nó sensor.
- A segunda alternativa, que foi efetivamente implementada neste trabalho - denominada PT2FD, seria inserir entre o circuito do sensor e o dispositivo XBee um microcontrolador que ficaria responsável de receber os dados do sensor e enviar ao XBee. Outra vantagem de se ter um microcontrolador integrado ao nó sensor é a possibilidade de um maior gerenciamento do nó, caso seja necessário.

5.4.2 Nó sensor - versão 2.0 - PT2FD

Nesta versão, foi inserido o componente eletrônico microcontrolador PIC18F1320, para realizar a conversão analógica/digital. A arquitetura de um nó sensor pode ser dividida em quatro unidades fundamentais: unidade de processamento, unidade de energia, unidade de sensoriamento e unidade de comunicação. A Figura 5.7 apresenta a arquitetura do nó sensor e a interação dos seus elementos representada pelas setas que une cada uma delas.



Figura 5.7: Arquitetura de hardware do nó sensor 2.0.

O esquema elétrico da Figura 5.8 mostra todos os circuitos e os dispositivos implementados para o nó sensor PT2FD.

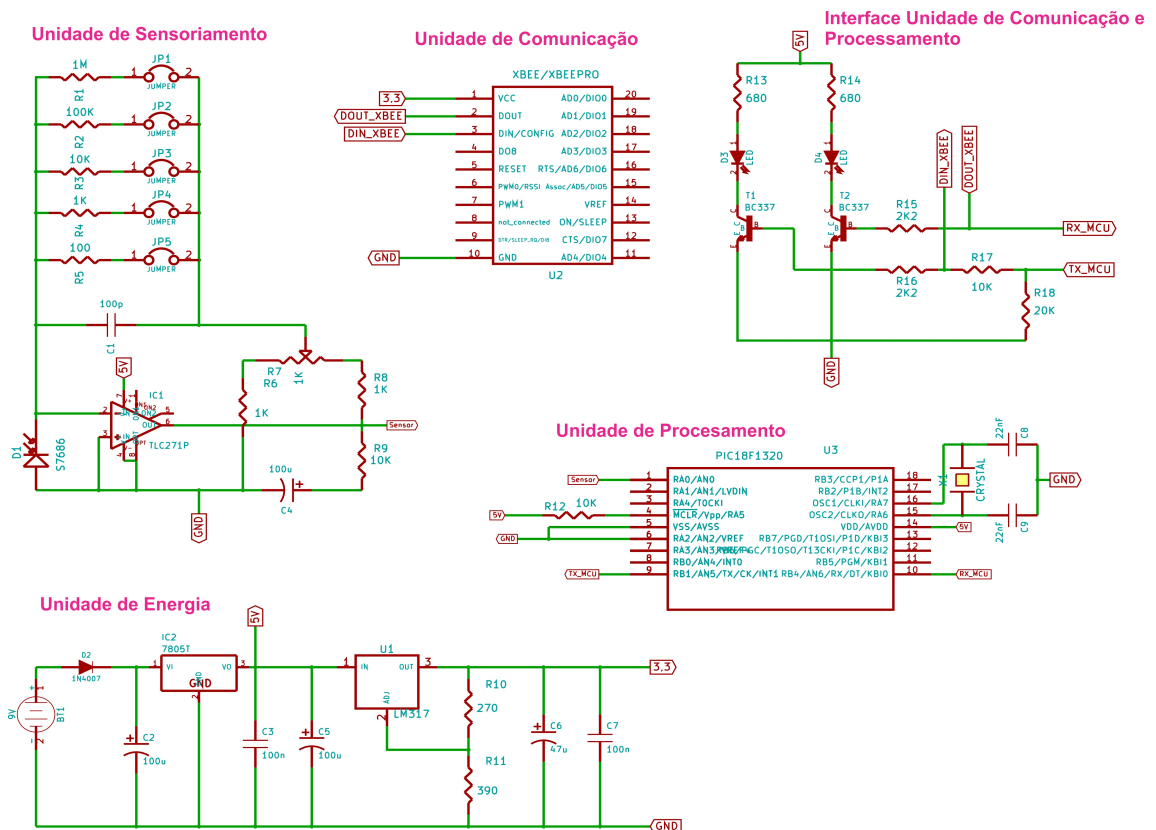


Figura 5.8: Esquema elétrico do nó sensor e as ligações entre as suas unidades.

A Figura 5.9 ilustra o protótipo do nó sensor PT2FD construído em uma placa *protoboard*.



Figura 5.9: Nó sensor PT2FD.

a) Unidade de processamento

A unidade de processamento, formada essencialmente pelo microcontrolador PIC18F1320, conforme ilustrado na Figura 5.10, é a unidade central do nó sensor, que recebe os dados da unidade de sensoriamento, efetua o seu processamento e os encaminha à unidade de comunicação do nó.

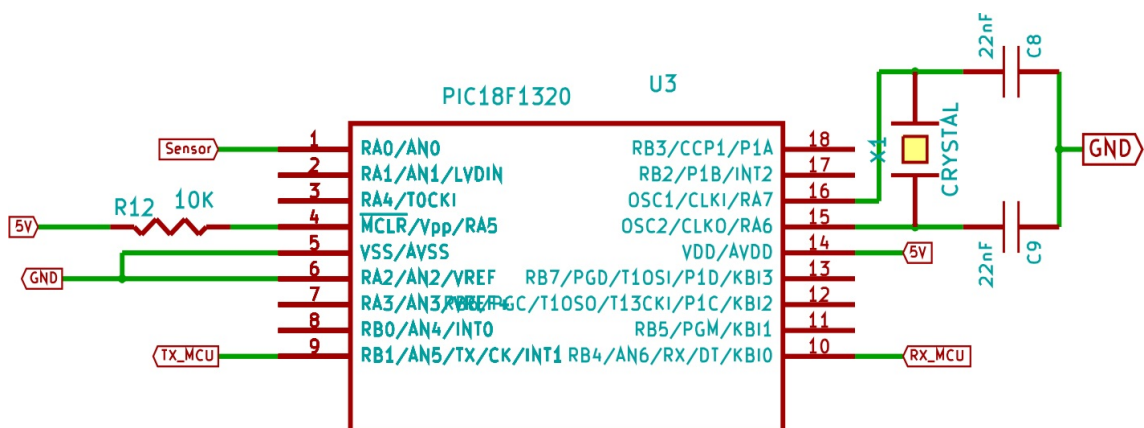


Figura 5.10: Esquema elétrico da unidade de processamento.

O microcontrolador é utilizado para realizar a conversão a 10 bits da entrada analógica, que recebe a resposta comportamental da unidade de sensoriamento, em sua respectiva saída digital e transferir esse resultado à unidade de comunicação.

Foi necessário desenvolver um software para o microcontrolador, responsável pelo gerenciamento do nó sensor. Sua função é coletar os dados provenientes da unidade de sensoriamento, tratá-los e transmiti-los à unidade de comunicação para que sejam enviados para a estação base.

Os dados são coletados e enviados constantemente, sendo necessário colocar horários predefinidos e inserir um mecanismo para os módulos fiquem em estado *sleep*, para economizar energia.

O software possui uma estrutura simples para evitar o processamento desnecessário por parte do microcontrolador, objetivando reduzir o consumo de energia do nó sensor. O software tem início com a inicialização de um conjunto de configurações para que se estabeleça a comunicação serial com o módulo XBee. A Figura 5.11 ilustra o diagrama de fluxo do programa do microcontrolador desenvolvido.

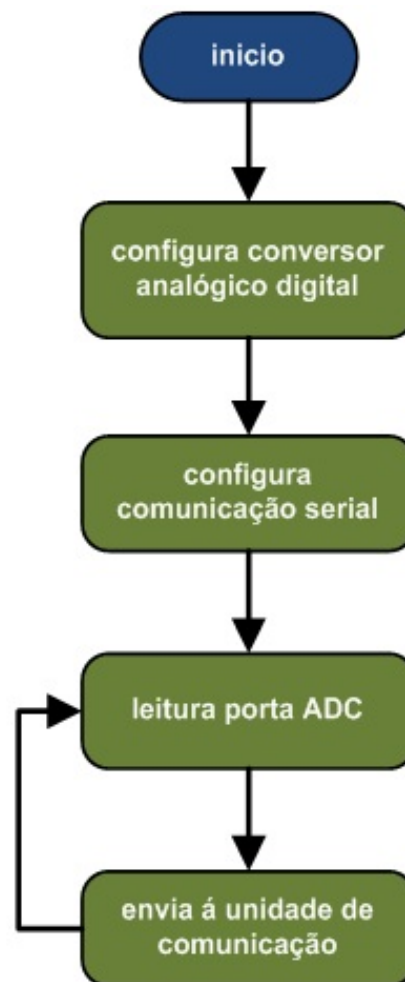


Figura 5.11: Diagrama de fluxo do software do microcontrolador.

Em seguida deve ser informada a configuração da porta AN0 do microcontrolador como entrada do sinal analógico do sensor, bem como a configuração do conversor analógico/digital. Logo após, o software executa um laço infinito, em que constan-

temente lê o resultado da conversão analógico/digital e transmite este resultado ao módulo XBee.

b) Unidade de sensoriamento

A unidade de sensoriamento é formada basicamente pelo sensor de luminosidade S7686 e pelo amplificador operacional TLC271P. Cada nó sensor possui um fotodiodo S7686, um amplificador operacional TLC271P e um conjunto de seleção de *jumpers*, utilizados para alterar o resistor que define o ganho do amplificador. Em paralelo à saída do sinal foi inserido um resistor, em série com um capacitor, com o objetivo de filtrar pequenas flutuações na saída, estabilizando a resposta obtida pelo microcontrolador. O esquema elétrico da unidade de sensoriamento está ilustrado na Figura 5.12.

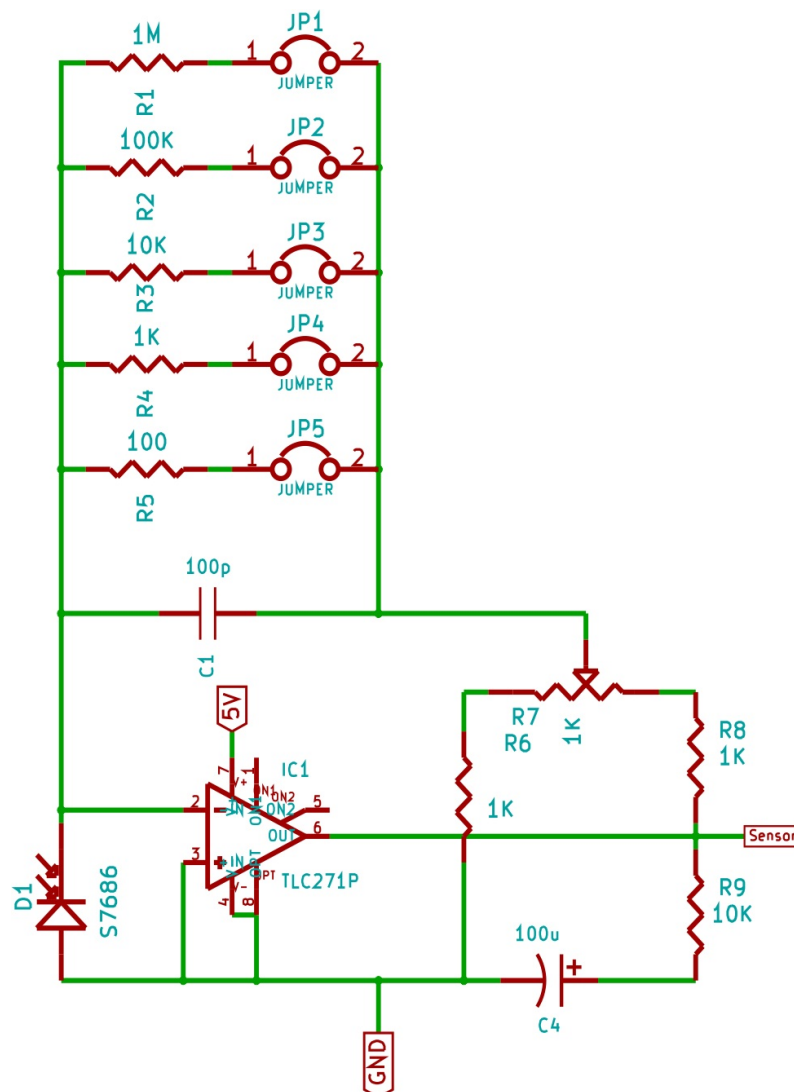


Figura 5.12: Esquema elétrico da unidade de sensoriamento.

c) Unidade de energia

A unidade de alimentação, apresentada na Figura 5.13, é formada por uma bateria de 9V. Por meio de reguladores de tensão, é obtida a tensão de 5V e de 3.3V para alimentação do microcontrolador e do módulo XBee, respectivamente.

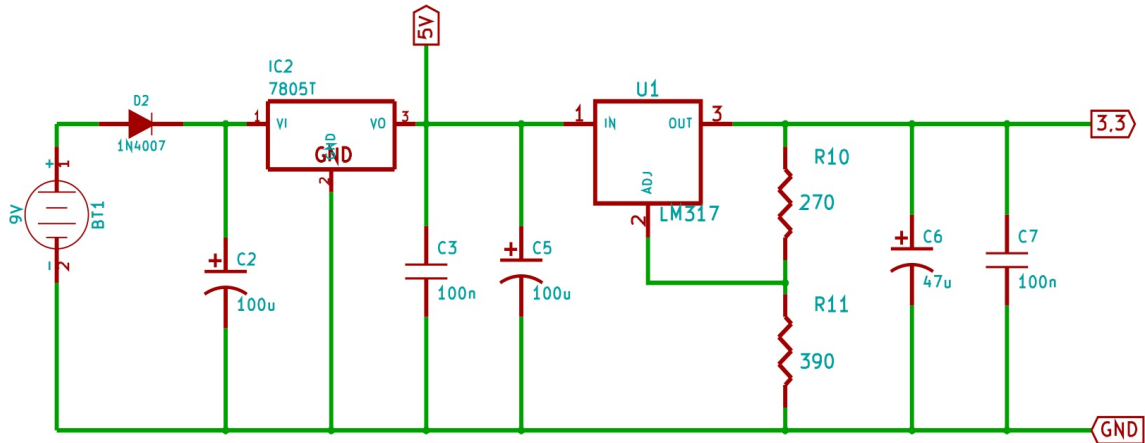


Figura 5.13: Esquema elétrico da unidade de energia.

A bateria é conectada no terminal de entrada do regulador de tensão LM7805, que é responsável por manter a tensão constante em 5V. É ella que alimenta a unidade de processamento e a unidade de sensoriamento. Em seguida, foi conectado um LM317, que reduz a tensão para 3.3V para depois alimentar a unidade de comunicação. Os capacitores do circuito possuem a função de filtrar pequenas flutuações na tensão.

d) Unidade de comunicação

A unidade de comunicação é composta por um módulo XBee. Os módulos XBee da Digi oferecem diversos modelos das mais variadas aplicações. Os módulos já saem de fábrica configurados para se comunicarem em uma rede com topologia ponto-a-ponto.

Como neste trabalho foi utilizada a topologia estrela, foi necessário realizar algumas alterações na configuração, inclusive para diferenciar qual módulo iria funcionar como nó Coordenador e como *End Device*.

A Figura 5.14 ilustra o esquema elétrico da unidade de comunicação.

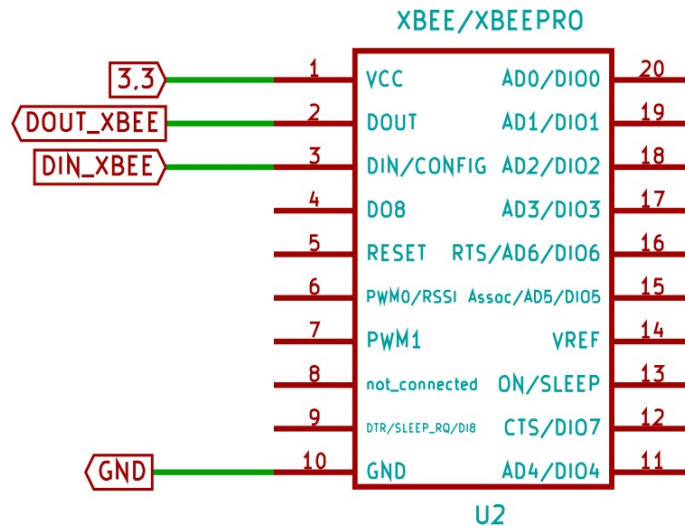


Figura 5.14: Esquema elétrico da unidade de comunicação.

Com a responsabilidade da transmissão dos dados de luminosidade via rede sem fio, os dispositivos XBee, neste trabalho, operam em modo API, o que possibilita, dentre outras funções, reconhecer cada dispositivo na rede por nome, além de realizar a configuração remota dos mesmos, em uma eventual necessidade.

5.5 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentadas as especificações de requisitos para a construção de uma *interface web* que gerencie os dados recebidos dos nós sensores.

Também foi feita a descrição dos componentes da rede e apresentados os protótipos de nós sensores construídos.

Conclusões

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões a respeito do trabalho e sugeridos alguns trabalhos futuros.

6.1 Considerações finais

O uso de manejo de pastejo para alimentação de gado é uma prática comum entre os produtores. Para o melhor aproveitamento das plantas forrageiras, é necessário observar a interceptação luminosa (IL). Muitos produtores fazem isso a olho nu, baseados na sua experiência, mas isso muitas vezes não traz os resultados esperados.

Essa observação também pode ser feita de forma manual ou automática, através de sensores de luminosidade.

Segundo Carnevalli [9], momento ideal, considerando-se os índices medidos de IL, para se colocar o gado no pasto é exatamente quando a IL medida for equivalente a 95%. Neste momento o pasto está pronto para colheita, e é um momento ótimo considerando-se o potencial nutricional do pasto e a disputa por luz por parte do capim.

Infelizmente, os medidores de luminosidade existentes no mercado possuem um alto custo, impossibilitando que pequenos e médios produtores tenham acesso a esta tecnologia.

Visando superar esta dificuldade e prover a oportunidade de acesso a estes produtores, foram desenvolvidos alguns protótipos de medidores de luminosidade de baixo custo e seus posteriores nós sensores.

Tabela 6.1: Características dos protótipos de unidades de sensores

Identificador	Microcontrolador	Alimentação	Barramento	Comunicação De Dados	Sensor
PT1LDR [21]	PIC16F877A	4 pilhas AA	MAX232	-	LDR com divisor de tensão.
PT2LDR [21]					LDR com divisor de tensão e amplificador logarítmico (LM324).
PT1FT [21]					Fototransistor (TIL78) com divisor de tensão.
PT1FD	-	2 pilhas de 1,5 V	-	XBEE	Fotodiodo S7686.
PT2FD	PIC18F1320	1 bateria de 9V	-	XBEE	Fotodiodo S7686.

As Tabelas 6.1 e 6.2 sintetizam as características dos protótipos de medidores de luminosidade de baixo custo analisados e produzidos.

Tabela 6.2: *Características dos protótipos de unidades de sensores*

Identificador	Forma de Medida	Fórmula de Conversão	Observações
PT1LDR [21]	A luminosidade é medida observando-se a variação da tensão de saída.	$T_{Digital} = [V_{CC} \cdot R / (R_{LDR} + R)] / 4,88 \cdot 10^{-3}$	A medição foi feita apenas em laboratório e os resultados não foram satisfatórios.
PT2LDR [21]	É medido da mesma forma que o PT1LDR entretanto o amplificador tornam os valores mais próximos ao obtido pelo Luxímetro.		
PT1FT [21]	É medido da mesma forma que o PT1LDR, a utilização do fototransistor foi no intuito de produzir valores mais próximos ao obtido pelo Luxímetro.		
PT1FD	Mede o valor absoluto que é transmitido no momento.	–	As medições de luminosidade foram feitas em laboratório com jumper para resistores de 100Ω, 1KΩ, 10KΩ, 100KΩ e 1MΩ.
PT2FD	Mede a cada intervalo de tempo e transmite a média dos valores lidos para o receptor.	–	

Morais e Franco [21] construíram 3 protótipos utilizando dispositivos fotoelétricos: 2 utilizando LDR e 1 utilizando fototransistor. Estes protótipos utilizaram o microcontrolador PIC16F877A para realizar a conversão dos dados analógicos recebidos para dados digitais. A fórmula de conversão utilizada foi: $T_{Digital} = [V_{CC} \cdot R / (R_{LDR} + R)] / 4,88 \cdot 10^{-3}$. O microcontrolador também seria utilizado para enviar os dados convertidos ao transceptor, que é o componente responsável pela comunicação do protótipo, entretanto os nós sensores não foram construídos devido à não conformidade dos testes. Foram utilizadas 4 pilhas AA para alimentar o protótipo e seria utilizado o barramento MAX232 para fazer a interligação entre o microcontrolador e a porta serial.

Deve-se observar que os protótipos PT1LDR, PT2LDR e PT1FT construídos por Moraes e Franco [21] foram apenas medidores de luminosidade, que foram utilizados apenas para medições em laboratório, utilizando uma lâmpada e variando a tensão aplicada a ela, para que sua luminosidade alterasse. Visto que os resultados encontrados não foram satisfatórios, não foram construídos os nós sensores correspondentes.

Para se conseguir uma independência para a comparação entre os protótipos contruídos e o aparelho LI-COR, utilizado e emprestado pela Embrapa, foram realizados testes usando o aparelho Luxímetro.

Nos testes realizados por Moraes e Franco [21], o aparelho Luxímetro apresentou resultados muito semelhantes ao do LI-COR, modelo LI-1776. Por isso, ele foi utilizado como alternativa ao LI-COR nos testes posteriores. Para aproximar mais os resultados obtidos nos protótipos construídos dos resultados apresentados pelo Luxímetro, o LDR foi utilizado juntamente com um divisor de tensão. Posteriormente, foi acrescentado uma aplicador logarítmico ao circuito anterior. E, por último, foram feitas as medições com um fototransistor TIL78 juntamente com um divisor de tensão.

Neste trabalho, foram construídos 2 protótipos utilizando fotodiodos. Estes protótipos utilizaram o sensor de luminosidade S7686 e módulos de comunicação sem fio XBee. O aparelho denominado Luxímetro pode ser projetado utilizando o fotodiodo S7686, conforme descrito pela empresa fabricante Hamamatsu Photonics. No protótipo PT1FD, foram utilizadas 2 pilhas de 1.5V cada para a alimentação do circuito. Já no protótipo PT2FD, foi utilizada uma bateria de 9V.

Como no PT1FD foi verificado nos testes de laboratório que os dados recebidos pelo sensor de luminosidade não estavam sendo lidos corretamente pelo dispositivo de comunicação sem fio XBEE, no protótipo PT2FD foi acrescentado o microcontrolador PIC18F1320. Ele foi utilizado para receber os dados do sensor, fazer a sua conversão analógica/digital e enviar ao XBEE. Uma vantagem de se ter um microcontrolador integrado ao nó sensor é a possibilidade de um maior gerenciamento do nó, caso seja necessário.

Nos testes realizados, foi construído o nó sensor e feitas as medições de luminosidade em laboratório com jumper para resistores de 100Ω , $1K\Omega$, $10K\Omega$, $100K\Omega$ e $1M\Omega$. Essas variações de resistores serviram para testar qual se adequava mais aos valores obtidos pelo Luxímetro.

Diante dos experimentos realizados, pode-se concluir que o nó sensor PT2FD é um sensor de baixo custo, cerca de R\$600,00 cada, que pode ser utilizado como alternativa ao sensor de alto custo LI-COR LI-1776, que custa cerca de R\$50.000,00 e é atualmente utilizado pela EMBRAPA. O sucessor do equipamento LI-COR LI-1776, o LAI2200C, também tem custo elevado de R\$30.000,00 não sendo uma alternativa viável.

Para se obter os índices de IL, utilizando-se as técnicas atuais, deve-se fazer em média 15 medições para cada 1000 m^2 [9]. Então, mesmo para pequenas propriedades, o uso do aparelho LI-COR LI-1776 torna-se inviável para pequenos e médios produtores.

Deve-se observar que com a produção do protótipo PT2FD, o custo de produção representa 1.2% do valor do aparelho LI-COR LI-1776, tornando o uso desta tecnologia acessível e viável para pequenos e médios produtores. Portanto, a proposta de sensor de luminosidade é adequada e atinge os objetivos esperados.

6.2 Trabalhos futuros

Um possível trabalho futuro seria o estudo de algum componente nacional que substitua o fotodiodo S7686, pois sua aquisição é burocrática e demorada por ser um produto importado.

Outro possível trabalho futuro seria um melhor estudo do fototransistor, que mostrou correlação de Pearson próximo a um. Ele poderia ser uma alternativa viável na construção de um sensor de baixo custo.

Também seria interessante a criação do *software web* de acordo com as especificações apresentadas no Capítulo 5.

6.3 Agradecimentos

O autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPPEG) pelo fornecimento de bolsa de estudos e incentivo à produção deste trabalho e também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto Edital MCT/CNPq n.09/2010 - PDI, Processo n. 560269/2010-2.

Referências Bibliográficas

- [1] 4SHARED. **Componentes semicondutores de potência**. Disponível em <http://dc146.4shared.com/doc/hslh_Ry-/preview.html>. Acesso em: 13 dez. 2013, 2013. 34 p.
- [2] AMARAL, A. D. G. **Perfilhamento e Valor Nutritivo de Pastagens de Capins Marandu E Xaraés [Brachiaria Brizantha (Hochst Ex. A. Rich.) Stapt.] sob Manejo Intermitente e Doses de Nitrogênio e Potássio**. PhD thesis, Universidade Federal de Goiás, Escola de Veterinária, 2010.
- [3] BARBETTA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C. **Estatística para Cursos de Engenharia e Informática**. São Paulo, Ed. Atlas, 2004.
- [4] BARETA, O. R. A. **Pastejo rotacionado otimiza vida de produtor de leite no sertão sergipano**. Disponível em <<http://sitedobareta.com.br/sergipe/pastejo-rotacionado-otimiza-vida-de-produtor-de-leite-no-sertao-\sergipano-11-01-2011>>. Acesso em: 3 dez. 2013, 2011. a.
- [5] BARRO, R. S. **Respostas Morfofisiológicas e Produtivas de Genótipos Forrageiros Nativos em Diferentes Condições de Luminosidade**. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, 2011.
- [6] BENAVENTE, J. C. C. **Monitoramento ambiental de vinhedos utilizando uma rede de sensores sem fio que coleta dados com um intervalo de amostragem variável**. Mestrado, USP, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- [7] BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. São Paulo, Ed. Prentice Hall, 8 edition, 2004.
- [8] BRIGHTON. **Brighton webs ltd – light dependent resistor**. Disponível em <http://www.brighton-webs.co.uk/electronics/light_dependent_resistor.aspx>. Acesso em: 13 dez. 2013, 2010. 6 p.
- [9] CARNEVALLI, R. A. **Dinâmica da Rebrotação de Pastos de Capim-Mombaça Submetidos a Regimes de Desfolhação Intermitente**. PhD thesis, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura, 2003.

- [10] CIPELLI, A. M. V.; SANDRINI, W. J.; MARKUS, O. **Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos eletrônicos**. São Paulo, Ed. Érica, 18 edition, 2001.
- [11] COELHO, J. P. **Sensores e actuadores**. Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, 2004. 185 p.
- [12] DECAGON. **Accupar - par/lai ceptometer, model Ip-80**. Disponível em <http://manuals.decagon.com/Manuals/10242_Accupar%20LP80_Web.pdf>. Acesso em: 21 out. 2013, 2006. 105 p.
- [13] FONSECA, R. S. **Iluminação Elétrica**. São Paulo, Ed. Mcgraw-Hill do Brasil Ltda, 1 edition, 1976.
- [14] GUNTER, W.; STILES, W. S. **Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas**. John Wiley & Sons Inc, 1 edition, 1967.
- [15] HAMAMATSU. **Datasheet of photodiode s7686**. Disponível em <http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s7686_kspd1040e02.pdf>. Acesso em: 10 out. 2013, 2002. 2 p.
- [16] HAMAMATSU. **Application circuit examples of si photodiode**. Disponível em <http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/si_pd_circuit_e.pdf>. Acesso em: 10 out. 2013, 2008. 4 p.
- [17] HECHT, E. **Óptica**. Fundação Calouste Gulbenkian, 2 edition, 2002.
- [18] LI-COR. **Li-1776 solar monitor - instruction manual**. Disponível em <http://envsupport.licor.com/docs/LI-1776_Manual.pdf>. Acesso em: 23 out. 2013, 1982. 44 p.
- [19] LI-COR. **Lai-2200c plant canopy analyzer**. Disponível em <http://www.licor.com/env/pdf/area_meters/2200-2200C_combo.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2014, 2014.
- [20] MARQUES, A. E. B.; JÚNIOR, S. C.; CRUZ, E. C. A. **Dispositivos Semicondutores: Diodos e Transistores**. São Paulo, Ed. Érica, 4 edition, 1998.
- [21] MORAIS, F. J. O.; FRANCO, L. F. **Automatização do processo de interceptação luminosa em pastagens: Construção de protótipos medidores de luminosidade**. Monografia de Graduação, Departamento de Computação, Universidade Católica de Goiás, Goiás, 2008. 96 p.
- [22] MOREIRA, V. A. **Iluminação Elétrica**. Edgard Blucher Ltda, 1 edition, 1999.

- [23] PUCCINELLI, D.; HAENGGI, M. **Wireless sensor networks: Applications and challenges of ubiquitous sensing**. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 5(3):19–31, 2005.
- [24] RAO, M.; NAIR, P.; ONG, C. **Biophysical interactions in tropical agroforestry systems**. *Agroforestry Systems, Dordrecht*, 38:3–50, 1998.
- [25] REVISEOMATIC. **reviseomatic v3 – light dependent resistor**. Disponível em <<http://reviseomatic.org/help/e-resistors/Resistors%20-%20Light%20Dependent.php>>. Acesso em: 13 dez. 2013, 2013. 3 p.
- [26] RIBEIRO, A. R. L. **SENSORBUS: Um Middleware Baseado em Políticas para Redes de Sensores sem Fio**. PhD thesis, Universidade Federal de Pará, Centro Tecnológico, 2007.
- [27] ROSA FILHO, L. F. **Avaliação do desempenho de uma rede de sensores sem fio no cultivo de cana-de-açúcar**. Mestrado, UNICAMP, Faculdade de Tecnologia, 2012.
- [28] SCOT. **Implantação de sistemas de pastejo rotacionado**. Disponível em <<http://www.scotconsultoria.com.br/noticias/artigos/21544/implantacao-de-sistemas-de-pastejo-rotacionado.htm>>. Acesso em: 3 dez. 2013, 2009. SCOT Consultoria.
- [29] SENAI-SP. **Fundamentos de eletrônica – diodos**. Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAvmEAJ/fundamentos-eletronica-diodos>>. Acesso em: 13 dez. 2013, 2012. 10 p.
- [30] SILVA, A. L.; CUTIN, M.; MACHADO, S. **Sistema de levitação eletromagnético controlado por computador**. Monografia de Graduação, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. 99 p.
- [31] SILVA, C. V. R.; NETO, E. M. B.; PIVA, L. P. **Uma ferramenta para estudo do microcontrolador**. Monografia de Graduação, Departamento de Computação, Universidade Católica de Goiás, Goiás, 2006. 116 p.
- [32] SILVA, F. A. **Avaliação de abordagens de gerenciamento para redes de sensores sem fio**. Mestrado, UFMG, Instituto de Ciências Exatas, 20006.
- [33] SILVA, S.; NASCIMENTO JÚNIOR, D.; SBRISSIA, A.; PEREIRA, L. **Dinâmica de população de plantas forrageiras em pastagens**. *IV Simpósio sobre Manejo Estratégico da Pastagem*, p. 75–99, 1998.

- [34] SOUSA, U. L.; PEREIRA, T. R. **Fotodiodos e fototransistores**. Disponível em <<http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/Uilian&Thiago.pdf>>. Acesso em: 5 out. 2013, 2004. 2 p.
- [35] THEBAS, V. **Características dos Sensores**. Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, 2009.
- [36] THOMAZINI, D. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. Editora Érica, 2005.
- [37] UFMS, F. **Destacom – tutorial polars**. Disponível em <http://destacom.ufms.br/wiki/Tutorial_Polar>. Acesso em: 13 dez. 2013, 2013. 21 p.
- [38] VIEIRA, D. M.; MOREIRA JÚNIOR, J. P. **Automatização do processo de interceptação luminosa em pastagens: Evolução do protótipo medidor de luminosidade e implementação da rede de sensores sem fio**. Monografia de Graduação, Departamento de Computação, Universidade Católica de Goiás, Goiás, 2011. 101 p.