UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

DIEGO MIGUEL NUNES

SISTEMA SEGUIDOR SOLAR DESTINADO A CAPTAÇÃO, TRANSFERÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE LUMINOSIDADE

CAXIAS DO SUL

2017

DIEGO MIGUEL NUNES

SISTEMA SEGUIDOR SOLAR DESTINADO A CAPTAÇÃO, TRANSFERÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE LUMINOSIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador Prof. Ms Ricardo Leal Costi.

CAXIAS DO SUL

2017

DIEGO MIGUEL NUNES

SISTEMA SEGUIDOR SOLAR DESTINADO A CAPTAÇÃO, TRANSFERÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE LUMINOSIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovado em ___/___/_____

Banca Examinadora

_____

Prof. Ms. Ricardo Leal Costi
Universidade de Caxias do Sul – UCS

_____

Prof. Dr. Diorge Alex Báo Zambra
Universidade de Caxias do Sul – UCS

_____

Prof. Dr. Eduardo Nabinger
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Ao meu avô Francisco Lopes Miguel (in memoriam). Homem engenhoso na qual me inspirou a seguir essa profissão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, à Deus, por nos disponibilizar a cada dia uma nova oportunidade de realizar nossos sonhos.

À minha noiva Gabriele Porto, por acreditar sempre em mim, nas minhas escolhas e se fazer presente em todos os momentos.

Aos meus pais Elcio e Cândida, pelo apoio, incentivo e por todo o suporte prestado, aos meus irmãos Eder e Henrique pela ajuda e companheirismo e ao meu sogro Sergio Porto pelo incentivo e ideias compartilhadas.

Ao meu orientador professor Ricardo Leal Costi, pelas suas ideias, orientações, pela amizade e pelo engajamento no desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas da UCS, em especial ao André Carraro, Guilherme Moreira e Alex Garbin, pelo companheirismo e apoio prestado.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,
mas pensar o que ninguém ainda pensou
sobre aquilo que todo mundo vê.”
Arthur Schopenhauer

RESUMO

A luminosidade é um recurso essencial no cotidiano do homem, quando disposto de forma correta possibilita a execução de tarefas com maior conforto e qualidade. Este trabalho tem como premissa realizar o estudo inicial e prototipagem de um sistema seguidor solar com sistema de captação, transferência e distribuição luminosa. Capaz de utilizar a luminosidade natural proveniente do sol e disponibiliza-la de forma pontual a ambientes internos de edificações com eficiência energética superior a sistemas de iluminação convencionais. Considera-se também neste trabalho o estudo do sistema de transferência e difusão luminosa. Inicialmente apresenta-se as características de posicionamento, características da luminosidade e aspectos do controle e acionamentos que englobam o sistema proposto. Posteriormente, apresenta-se o dimensionamento e integração dos componentes visando a integração do protótipo. O estudo apresenta também a documentação dos testes finais e resultados que demonstram a competitividade da utilização da luminosidade solar como fonte alternativa, com protótipo obtendo aproximadamente 40 lúmens com uma área de captação reduzida de 0,00382 m². Por fim apresenta-se sugestões de aspectos destinados ao estudo em trabalhos futuros.

Palavras chave: Luminosidade, Seguidor Solar, Energia renovável, Eficiência Energética, Controle Automático, Sensores, Fibra Optica.

ABSTRACT

The luminosity is an essential resource in man's daily life, when correctly disposed, allows the performance of tasks with greater comfort and quality. This work has as premise to carry out the initial study and prototyping of a solar tracking system with capture, transfer and light distribution system. Able to use the natural luminosity from the sun and make it available in a specific way to internal environments of buildings with energy efficiency superior to conventional lighting systems. Also considered in this work is the study of the light transfer and diffusion system. Initially, we present the positioning characteristics, characteristics of the luminosity and aspects of the control and drives that encompass the proposed system. Subsequently, the design and integration of the components are presented, aiming the integration of the prototype. The study also presents the documentation of the final tests and results that demonstrate the competitiveness of the use of solar luminosity as an alternative source, with a prototype obtaining approximately 40 lumens with a reduced catchment area of 0.00382 m². Finally, we present some suggestions for future studies.

Keywords: Luminosity, Solar Tracker, Renewable Energy, Energy Efficiency, Automatic Control, Sensors, Fiber Optics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Aplicação proposta para luminosidade solar. 17
Figura 2 - Taxas médias mundiais de crescimento anual de energia renovável. 18
Figura 3 – Ilustração do espectro eletromagnético do sol. 21
Figura 4 – Taxas variação angular do dia solar. 22
Figura 5 – Sistema equatorial celeste. 23
Figura 6 - Sistema de comunicação por fibras opticas. 28
Figura 7 – Espectro utilizado em sistemas de fibra optica. 29
Figura 8 – Lente convergente duplo convexo. 31
Figura 9 – Aberturas de um obturador. 32
Figura 10 - Compósito de vidro polarizado 32
Figura 11 – Arquitetura de um microcontrolador. 34
Figura 12 – Diagrama de blocos de um sistema em malha aberta. 35
Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada. 36
Figura 14 – Erros em regime permanente e transitório. 37
Figura 15 - Curva de sensibilidade de uma Célula Fotocondutiva. 39
Figura 16 – Curva de sensibilidade de um fotodiodo. 40
Figura 17 – Diagrama de blocos do projeto do módulo I. 42
Figura 18 – Diagrama do projeto do módulo II. 43
Figura 19 – Orientações do protótipo. 44
Figura 20 – Curvas de sensibilidade dos sensores. 46
Figura 21 – Gráfico do teste dos sensores de luminosidade. 47
Figura 22 – Cone sensor. 48
Figura 23 - Igualdade na incidência de ondas IR no cone sensor. 48
Figura 24 – Diferença na incidência de ondas IR no cone sensor. 49
Figura 25 – Calibração digital dos sinais do cone sensor. 51
Figura 26 - Curva de resposta temporal do cone sensor. 52
Figura 27 – Servomotor MG995. 53
Figura 28 – Modulação por largura de pulso. 54
Figura 29 – Modulação por largura de pulso gerada. 54
Figura 30 – Esquema elétrico. 55
Figura 31 – Fluxograma. 57
Figura 32 – Resposta típica de um sistema de 2ª ordem. 58

Figura 33 – Sistema de captação intensificador. 59
Figura 34 - Feixe de fibra opticas PMMA. 60
Figura 35 – Modelo Virtual em 3D. 61
Figura 36 – Modelo real finalizado do protótipo. 61
Figura 37 – Posicionamento para Testes. 62
Figura 38 – Amplitude efetiva do local instalado. 63
Figura 39 – Iluminância solar e iluminância transferida. 63
Figura 40 – Curva de resposta do cone sensor. 64
Figura 41 – Trajetória solar no dia amostrado. 65
Figura 42 – Simulado virtual da trajetória amostrada. 65
Figura 43 – Medição da iluminância solar e transferida. 66
Figura 44 – Eficiência energética de fontes de iluminação. 69
Figura 45 – Projeto do difusor luminoso. 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teste sensores de luminosidade.....46
Tabela 2 - Ensaio entre faixa de valores e luminosidade equivalente.....50

LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico Digital
ABILUX	Associação Brasileira da Indústria de Iluminação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NA	Abertura Numérica
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
AR	Ascenção Reta
CAF	Banco de Desenvolvimento da América Latina
CPU	Central Processing Unit
D/A	Digital Analógico
DRAM	Dynamic Random Access Memory
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPROM	Erasable Programmable Read Only Memory
K	Unidade de Temperatura Kelvin
LDR	Ligth Dependent Resistor
LED	Light Emitting Diodes
N	Unidade de Força Newton
NBR	Norma Brasileira
PID	Proportional, integral, derivative
PMMA	Polimetilmetacrilato
PROM	Programmable Read Only Memory
PVC	Policloreto de Polivinila
PWM	Modulação por largura de pulso
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
SI	Sistema Internacional de Unidades
SRAM	Static Random Access Memory
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
THz	Terahertz
UCS	Universidade de Caxias do Sul
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UV	Ultravioleta
V	Unidade de Tensão Volt
W	Unidade de Potência Watt

SUMÁRIO

1. **INTRODUÇÃO** 16
1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO 18
1.2 OBJETIVOS 19
1.2.1 Objetivo geral 19
1.2.2 Objetivos específicos 19
1.3 ESCOPO E RESTRIÇÕES ESPECIFICAS 20

2. REFERENCIAL TEÓRICO 21
2.1 ASPECTOS DO SOL 21
2.1.1 Movimento anual do sol 21
2.2 A LUMINOSIDADE 24
2.2.1 Luminosidade natural 24
2.2.2 Luminosidade artificial 25
2.2.3 Iluminância e luminância 25
2.2.4 Transmitância luminosa 26
2.2.5 Fibras óticas 27
2.2.6 Lentes 30
2.2.7 Comutação luminosa 31
2.3 CONTROLE E ACIONAMENTOS 33
2.3.1 Microcontroladores 33
2.3.2 Métodos de controle 34
2.3.2.1 Sistema de controle por malha aberta 35
2.3.2.2 Sistema de controle por malha fechada 36
2.3.2.3 Precisão e tipos de erros 36
2.3.2.4 Sensibilidade e Estabilidade 37
2.3.3.Sensoriamento 38
2.3.3.1 Células fotocondutivas 38
2.3.3.2 Fotodiodos 39
2.3.4 Acionamentos Elétricos 40
2.3.4.1 Motor de passo 41
2.3.4.2 Servomotores 41

3. MATERIAIS E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO 42
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL PROPOSTO 42
3.1.1 Sistema Controlador 44
3.1.2 Sensoriamento 45
3.1.3 Acionamentos 52
3.1.4 Esquema Elétrico 55
3.1.5 Desenvolvimento do Algoritmo Operacional 55
3.1.5 Captação Luminosa 58
3.1.6 Cabo de Transmissão Luminosa 59
3.2 INTEGRAÇÃO DOS COMPONENTES 60

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 62
4.1 POSICIONAMENTO DO PROTÓTIPO PARA TESTES 62
4.2 PERÍODO EEFICIENTE E INTENSIDADE LUMINOSA 63
4.3 CURVA DE RESPOSTA DO CONE SENSOR 64
4.4 TRAJETÓRIA AO LONGO DO DIA AMOSTRADO 65
4.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA 66

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 70

6. CONCLUSÃO 72

REFERÊNCIAS 73

APÊNDICE A 76

1. INTRODUÇÃO

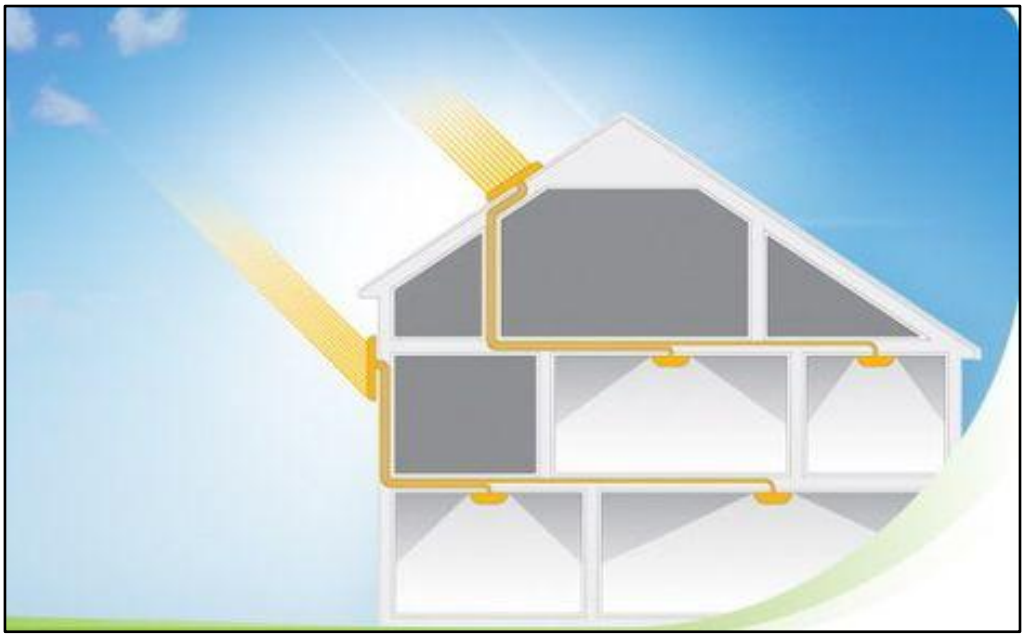
A busca por energias renováveis é uma tendência mundial crescente e irreversível. Devido a necessidade de consumo cada vez maior de demandas energéticas. Dentro desta perspectiva o Brasil possuí como principal fonte para sua matriz energética a geração hidrelétrica, seguida pela geração através de combustíveis fósseis e em menor patamar a utilização de energia eólica e solar. (ANEEL, 2008).

O sol fornece em torno de $1{,}5x10^{18}$ kWh para atmosfera terrestre, algo aproximadamente 10.000 vezes a demanda energética mundial por hora (LUQUE e HEGEDUS, 2011). O Brasil apresenta uma insolação considerável em seu território, segundo divulgação do Atlas Solarimétrico do Brasil (TIBA, 2000), torna-se interessante a exploração da energia fornecida pelo sol.

Entre os processos possíveis de aproveitamento da energia solar, os mais difundidos atualmente são para o aquecimento de água e para geração fotovoltaica de energia elétrica, respectivamente. Essas aplicações necessitam de algum tipo de beneficiamento dessa energia afim de torna-la um produto comercial e útil, porem em algumas situações as perdas ocasionadas por transformações desfavorecem o balanço entre vantagens e desvantagens, inviabilizando sua utilização.

A energia emitida pelo sol, transmitida até a superfície terrestre sob a forma de radiação eletromagnética, pode ser segregada em radiação ultravioleta e luz visível, considerado como tema de estudo a segunda parte, abordado a luminosidade como recurso neste trabalho. A luminosidade sempre foi amplamente demandada em todo tipo de construção civil realizada pelo homem, grande parte desta é de origem artificial e uma pequena parcela provem de fontes naturais, incididas em regiões internas de edificações através de aberturas superiores e/ou laterais como portas, janelas e claraboias. Visando reverter esse quadro este trabalho consiste no desenvolvimento de um protótipo de um sistema seguidor solar capaz de captar a luminosidade solar natural de áreas externas, transportá-la e disponibiliza-la de forma direta a ambientes internos ou ambientes desprovidos de qualquer tipo de luminosidade. Podendo suprir toda necessidade luminosa do ambiente de acordo com a necessidade requerida. A Figura 1 exemplifica a utilização da luminosidade solar, sendo captada e transportada a ambientes internos através de condutores dedicados.

Figura 1– Aplicação proposta para luminosidade solar.



Fonte: TREEHUNGGER (2009).

O emprego de energias alternativas requer a utilização de novos materiais e técnicas que minimizam a utilização dos recursos de manufatura e operação, afim de torna-los eficientes e financeiramente competitivos frente a energias convencionais e de ciclo finito. Como os raios solares não incidem uniformemente sobre a crosta terrestre, devido ao movimento continuo dos astros, se faz necessário uma ação para aumentar a eficiência energética. Considerando isso, o elemento de captação de luminosidade tem sua mobilidade controlada em dois graus de liberdade de forma a atingir sempre o ponto da máxima potência disponível, contendo sensores responsáveis pela quantização da luminosidade e definição da direção de trabalho, o controle do sistema será efetuado a através de uma plataforma dedicada com controlador lógico programável.

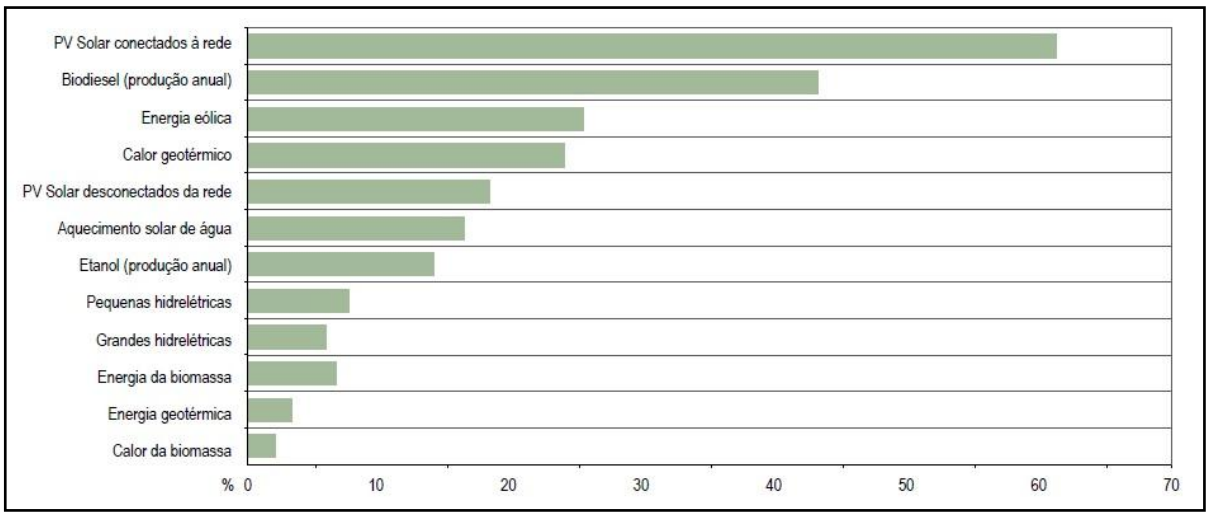
Considerando os avanços arquitetônicos, com formas e geometrias cada vez mais desafiadoras e complexas das construções, uma funcionalidade atribuída ao sistema é a flexibilidade, longas distancias e reduzido dimensional do veículo responsável pelo transporte da luminosidade captada até a área de difusão, o sistema possui também uma característica capaz de filtrar a radiação ultravioleta, altamente nociva a seres humanos e degradantes de itens comumente presentes internamente nas edificações se expostos por um longo período.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O custo da tarifa de energia elétrica corresponde através da soma dos custos de geração de energia, transmissão e encargos tributários, sendo que o custo médio da tarifa residencial em território nacional no ano de 2016 atingiu o patamar de R$ 0,32 por KWh consumido. A crescente demanda da energia elétrica evidencia uma economia em pleno crescimento, porem avaliando em contexto, existem fatores negativos como o esgotamento de recursos naturais utilizados na geração e o alto impacto ambiental. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) produziu um planejamento de expansão que prevê a diversificação da matriz energética que historicamente é concentrada na geração por meio de fontes hídricas. (ANEEL, 2008).

A escolha sobre a utilização da energia solar ocorre devido ao potencial de expansão mundial deste recurso, com aumento de mais de 2.000% entre os anos de 1996 e 2006. Crescimento fomentado através de ações governamentais de países desenvolvidos como Alemanha, com 49% da potência instalada, além de Estados Unidos, Japão e Espanha, que juntos concentram 84% da capacidade mundial, ambos compatibilizam com objetivo de diversificar e limpar a matriz energética local. (ANEEL, 2008). A Figura 2 evidencia a expressiva taxa de crescimento anual e ampla representatividade da cadeia de aplicações dos recursos solar.

Figura 2 - Taxas médias mundiais de crescimento anual de energia renovável.



Fonte: ANEEL (2008).

Atender as necessidades de sustentabilidade, evidenciando a conscientização e apelo ambiental são visados atualmente em instituições de ponta. Fomentando a integração entre novas tecnologias e o beneficiamento de recursos renováveis, limpos e disponíveis a baixo custo pois possibilitam o acesso de fundos de investimentos chamados verdes, disponibilizados por organizações financeiras e fundos de investimento com taxas reduzidas e captação de quantidades maiores de crédito. (CAF, 2017).

A necessidade de iluminar lugares faz com que os setores residenciais, comercias e públicos consumissem cerca de 13% da eletricidade do país, em 2015, somente com iluminação. Algo que representa de 12% à 20% no valor da fatura das residências, enquanto no setor comercial varia entre 44% e 70% da energia consumida e o setor público dispende cerca de 4% do seu consumo para esse fim. (ABILUX, 2015).

O sistema proposto fornece como produto uma fonte auxiliar de luminosidade a ambientes internos de forma rentável, eficiente e de grande aplicabilidade. Visando atender plenamente as necessidades luminosas genéricas e especificas dos setores residenciais, comerciais e industriais, uma vez que o período de uso corresponda simultaneamente com período de insolação local.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolvimento de um protótipo de sistema dedicado a transportar a luminosidade proveniente do sol para ambientes internos, identificando a máxima potência da intensidade luminosa solar e direcionando a captação conforme o interesse, buscando o maior aproveitamento possível deste recurso.

1.2.2 Objetivos específicos

Visando alcançar o objetivo geral, os itens relacionados abaixo compõem os objetivos específicos deste trabalho:

a) Definir um sistema sensorial de quantização direcional da luminosidade solar;
b) Definir um sistema de movimentação em dois graus de liberdade com controle angular de posição;
c) Definir um sistema de captação, transferência e distribuição de luminosidade;
d) Definir um projeto de desenvolvimento de produto a ser implementado.

1.3 ESCOPO E RESTRIÇÕES ESPECIFICAS

Como o intuito deste trabalho é o desenvolvimento de sistema alternativo de iluminação, o escopo se limitara e concentrará em alguns requisitos, sendo eles:

a) Sensoriamento da luminosidade;
b) Controle de posicionamento angular;
c) Captação da luminosidade;
d) Transferência de luminosidade;
e) Elaboração da plataforma com hardware microcontrolador;
f) Difusão de luminosidade;
g) Modelagem e execução em 3D.

Devido a abrangência dos tópicos citados não fazem parte do escopo deste trabalho:

a) Integração com sistemas convencionais de luminosidade artificial;
b) Elaboração do hardware dedicado a acionamento de servomotores.

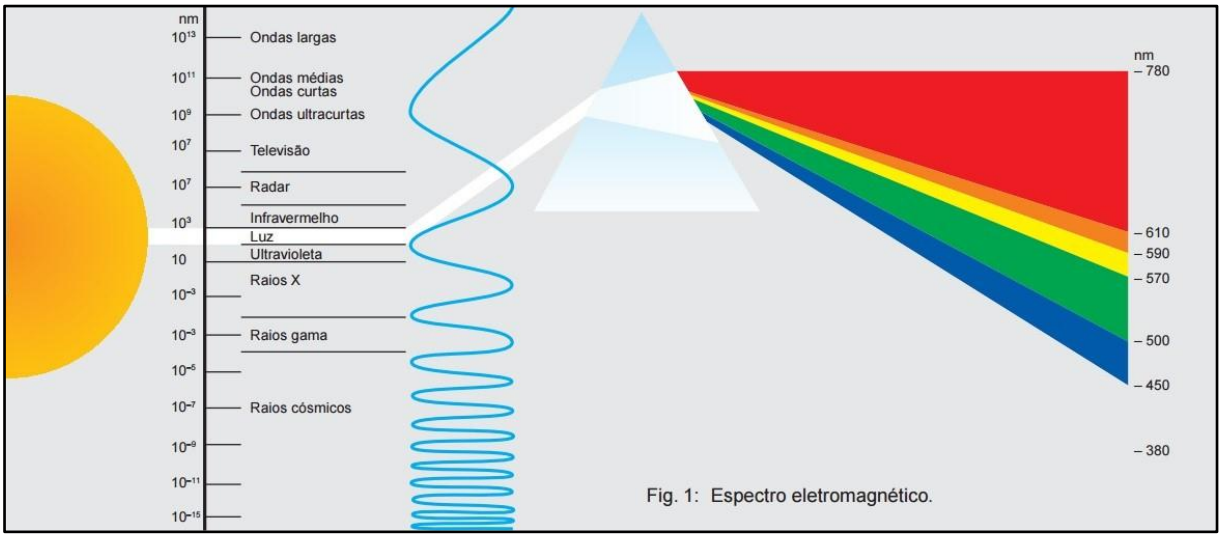
2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos que estão relacionados ao desenvolvimento deste trabalho.

2.1 ASPECTOS DO SOL

Particularmente o sol sempre foi reconhecido como a principal fonte de energia, disponibilizando luz e calor ao planeta terra de forma continua. O astro basicamente é uma esfera de gás incandescente e sua energia é proveniente através de reações termo nucleares. (COMETTA,1978). A Figura 3 apresenta uma ilustração do espectro eletromagnético do sol, evidenciando os comprimentos de luz visível.

Figura 3 – Ilustração do espectro eletromagnético do sol.



Fonte: OSRAM (2008).

2.1.1 Movimento anual do sol

A Terra realiza um movimento de translação ao redor do sol chamado de Eclíptica e um segundo movimento rotacional em seu próprio eixo, devido a isso o sol

observado apresenta uma trajetória cronologicamente bem definida e constante. (UFRGS, 2006).

Através de um referencial fixo sobre o solo é possível observar que o sol realiza uma trajetória de ciclo diária de leste a oeste com ápice ao meio dia, posição na qual o sol atinge sua maior altura, variando também gradativamente sua posição sobre o horizonte em 0,986° a cada dia solar. A Figura 4 ilustra a variação de um dia solar, período entre duas passagens sucessivas do sol no mesmo meridiano. (UFRGS, 2006).

Figura 4 – Taxas variação angular do dia solar.



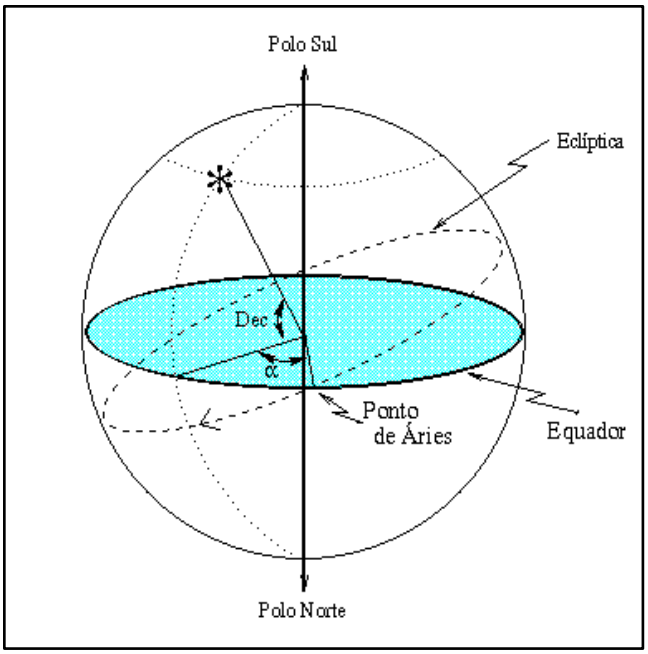
Fonte: UFRGS (2006).

Se faz necessário o uso de um sistema de coordenadas para definir a posição de um astro no céu, dispondo de algum sistema de coordenadas astronômicas é possível obter referências angulares e distanciamento entre astros.

O sistema equatorial celeste apresentado na Figura 5 é um sistema atrelado a esfera celeste, sendo assim suas coordenadas não dependem do lugar e do instante do observador. Utiliza como referência e como plano fundamental o equador celeste, pode-se atribuir a esse movimento as coordenadas de ascensão reta e a declinação. A coordenada de ascensão reta (α ou AR) é a medida de ângulo extraída sobre o equador, no sentido horário, no meridiano com origem a partir do ponto inicial de aries e extremidade do círculo vertical do astro, sua abrangência vai de 0h à 24h ou 0º à

360º. O ponto de Aries, também denominado de ponto Vernal, é o ponto no instante em que o sol cruza a linha do horizonte vindo do hemisfério sul. A coordenada de declinação (θ ou DC) é a medida de angulo com origem sobre o equador para a extremidade circunda do astro, sobre seu círculo vertical, sua abrangência é determinada de -90º à +90º. De forma a complementar a coordenada de declinação e torna-la absoluta, é possível adicionar a distância polar (Δ), sendo o ângulo medido com origem no polo até a extremidade do astro, sobre seu círculo vertical, atingindo assim uma variação totalmente positiva de 0º à 180º. (UFRGS, 2006).

Figura 5 – Sistema equatorial celeste.



Fonte: UFRGS (2006).

A energia emitida pelo sol é propagada pelo espaço através das ondas eletromagnéticas, graças a uma característica importante de qualquer onda, o fato de transportar energia sem necessariamente levar consigo matéria ou massa. Outras características também são presentes como geração, armazenamento e dissipação de energia. Sua energia só é transferida quando a onda propagada encontra algum objeto em seu caminho, a taxa de fluxo de energia pode ser descrita pelo vetor de Poynting (S). Onde a direção de S segue o sentido de propagação da onda e sua unidade no Sistema Internacional é W/m^2, μo é a permeabilidade do vácuo e as

componentes do vetor campo elétrico $\boldsymbol{E}$ e do vetor campo magnético $\boldsymbol{B}$. (OKUNO e VILELA, 2005). Representado pelo produto vetorial representado na Equação 1.

$$S = \frac{1}{\mu o}\, E * B \tag{1}$$

2.2 A LUMINOSIDADE

A luminosidade é um fator de extrema importância a ser considerada em edificações, levando em consideração aspectos quantitativos (parâmetro mínimo de iluminação por atividade) e aspectos qualitativos (tipos de luminárias e fontes de luz). Uma intensidade luminosa dimensionada de forma inadequada poderá implicar em uma redução e dificuldade do desenvolvimento de atividades, assim como ocasionar distúrbios e fadiga visual, dores de cabeça e ofuscamento da visão, impactando diretamente em oscilações de produtividade.

Todo corpo que emite luz pode ser considerado como uma fonte de luminosidade, proveniente de meios artificiais ou naturais, citando como exemplo a luminosidade artificial fornecida por uma lâmpada de LED e a luminosidade natural proveniente do sol, que por sua vez fornece luminosidade tanto no período diurno quanto noturno, forma direta e indireta através dos fenômenos de reflexão, refração e difusão dos seus raios ao incidirem sobre meios translúcidos e corpos como a lua, nuvens, vegetação e edifícios.

2.2.1 Luminosidade natural

A luz natural, ou qualquer outra fonte de luz, é uma forma de manifestação de energia que pode ser observada a olho nu, de acordo com a fisiologia de cada indivíduo geralmente o olho humano é sensível a faixa de comprimentos de onda que variam entre 380 e 760 nm. Sistemas de iluminação que utilizam a luz natural compartilham do mesmo objetivo que é prover uma certa quantidade de luminosidade, conforme a necessidade especifica de cada proposta, e fomentar um bom desempenho e conforto visual. (ROBBINS, 1986).

Como as outras fontes de luz, a intensidade da iluminação natural também precisa ser controlada. A penetração da luz direta do Sol nos compartimentos, principalmente sua incidência sobre os planos de trabalho, podem trazer o inconveniente do ofuscamento, que é uma das causas mais comuns da fadiga visual.

A utilização controlada da luminosidade pode ser obtida através de sistemas de iluminação natural, sendo todos dispositivos mecânicos cuja a finalidade seja permitir ou bloquear a entrada de luminosidade natural, como cortinas, persianas, venezianas, etc. Todos esses dispositivos podem receber acionamentos elétricos de forma a torna-los controláveis logicamente. (MURATORI e DAL BÓ, 2013).

2.2.2 Luminosidade artificial

É possível promover o máximo possível do desuso de iluminação artificial durante o dia porem não eliminá-la por completo, uma vez que sistemas artificiais de iluminação devem ser considerados em qualquer projeto de edificação devido a oscilações de energia comumente presentes em fontes naturais. A variação luminosa natural ao longo do dia não pode ser considerada em ambientes que requerem uma taxa de constante de luminosidade.

As luminosidades artificiais provem de elementos cuja finalidade seja a emissão de luz de forma controlada e quantizada. Comercialmente existe uma variedade de tipos de fontes artificiais como exemplo as lâmpadas LED, fluorescentes, alógenas, etc.

Segundo SZOKOLAY (1984) o uso conjugado da luz artificial e natural pode contribuir tanto para economia de recursos energéticos, aumentando assim a satisfação dos consumidores.

2.2.3 Iluminância e luminância

Iluminância e luminância são grandezas da luminosidade (E) e relacionam o modo com que o fluxo luminoso é incidido sobre uma área ou superfície.

Entende-se por iluminância todo fluxo luminoso que incide e se distribui em uma determinada área iluminada, situada a uma distância mensurável da fonte luminosa. (MOREIRA, 1999). A unidade no SI para iluminância é o lux (lx) e obtido através da Equação 2, sendo a razão do fluxo luminoso (dF) pela área iluminada (dA), onde a unidade de medida do fluxo luminoso é o Lúmen (lm) e a área quantizada em metros quadrados. (ABNT, 2012).

$$lx = \frac{dF}{dA} \tag{2}$$

Ao dimensionar a distribuição luminosa em ambientes diversos, devem ser considerados diferentes níveis de iluminância requeridos de acordo com cada atividade realizada. A norma NBR 5413 classifica e especifica os variados níveis mínimos exigidos de iluminância em ambientes interiores.

A luminância por sua vez é descrita pela quantidade do fluxo luminoso que atravessa ou é refletida por uma superfície, em particular em um determinado ângulo. Quantifica também a energia luminosa que pode ser percebida pelo olho humano, indicando o brilho da luz refletida ou emitida de uma superfície. (COSTA, 2006). A unidade no SI para luminância (L) é candela por metro quadrado (cd/m2) e obtido através da Equação 3, onde A é a área da superfície em m², α é a direção da observação, em graus, I é a intensidade luminosa em candelas (cd) e L luminância em cd/m². (ABNT, 2012).

$$L = \lim_{\Delta A \to 0} \frac{dI}{dA \cos \alpha} \tag{3}$$

2.2.4 Transmitância luminosa

As fontes de luz transmitem energia em pacotes chamados *fótons*, seu nível energético está diretamente relacionado a frequência de propagação da onda de luz, conforme determinada na Equação 4, onde a resposta é obtida em watts e h

representa a constante de Plank e é igual a 6,624x10^{-34} joule por segundo. (BOYLESTAD, 2004).

$$W = hf \tag{4}$$

A frequência (f) por sua vez está diretamente associada ao comprimento de onda (λ) e a velocidade da luz (V) equivalente a 3x10^{8} m/s, conforme a Equação 5, normalmente mensurado em micrômetros (μm) e equivalendo uma unidade a 10^{-6} metros. (BOYLESTAD, 2004).

$$f = \frac{V}{\lambda} \tag{5}$$

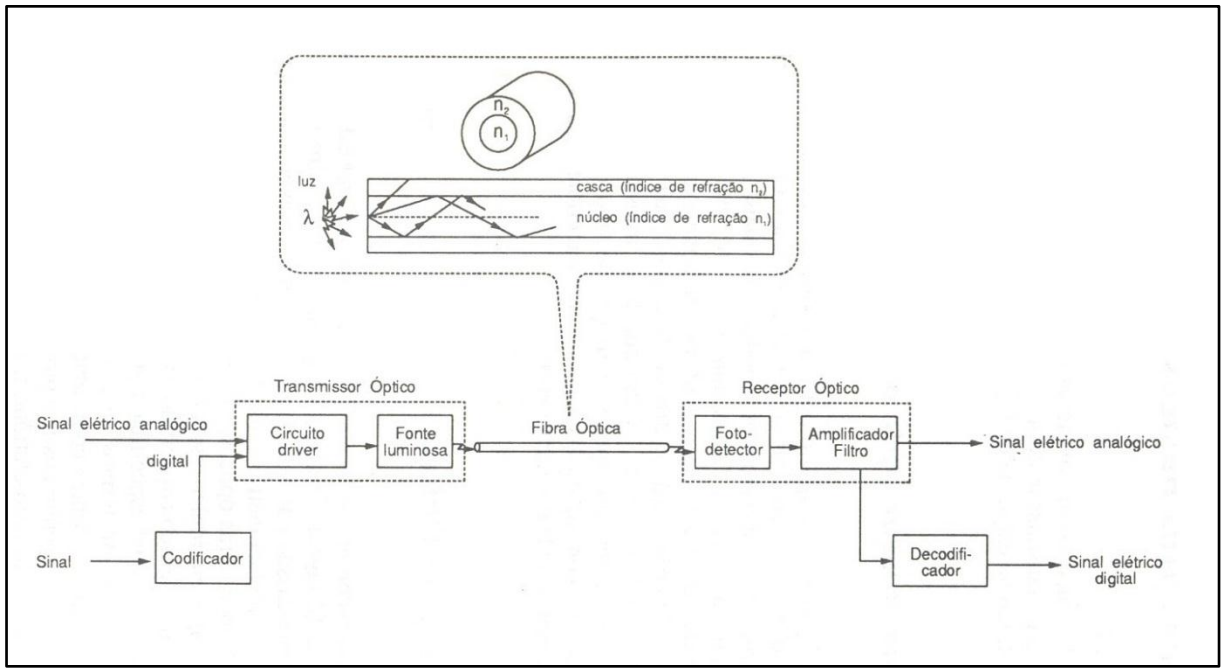
A escolha do tipo de transmissor deve levar em consideração o comprimento de onda que se está trabalhando, pois, cada material utilizado no transmissor tem uma resposta espectral relativa ao número de elétrons livres presentes no material, proporcional a intensidade do fluxo luminoso transportado.

2.2.5 Fibras óticas

De modo geral um sistema composto por fibras opticas tem finalidade básica de comunicação, transferindo informações de um ponto a outro com extrema rapidez utilizando as propriedades físicas da luz. Conforme a Figura 6 constitui-se basicamente de um transmissor optico, um receptor optico e um cabeamento de fibra optica. O transmissor optico é o dispositivo básico ativo do sistema, contendo um driver associado a um elemento emissor de luz (diodos laser ou diodos eletroluminescentes) responsável pela tarefa de conversão de sinais elétricos (analógicos ou digitais) em pulsos ópticos. A capacidade de transmissão, bem como a potência luminosa emitida estão diretamente relacionados ao dispositivo

transmissor. O receptor optico, por sua vez, é responsável pela conversão dos pulsos opticos detectados (fotodiodos *pin*, e fotodiodos de *avalanche*) em sinais elétricos, é composto de um elemento fotodetector com um sistema eletrônico de amplificação e filtragem do sinal elétrico convertido. A fibra optica corresponde ao meio onde a potência luminosa é conduzida, sentido emissor ao receptor, constituída por um núcleo com alto índice refração (vidro ou material polimérico), um encapsulamento com índice de refração menor que o núcleo, também podendo estar envolto de materiais de proteção mecânica, química e ambiental. (GIOZZA, 1991).

Figura 6 - Sistema de comunicação por fibras opticas.



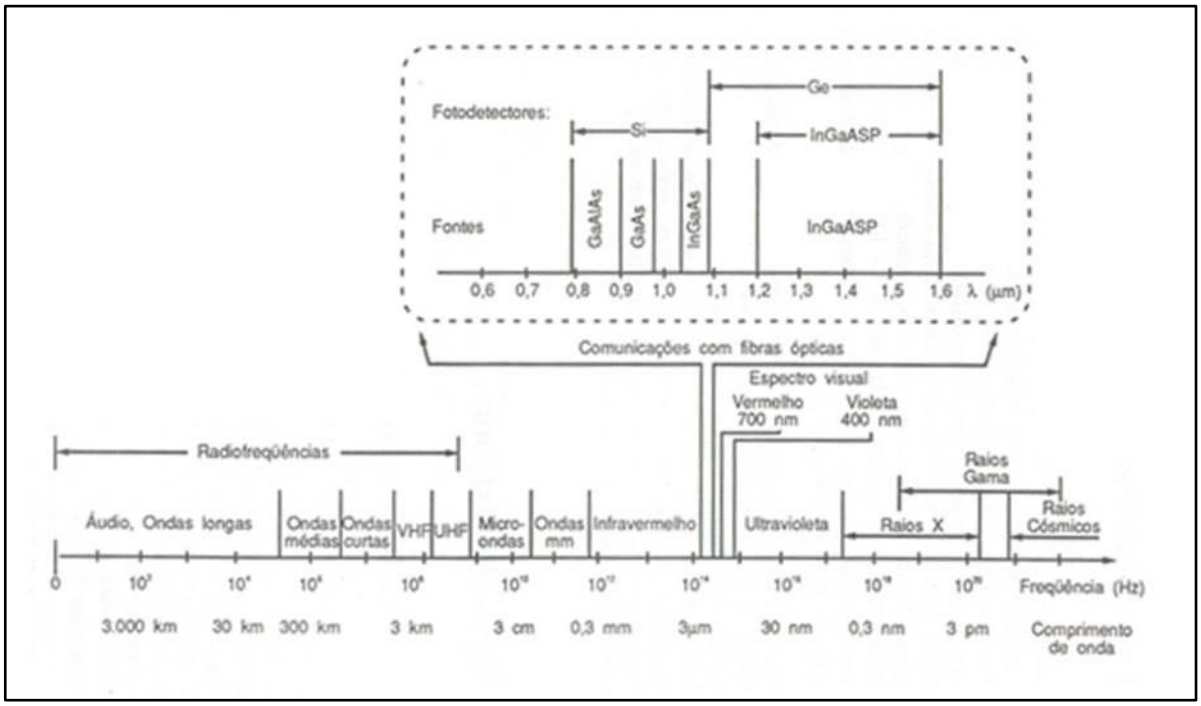
Fonte: GIOZZA (2017; p. 14).

A banda passante de uma fibra depende do seu comprimento, geometria e índice de refração, onde é possível classifica-las em *monomodo* e *multimodo.* A classe de monomodo possuem uma maior capacidade de transmissão e dimensional reduzido, seu único modo (via) de propagação transmite somente o raio axial enquanto as fibras da classe multimodo possuem vários modos (feixe de vias), de propagação, inclusive subclassificadas pelo índice de refração em: *índice degrau* e *índice gradual* (bandas passantes superiores as com índice degrau). (GIOZZA, 1991).

Como qualquer outro meio de comunicação, as fibras opticas podem sofrer atenuação do sinal transportado em decorrência de imperfeições de fabricação e perdas por absorção atribuídas ao material que compõem a fibra, principalmente sílica e dopantes semicondutores. Isso requer a utilização de regiões espectrais onde essa atenuação é a mínima possível, conhecidas como *janelas de transmissão*, permeando nos comprimentos de onda de 850, 1300 e 1550 nm. (GIOZZA, 1991).

As frequências opticas utilizadas nos sistemas de comunicação são referenciadas em comprimentos de onda, conforme a Figura 7, deste a faixa inicial do espectro do infravermelho (100 µn), espectro visível (390 à 770 nm) até o espectro ultravioleta (50 nm). No quesito frequência de transmissão de dados é possível atingir frequências de operação elevadas, entre 100 e 1000 THz, tornando a capacidade de transmissão muito maior que métodos convencionais de pares de fios trançados. (GIOZZA, 1991).

Figura 7 – Espectro utilizado em sistemas de fibra optica.



Fonte: GIOZZA (2017; p. 15).

A espessura do condutor é reduzida, com o núcleo podendo atingir 8 µm (equivalente a um fio de cabelo), custo menor relativo a sistemas convencionais e

inexistência de distúrbios, ruídos e interferências devida aos efeitos eletromagnéticos presentes em condutores de corrente e de fatores externos como relâmpagos. Opera a distâncias máximas de 150 km sem o uso de repetidores (receptor, amplificador e transmissor), linhas de fibra ótica oceânicas utilizam um combinado de seções e repetidores para comunicação entre continentes.

O uso de fibras opticas esta transpondo a barreira da comunicação e sendo utilizada desde a sinalizações, iluminação interna e externas na indústria automobilística, na arquitetura e construção civil a equipamentos destinados a manufatura industrial, como centros de corte e gravação a laser.

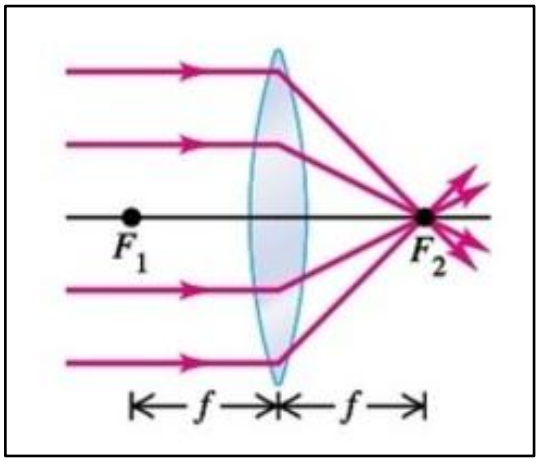
2.2.6 Lentes

A reflexibilidade dos raios determina a sua tendência a ser refletido e o ângulo de reflexão ou refração corresponde ao ângulo perpendicular à superfície refletora ou refratora no ponto de incidência. O ponto na qual os raios de luz divergem ou convergem é chamado de *foco* dos raios. (NEWTON, 2002).

A lente é um dispositivo optico com duas superfícies refratoras suficientemente próximas, de modo a desprezar os efeitos da espessura sobre a luz, possuem um formato delgado e são fabricadas em vidro ou material plástico translucido. Tem a propriedade de alterar o sentido dos raios que incidem paralelamente sobre o eixo de uma de suas superfícies, convergindo ou divergindo a luz de acordo com formato das superfícies.

É denominada lente convergente toda lente que faz com que um feixe paralelo ao eixo focal, ao atravessa-la, acabe convergindo para um único ponto, chamado ponto focal. A Figura 8 ilustra uma lente convergente com duas superfícies convexas, a distância focal (f) obtida a partir do centro da lente, o primeiro foco ($F1$) e segundo foco ($F2$). (YOUNG, 2002).

Figura 8 – Lente convergente duplo convexo.



Fonte: YOUNG (2002).

Qualquer lente que apresente uma espessura maior em seu centro do que em sua periferia é uma lente convergente com distancia focal positiva. Isso pode ser provado de acordo com a equação dos fabricantes de lentes, apresentada na Equação 6, equacionando o índice de refração do material (n), a distância focal (f) e os raios de curvatura das superfícies ($\mathrm{R1}$, $\mathrm{R2}$). (YOUNG, 2002).

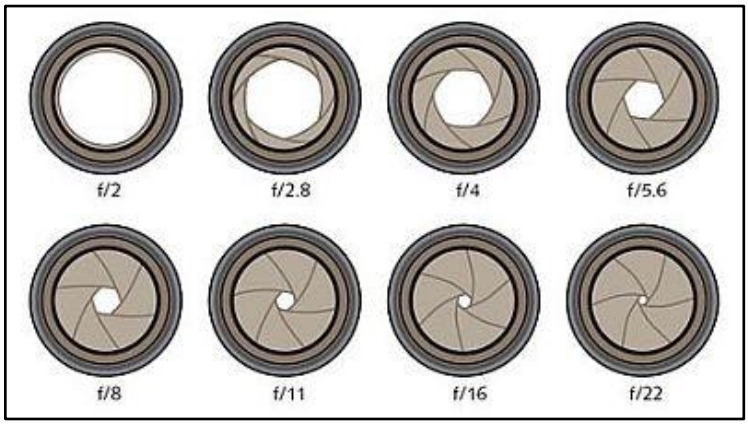
$$\frac{1}{f} = (\mathrm{n} - 1)\left(\frac{1}{\mathrm{R1}} + \frac{1}{\mathrm{R2}}\right) \tag{6}$$

2.2.7 Comutação luminosa

O controle de luminosidade pode realizado por dispositivos eletromecânicos controláveis, cuja operação tem como objetivo é a comutação da luminosidade que transpassa o dispositivo comutador.

Um dispositivo eletromecânico utilizado no controle de luminosidade é o obturador de maquinas fotográficas, cuja função é controlar uma área de abertura e o período de exposição da luz exposta ao filme fotográfico ou no sensor em câmeras digitais. A Figura 9 ilustra diferentes aberturas de obturador.

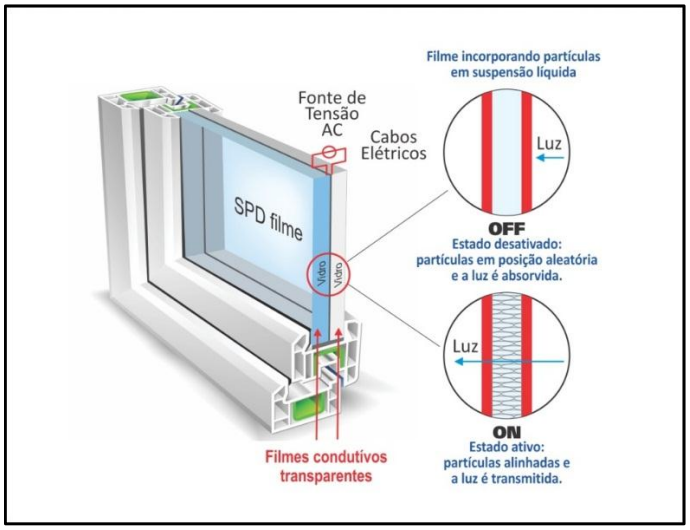
Figura 9 – Aberturas de um obturador.



Fonte: DISENOFOTOGRAFIA (2013).

Um dispositivo eletrônico de comutação luminosa são os materiais polarizáveis, como compósitos de vidro, policarbonato ou acrílico, conforme a Figura 10 possui um núcleo composto por um filme sensível que possibilita o controle de 0,1% a 85% de transmissão luminosa, com proteção ultravioleta (UV) de comprimentos de onda até 400nm e bloqueio térmico máximo de 95%. O filme é composto de partículas suspensas de modo aleatório no material que executam a restrição a passagem da luz, uma vez que o filme é alimentado eletricamente, às partículas sensíveis a corrente elétrica são forçadas ao alinhamento de modo a favorecer a passagem de luz. (SMARTGLASS, 2017).

Figura 10 - Compósito de vidro polarizado



Fonte: SMARTGLASS (2017).

2.3 CONTROLE E ACIONAMENTOS

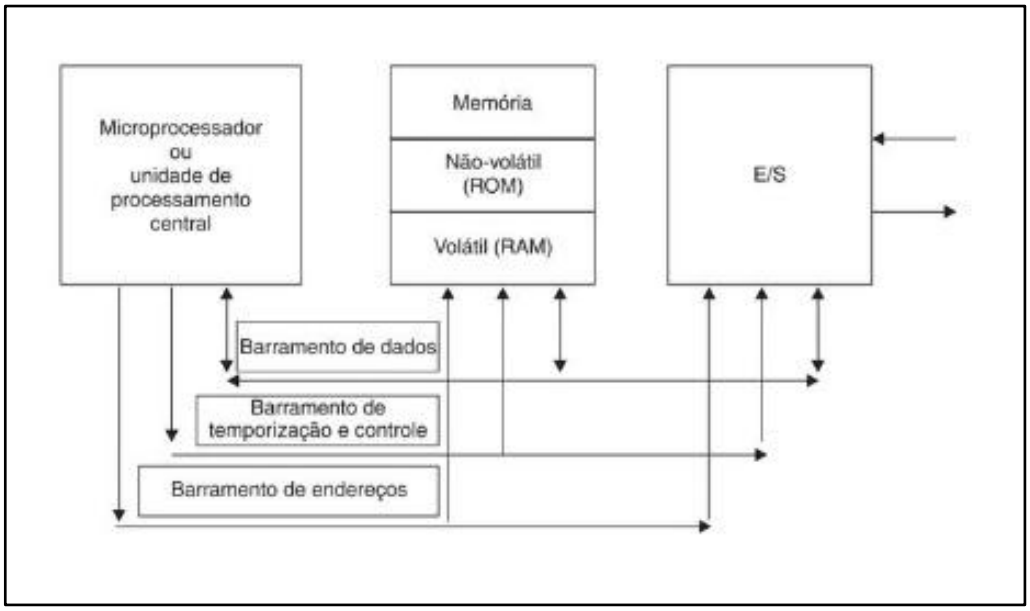
A necessidade de controlar meios físicos exigidos tanto da área industrial quanto, em um contexto mais amplo, da vida de sociedade humana, fomentou a evolução tecnológica na busca por meios de controle cada vez mais seguros e precisos, substituindo gradativamente processos de controle realizados pelo homem por dispositivos inteligentes controlados de forma autônoma. (FIGINI, 2002).

2.3.1 Microcontroladores

O desenvolvimento expressivo da tecnologia e integração de circuitos eletrônicos possibilitou integrar as funcionalidades básicas de um computador como unidade de processamento, armazenamento, entradas e saídas, e implementa-las as em um único circuito integrado de tamanho miniaturizado. Sua aplicabilidade engloba tanto o controle de funções básicas e especificas assim como funções complexas que não utilizam elevada memória.

Um microcontrolador é composto de um ou mais microprocessadores (CPU), memorias não voláteis (ROM, PROM, EPROM, *EEPROM*), memórias voláteis (RAM, SRAM, DRAM, *Flash* RAM), portas de entrada (sinal analógico, sinal digital, alimentação), portas de saída (comunicação serial e paralela, conversores A/D e D/A, etc.), além de barramentos destinados a comunicação entre seus componentes conforme apresentado na Figura 11. (GIMENEZ, 2002).

Figura 11 – Arquitetura de um microcontrolador.



Fonte: GIMENEZ (2002).

O funcionamento de um microcontrolador ocorre através da execução de instruções escritas no formato de linguagem de programação e alocadas em sua memória. A linguagem de programação é desenvolvida pelo programador contendo especificamente instruções com funções a serem executadas de acordo com as ocorrências nas variáveis determinadas nas portas de entrada do circuito integrado, sendo que a linguagem de programação mais utilizada é a linguagem em C.

Todo microcontrolador é inicializado assim que energizado através de um sinal de *reset*, que por sua vez inicializa um registrador interno da CPU que contém o endereço da próxima instrução a ser executada no endereço inicial 0000h, cujo programa é gravado a partir desse endereço (0000h). (GIMENEZ, 2002).

2.3.2 Métodos de controle

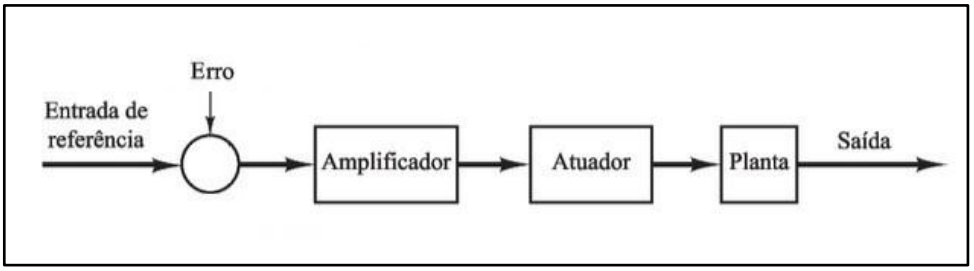
Toda necessidade inicial de automatização, seja de uma tarefa ou processo, origina-se através da identificação de uma execução cíclica ou repetitiva de um trabalho executado ou co-executado pelo homem. Onde se objetiva desde ganhos com qualidade e produtividade a até mesmo o uso mais nobre de recursos humanos

Sistemas de controle podem utilizar diferentes métodos de análise, calculo e ação, citando como exemplo o método passivo por malha aberta, e o método ativo por malha fechada. A diferenciação entre ambos está na forma em que a orientação de execução é determinada, onde em um método passivo em malha aberta tem sua execução baseada em parâmetros já consolidados através de um banco de dados ou aprendizado prévio fornecido ao sistema. Já em um método ativo em malha fechada a execução é orientada através de parâmetros coletados em tempo real, onde esses parâmetros servem de referência para alteração ou correção da execução realizada, caso necessário.

2.3.2.1 Sistema de controle por malha aberta

Em sistemas controlados por malha aberta a ação de controle é realizada em função da variação de parâmetros, porém sem o controle direto sobre a grandeza controlada, uma vez que o sistema fornece exclusivamente um comando sem verificar efetivamente o resultado obtido com a ação. A utilização requer um conhecimento completo dos componentes do sistema e seu comportamento, pois variações nas características iniciais do sistema induzirão erros a resposta de saída que podem ser estimados dentro de uma margem de tolerância. A falta da realimentação de controle implica na indisponibilidade de correção de certos distúrbios, limitando a aplicabilidade em sistemas que exigem uma média e alta precisão da resposta de saída. (FIGINI, 2002). A Figura 12 ilustra o diagrama de blocos de sistema em malha aberta.

Figura 12 – Diagrama de blocos de um sistema em malha aberta.

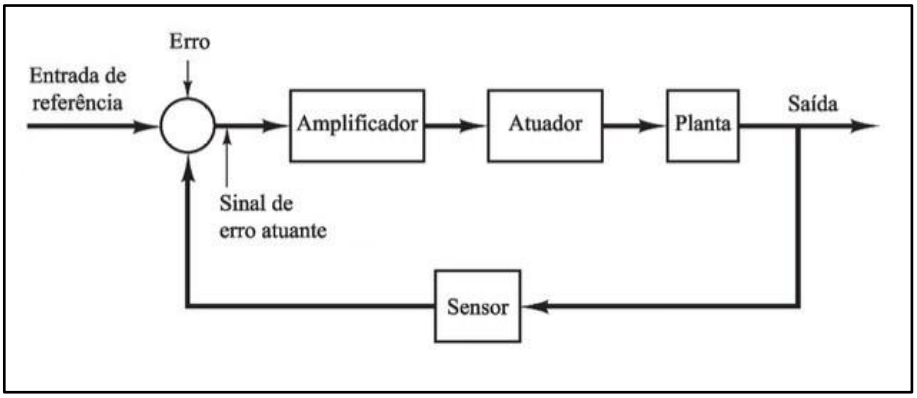


Fonte: AUTOR, ADAPTADO DE OGATA (2010).

2.3.2.2 Sistema de controle por malha fechada

Nos sistemas controlados por malha fechada a ação de controle é realizada de forma contínua, onde o valor da grandeza controlada é comparado com valor da resposta instante a instante, de modo a manter a menor diferença desta comparação. Os sinais comparados são determinados respectivamente como sinal de referência (parâmetro a ser respeitado) e sinal de reação (resposta efetiva), toda ação proposta tende a anular o desvio entre os sinais, essa interação entre os sinais possibilita o autocontrole das ações, permitindo atingir precisões elevadas. Pode-se distinguir três tipos de controle por malha fechada, podendo ser *de valor fixo* (valor de saída se mantem constante por um determinado período), *de valor programado* (valor de saída obedece a parâmetros definidos em um determinado programa) e *de valor dependente* (valor de saída segue as variações não predeterminadas de uma ou mais variáveis). (FIGINI, 2002). A Figura 13 ilustra o diagrama de blocos de um sistema em malha fechada.

Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema em malha fechada.



Fonte: AUTOR, ADAPTADO DE OGATA (2010).

2.3.2.3 Precisão e tipos de erros

Pode-se definir por precisão a aproximação com que certa grandeza controlada está mantida de uma referência, sendo que a diferença entre ambas ocorrências é denominada como *erro*. Utilizando o valor de referência (Vr) e valor

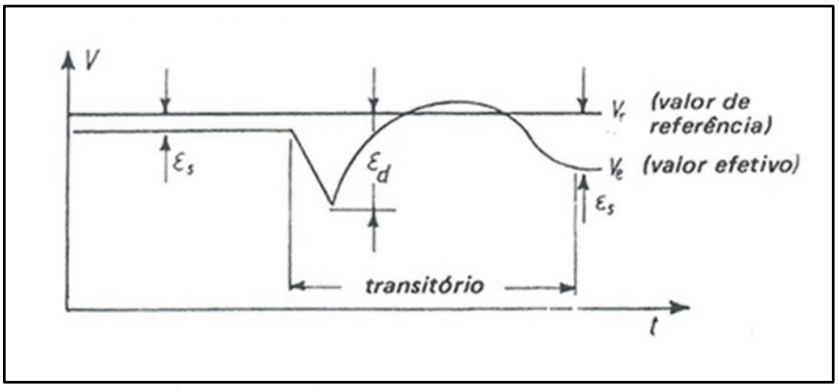
efetivo (Ve) é possível equacionar o *erro absoluto* (Ea) e o *erro relativo* (Er), respectivamente representado nas Equações 7 e 8. (FIGINI, 2002).

$$Ea = Vr - Ve \tag{7}$$

$$Er = \frac{Vr - Ve}{Vr} \tag{8}$$

O erro pode ser mensurado tanto em regime permanente (Ve permanece constante e os distúrbios não apresentam variações), como em regime transitório (Ve e os distúrbios apresentam variações por um período até atingir o equilíbrio, período denominado transitório), classificados respectivamente em *erro estático* (Es) e erro *dinâmico* (Ed). A Figura 14 exemplifica a análise dos erros em regime permanente e transitório. (FIGINI, 2002).

Figura 14 – Erros em regime permanente e transitório.



Fonte: FIGINI (2002; p. 15).

2.3.2.4 Sensibilidade e Estabilidade

Sensibilidade é caracterizada pela menor variação da grandeza de referência capaz de excitar uma variação da grandeza da resposta de saída, também pode ser atribuída a menor parcela do erro do sistema que precede uma ação corretiva.

Visando propiciar um intervalo predeterminado entre a execução de ações é possível criar artificialmente zonas de insensibilidade, não executando nenhuma ação corretiva pelo controle. (FIGINI, 2002).

A capacidade do sistema em atingir uma posição de equilíbrio é denominada *estabilidade*, normalmente alvo comum a ser objetivado em sistemas de controle uma vez que esse fenômeno decorre a partir de elementos que reagem com atraso quando comparados com sinais de entrada. (FIGINI, 2002).

2.3.3.Sensoriamento

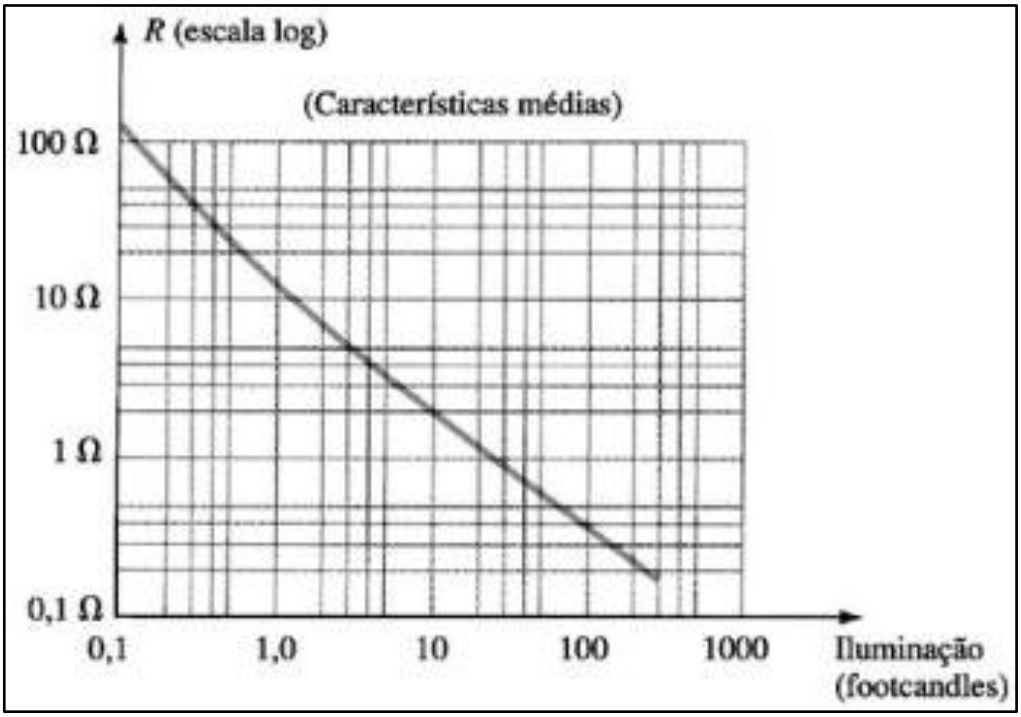
Todos instrumentos que possibilitam a transformação de uma energia, direcionando-a de sua entrada para saída, de forma proporcional e que utilizam grandeza físicas de diferentes naturezas são chamados de transdutores. Os sensores pertencem a uma classe de transdutores que tem a propriedade de detectar uma grandeza física e transforma-la em uma saída passível de leitura, como exemplo um sinal elétrico. (AGUIRRE, 2013).

2.3.3.1 Células fotocondutivas

É definido por célula fotocondutiva todo dispositivo semicondutor composto de dois terminais cuja resistência varia quase que linearmente a exposição a luz aplicada sobre o componente, com tempos de resposta variando entre 10 e 100 ms, sendo em algumas bibliografias normalmente é citada como *dispositivos fotoresistores*. Diferente de outros semicondutores, as células fotocondutivas não contem uma junção dopada e sim uma fina camada de material (usualmente sulfeto ou seleneto de cádmio) conectada entre os terminais. Ao aumentar a incidência de fótons de energia sobre o dispositivo, aumenta também a energia dos elétrons do material e relativamente ocorre um aumento dos elétrons “livres” (migração dos eletros da camada de valência para camada de condução), proporcionando um menor valor de resistência entre os terminais. (BOYLESTAD, 2004).

Aplicando uma escala logarítmica aos eixos das abcissas e ordenadas a curva de sensibilidade linearizada, de uma típica célula fotocondutiva, pode ser avaliada na Figura 15. Evidenciando a grande variação na resistência de 100 KΩ à 100 Ω para variação de iluminação em footcandles (fc), sendo que 1fc corresponde a 10,764 lux.

Figura 15 - Curva de sensibilidade de uma Célula Fotocondutiva.



Fonte: (BOYLESTAD, 2004).

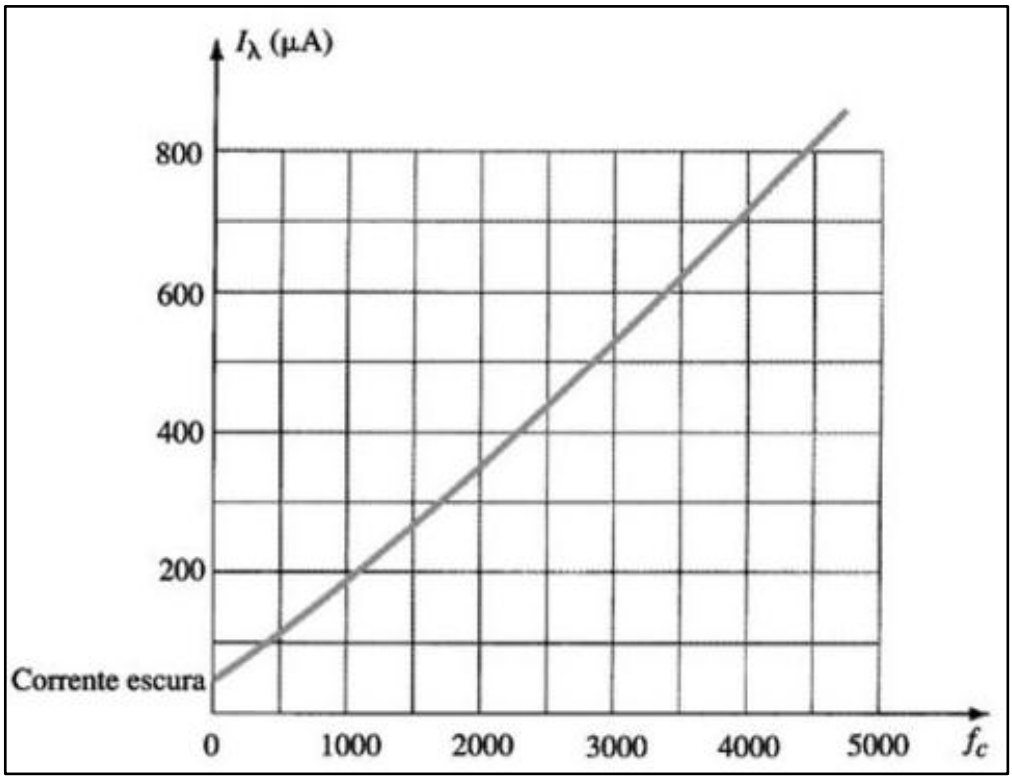
2.3.3.2 Fotodiodos

O fotodiodo é um componente semicondutor de junção p-n sensível a luz, apresenta variação da corrente entre os elementos da junção de acordo com a intensidade de luz aplicada. Composto de dois terminais e materiais de junção basicamente fabricada de selênio, silício ou germânio, apresentando diferentes respostas de acordo com tipo material. Opera na condição reversa com saturação limitada a alguns microampères e devido aos portadores minoritários (gerados termicamente em junções p-n) ao expor a junção a energia dos fótons ocorre a transferência de energia para estrutura atômica do componente, elevando o número

de portadores minoritários e consequentemente aumentando o valor da corrente reversa. (BOYLESTAD, 2004).

A Figura 16 apresenta a curva de sensibilidade de um típico fotodiodo, comparando as grandezas de iluminação versus corrente reversa e aplicando uma tensão fixa de 20 V.

Figura 16 – Curva de sensibilidade de um fotodiodo.



Fonte: (BOYLESTAD, 2004).

2.3.4 Acionamentos Elétricos

São denominados acionamentos elétricos todos dispositivos que transformam energia elétrica alternada ou continua em energia cinética através de um movimento mecânico.

2.3.4.1 Motor de passo

Motor de passo é um tipo de motor elétrico destinado a sistemas que requerem posicionamentos específicos. Sua rotação é controlada por uma série de campos eletromagnéticos, gerados por bobinas acionadas individualmente. O número de alinhamentos que o rotor efetua com as bobinas determina qual é o número de passos, ou seja, a resolução angular do motor. O sentido de rotação é determinado pela sequência com que as bobinas são acionadas e a velocidade de rotação é dada pela frequência dos pulsos elétricos e o tamanho do ângulo de cada passo. (MICROSCHIP, 2017).

2.3.4.2 Servomotores

Servomotores são dispositivos eletromecânicos que disponibilizam movimento angular de forma precisa, controlada e torque radial especificado. O projeto de um servomotor constitui-se de um sistema atuador (motor de corrente continua ou alternada), um sistema de controle (elementos eletrônicos com controlador PID) e um sistema sensor (potenciômetro/encoder), alguns modelos podem possuir um sistema de redução por engrenagens e um invólucro que integra todos elementos. Esse dispositivo é amplamente utilizado na indústria no desenvolvimento de máquinas que requerem elevada precisão e confiabilidade, além de possuir também uma disponibilidade comercial ampla de especificações técnicas de dimensionamento. (CITISYSTEMS, 2017).

O sistema sensor utiliza normalmente um potenciômetro ou encoder que está acoplado de forma solidaria ao eixo de saída, cujo objetivo é identificar e monitorar a posição angular do eixo de saída, a partir da associação da variação de resistência ou número de pulsos com a variação do movimento angular do eixo de saída, que pode variar de forma continua (inclusive em rotações elevadas) ou com variação de giro limitada de 0 à 180°, de acordo com a referência utilizada e a construção do dispositivo.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

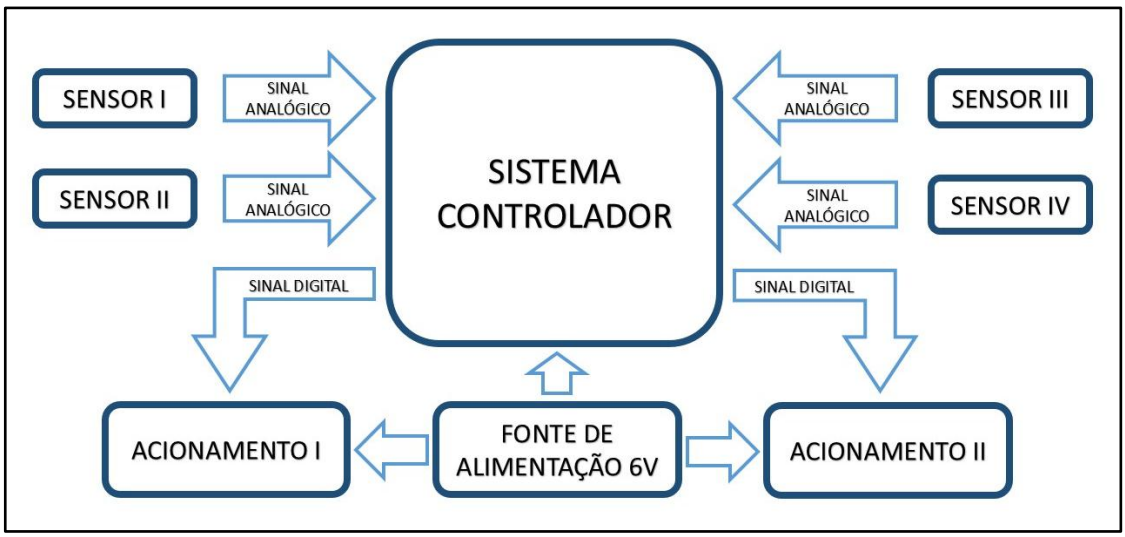
Dentro do contexto apresentado nas seções anteriores e no estudo antecedente a este relatório (realizado no Trabalho de Conclusão de Curso I), neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados e a metodologia de desenvolvimento do protótipo do projeto, assim como os testes executados para validação dos componentes do sistema, ajustes dos parâmetros funcionais e operacionalidade.

3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EXPERIMENTAL PROPOSTO

Visando representar uma ideia macro do sistema proposto nessa pesquisa, o dispositivo completo será subdividido em dois módulos de aplicação, sendo o módulo I destinado as condições de controle eletroeletrônico e o módulo II destinado ao tratamento da luminosidade.

O módulo I, apresentado na Figura 17, é composto basicamente pelo sistema controlador, sensores infravermelhos, servomotores, fonte de alimentação e meios de comunicação.

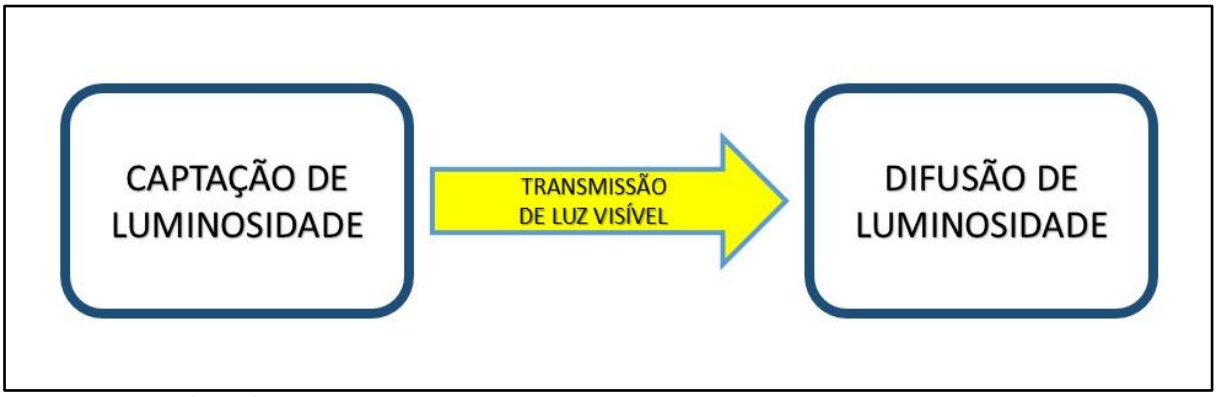
Figura 17 – Diagrama de blocos do projeto do módulo I.



Fonte: AUTOR (2017).

O módulo II, apresentado na Figura 18, é composto pelo sistema de captação luminosa, fibras opticas e do sistema de difusão luminosa.

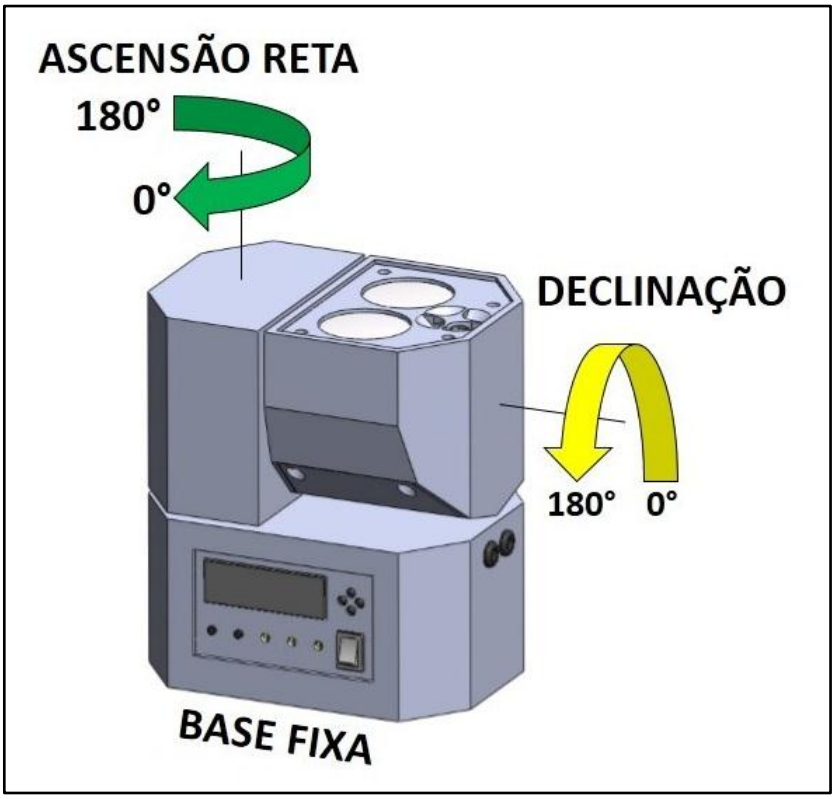
Figura 18 – Diagrama do projeto do módulo II.



Fonte: AUTOR (2017).

Conforme comentado anteriormente, o sistema de coordenadas equatorial referência o posicionamento nos dois graus de liberdade, de acordo com a disposição física dos acionamentos e sua orientação padrão do sentido de giro a disposição das coordenadas são mostrados na Figura 19, representado na posição de repouso, ou seja, as duas coordenadas estão na posição mediana.

Figura 19 – Orientações do protótipo.



Fonte: AUTOR (2017).

3.1.1 Sistema Controlador

O sistema controlador é utilizado para gerenciar ações logicamente definidas, executando funções de acordo com os sinais medidos pelos sensores. Composto essencialmente de um microprocessador lógico programável, podendo ser adicionado em um arranjo com alguns periféricos, como cristal oscilador, amplificadores, reguladores de tensão, display, etc., afim de torna-lo adequado a tal projeto ou função especifica.

O sistema controlador adotado no protótipo é a plataforma Arduino Uno R3, devido ao baixo custo de aquisição, atendimento pleno das funcionalidades no sistema e hardware confiável. O microcontrolador embarcado na plataforma é o ATmega328P, possui 32 KB de memória flash para armazenamento do programa, possui também 6 entradas analógicas e 14 entradas/saídas digitais, com alimentação indicada de 6 à 12V. O programa é desenvolvido em linguagem C e compilado e gravado através de um software dedicado, a comunicação do hardware com o

microcomputador se dá através de um cabo USB com pinagem tipo A e B. (ARDUINO, 2017).

As informações das variáveis manipuladas pelo controlador estão disponibilizadas através de um display LCD com 16 colunas e 2 linhas, com controlador HD44780 integrado. Também foram utilizados quatro LED's indicativos dispostos de forma a indicar o sentido e momento de atuação dos acionamentos.

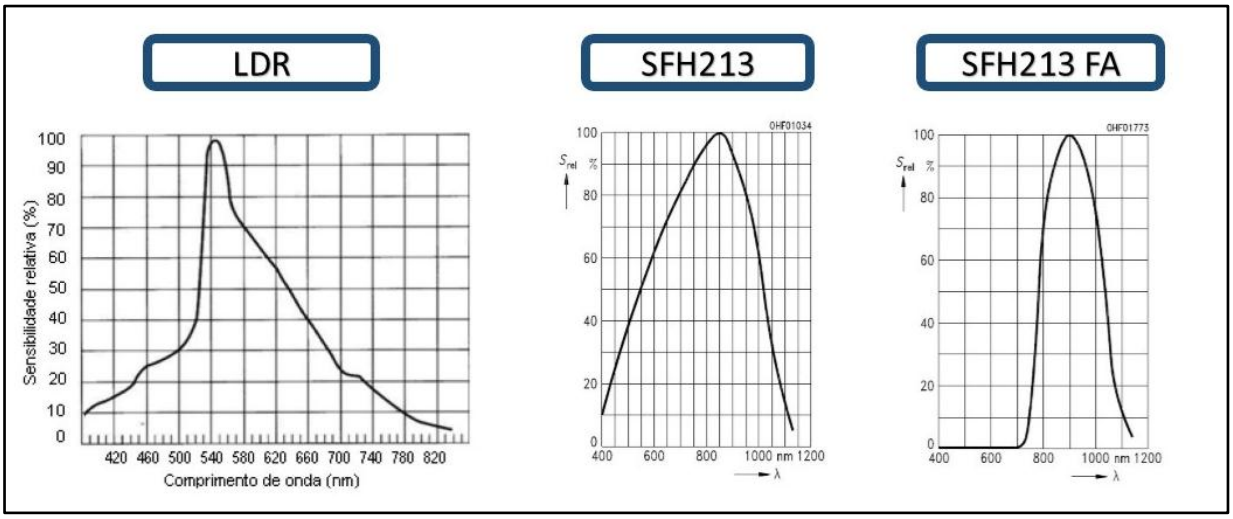
3.1.2 Sensoriamento

Os sensores são utilizados no projeto com a função de quantizar de forma direcional a luminosidade solar, oferecendo sinais analógicos para o sistema controlador. Para aplicação de um sistema sensor foram avaliados três componentes, pertencentes a duas classes de sensores de luminosidade, uma célula fotocondutiva e dois fotodiodos com características diferentes, apresentados a seguir.

O LDR (Ligth Dependent Resistor) é um sensor pertencente a classe de células fotocondutivas, sensível a incidência de luminosidade com comprimentos de onda de 4000 à 700 nm, com área sensível de Ø5 mm. (GHELLERE, 2017).

O componente SFH213 é um sensor fotodiodo que detecta luz com um comprimento de onda entre 400 nm (violeta, azul) e 1100 nm (infravermelho), possui um encapsulamento translúcido incolor e ângulo de abertura da região sensível de 20°. E o componente SFH213 FA, um sensor fotodiodo que detecta luz com um comprimento de onda entre 750 nm (vermelho) e 1100 nm (infravermelho), possui um encapsulamento translúcido negro e ângulo de abertura da região sensível de 20°. (OSRAM, 2017 e SIEMENS, 2017). A Figura 20 apresenta a variação de sensibilidade dos três componentes.

Figura 20 – Curvas de sensibilidade dos sensores.



Fonte: ADAPTADO DE GHELLERE (2017), OSRAM (2017) e SIEMENS (2017).

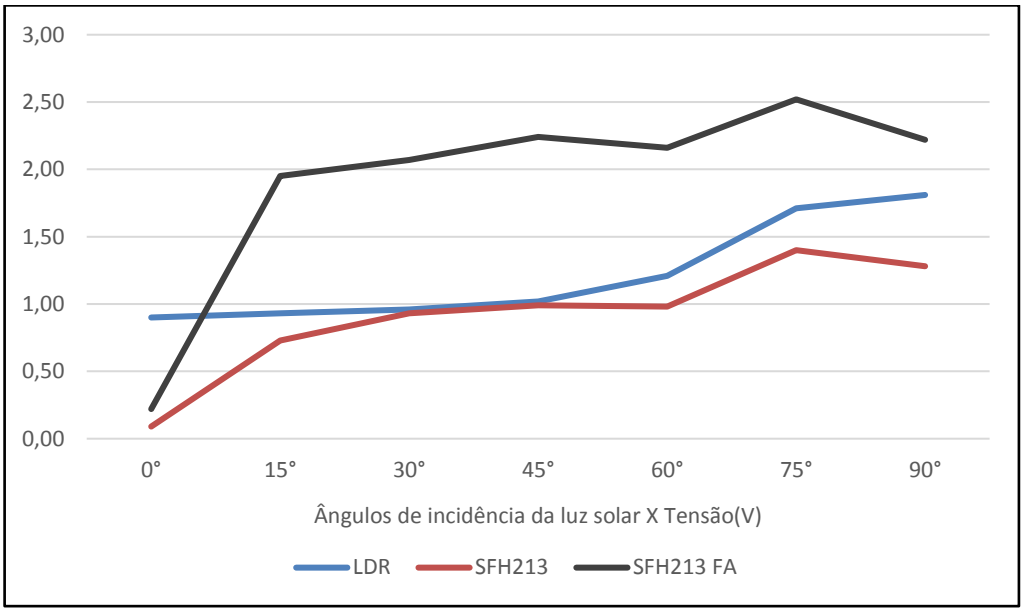
Os três componentes foram expostos ao teste em um circuito divisor de tensão para cada componente, dispostos em série com resistor de 220 Ω e alimentados com 5 V, de modo a medir a queda de tensão sobre o sensor ao variar o ângulo de incidência da luz solar sobre a região sensível de cada componente, com amplitude de 0 a 90° em relação ao sol, e uma segunda avaliação expondo o componente a escuridão. O experimento foi realizado em um dia ensolarado e próximo ao meio dia, com luminosidade natural ao ar livre mensurada de 74.318 lux. Os dados obtidos podem ser avaliados na Tabela 1 e no gráfico apresentado na Figura 21.

Tabela 1 - Teste sensores de luminosidade.

Sensor	**Ângulos de incidência da luz solar X Tensão(V)**							**Escuridão**
	0°	**15°**	**30°**	**45°**	**60°**	**75°**	**90°**	
LDR	0,90	0,93	0,96	1,02	1,21	1,71	1,81	5,00
SFH213	0,09	0,73	0,93	0,99	0,98	1,40	1,28	5,00
SFH213 FA	0,22	1,95	2,07	2,24	2,16	2,52	2,22	5,00

Fonte: AUTOR (2017).

Figura 21 – Gráfico do teste dos sensores de luminosidade.



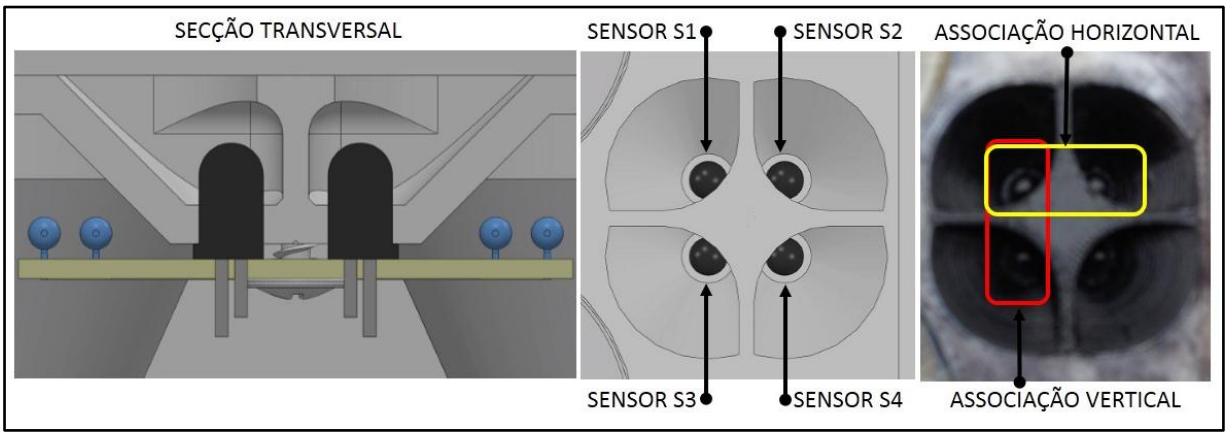
Fonte: AUTOR (2017).

Com base nas curvas de sensibilidade e o resultado dos testes, o componente utilizado no projeto é o SFH213 FA, uma vez que apresenta a variação de resposta mais sensível do que os demais componentes, principalmente percebido em pequenas variações de ângulo quando o sensor esta orientado diretamente para o astro sol. Outro aspecto positivo observado é o fato de ter, embora menor que o componente SFH213, uma região sensível de comprimentos de ondas entre o limite e acima do espectro da luz visível, restringindo assim possíveis distúrbios de luminosidades não provenientes do sol, como fontes de luminosidade artificiais.

O sistema sensorial de quantização direcional da luminosidade solar, denominado neste projeto de Cone Sensor, foi dimensionado e desenvolvido com quatro sensores SFH213 FA, denominados S1, S2, S3 e S4, dispostos conforme Figura 22. Representando a secção transversal e vista superior do projeto virtual, na imagem mais à direita a ilustração real do sistema, bem como as associações utilizadas na lógica operacional. Conhecendo a posição dos sensores é possível identificar a máxima intensidade luminosa e rastrear o movimento solar. As leituras foram agrupadas por duas associações verticais e duas associações horizontais, dessa forma as leituras dos quatro sensores são sempre consideradas em qualquer coordenada. Em uma associação vertical foi adotada a média das leituras de S1 e S3 (S13) e na outra a média das leituras de S2 e S4 (S24). Enquanto em uma associação

horizontal é considerada a média das leituras de S1 e S2 (S12) e na outra foi considerada a média das leituras de S3 e S4 (S34).

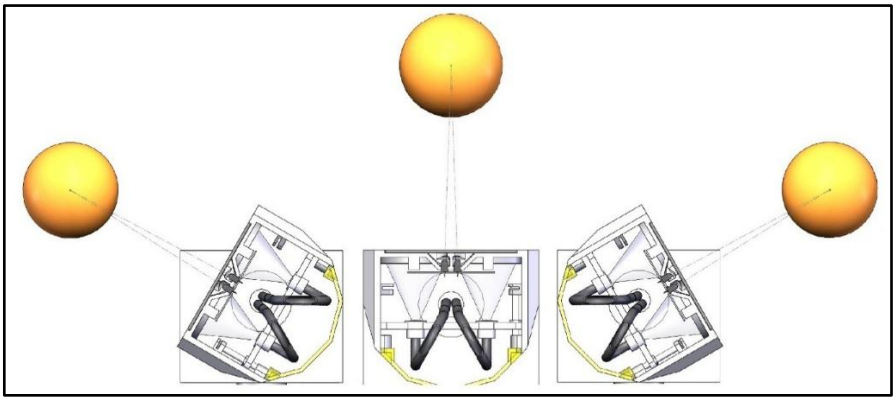
Figura 22 – Cone sensor.



Fonte: AUTOR (2017).

O Cone Sensor desenvolvido exclusivamente para o projeto a partir da necessidade de unificar e dispor o sistema de forma puntiforme. Diferente de outros sistemas que utilizam as extremidades dos painéis solares para posicionamento dos sensores. O design que envolve os sensores oferece a mesma área de luminosidade nos quatro sensores quando os raios solares estão perpendiculares a face do sistema, conforme Figura 23, equalizando os sinais gerados. Qualquer variação na posição solar resultará em diferentes áreas iluminadas e consequentemente um desbalanceamento nos sinais.

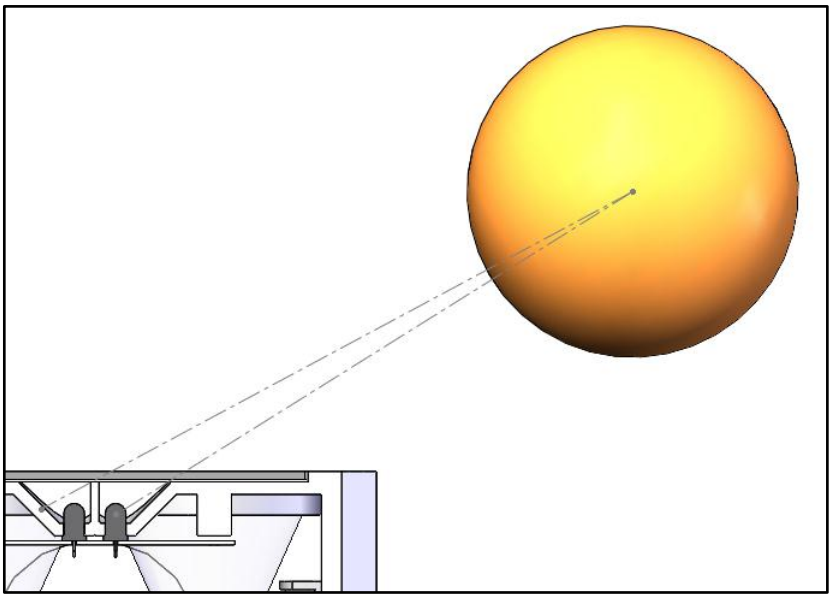
Figura 23 - Igualdade na incidência de ondas IR no cone sensor.



Fonte: AUTOR (2017).

Quando o sistema está em repouso a face do sistema sensor fica em posição paralela ao plano horizontal, conforme Figura 24, dessa forma é possível captar as ondas infravermelhas provenientes de qualquer direção e de forma diferenciada pelos sensores.

Figura 24 – Diferença na incidência de ondas IR no cone sensor.



Fonte: AUTOR (2017).

O controlador Arduino Uno opera com um cristal oscilador de 16 MHz e o processador Atmega328 possui um conversor analógico digital (A/D) com resolução de 10 bits e clock recomendado de 50 KHz à 200 KHz. Cada conversão necessita de 13 pulsos de clock e é executada uma conversão por vez. A configuração do controlador considera um fator a divisão da frequência principal ($Prescaler$) de 128, configurando um clock de 125 KHz e uma taxa de amostragem de 9600 amostras por segundo, conforme cálculos apresentados nas Equações 9 e 10.

$$Clock = \frac{Frequencia\ Oscilador}{Prescaler} = \frac{16MHz}{128} = 125KHz \quad (9)$$

$$Taxa\ Amostragem = \frac{Clock}{Pulsos\ de\ clock} = \frac{125KHz}{13} \cong 9600\ a/s \quad (10)$$

Considerando que são utilizadas 4 conversões A/D para obter a informação dos sensores e 2 conversões A/D para o módulo de referencial de tempo (RTC), a taxa de atualização dos sinais é de 6.400 amostras por segundo ou 6400 Hz, suficiente para rastreamento da posição solar.

Os 10 bits de resolução da conversão A/D (ADC) resultam em 1.024 valores distribuídos na faixa de 0 à 1.023. Cada valor convertido pode ser obtida através da Equação 11, onde Vin é o valor analógico do sensor e $Vref$ é o valor de referência do controlador, neste caso 5V.

$$ADC = \frac{Vin * 2^{10}}{Vref} \quad (11)$$

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos através de um ensaio de equivalência entre a média dos valores lidos pelo sistema sensor com a luminosidade, com objetivo de obtenção de condições iniciais para ajuste do algoritmo operacional.

Tabela 2 - Ensaio entre faixa de valores e luminosidade equivalente.

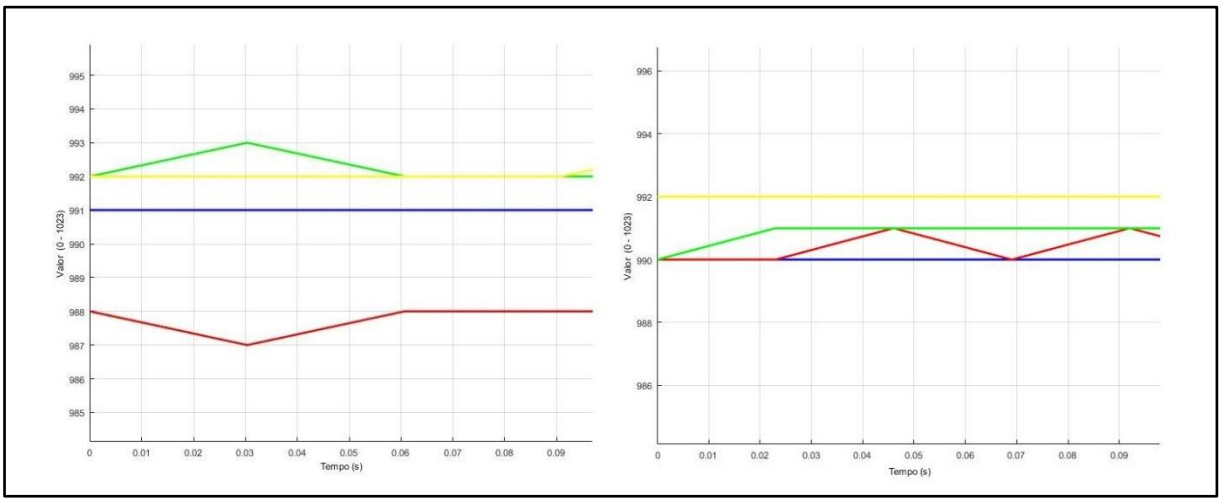
Faixa de valores	Luminosidade equivalente em Lux	Característica Temporal
0 à 50	0 à 1500	Noite ou penumbra
51 à 974	1501 à 96.999	Nascer/Pôr do sol ou baixa incidência luminosa
975 à 1023	> 97.000	Dia com moderada a alta incidência luminosa

Fonte: AUTOR (2017).

Para o processamento dos sinais foi utilizado o software Matlab, na versão R2017a, executando a comunicação entre o microcomputador e o controlador através da porta serial COM3. Um firmware DAQ (Data Acquisition) foi ajustado para obtenção de resultados como analise, calibração digital e obtenção das curvas de excitação dos sensores.

A calibração digital dos valores é necessária devido a variações físicas nos componentes e as tolerâncias dos componentes eletrônicos (como os resistores utilizados com tolerância de 5%), componentes de precisão possuem um valor comercial considerável e utilizando esse ajuste via programação é possível obter um resultado preciso. A Figura 25 expõe os gráficos obtidos, resultando em uma amplitude de variação antes da calibração de 6 valores (33Hz) e após a calibração com redução da amplitude de variação de 2 valores (43Hz).

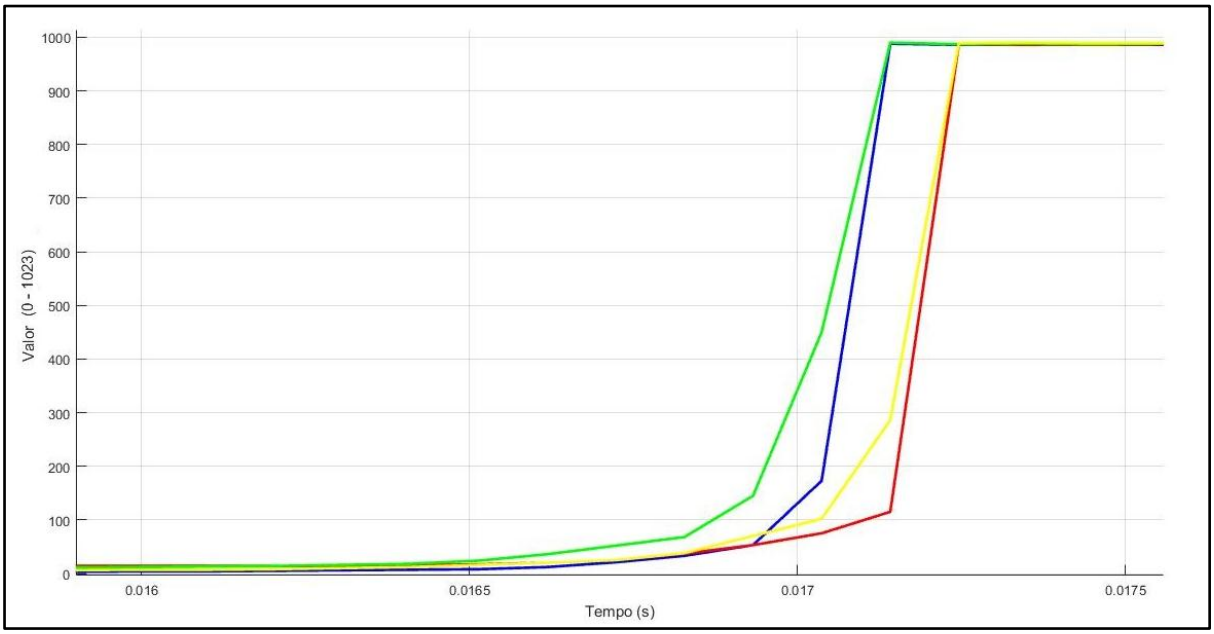
Figura 25 – Calibração digital dos sinais do cone sensor.



Fonte: AUTOR (2017).

O gráfico apresentado na Figura 26 corresponde a resposta das curvas de sensibilidade dos 4 sinais, representa um comportamento exponencial dos sinais amostrados mesmo instante a frequência de 9600 Hz, possibilita obter a resposta temporal do regime transitório total de 840µs e condicionar a aquisição dos dados a esse parâmetro.

Figura 26 - Curva de resposta temporal do cone sensor.



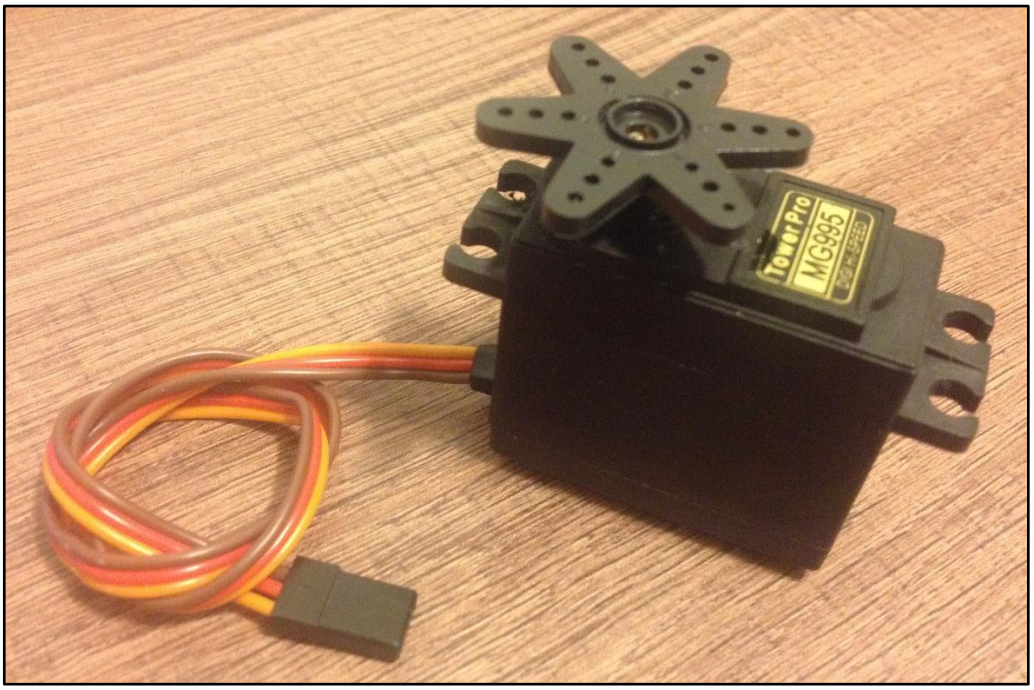
Fonte: AUTOR (2017).

3.1.3 Acionamentos

Os acionamentos oferecem a mobilidade de posicionamento do sistema de captação e sensores, sendo acionados pelo sistema controlador Dentro dos acionamentos apresentados e considerando a necessidade de posicionamento preciso de 0° à 180° com torque estimado de 0,350 N*m para o primeiro acionamento e de 0,600 N*m para o segundo acionamento, define-se para o projeto a utilização de servomotores, uma vez que os motores de passo de dimensional reduzido não atendem as especificações de torque estabelecidas para o protótipo.

O servomotor utilizado para cada coordenada é o MG955 apresentado na Figura 27, da fabricante Tower Pro possui uma caixa de engrenagens que oferece um torque de 1,078 N*m com acoplamento de 0,02 m e alimentação de 6 V, opera também com tensões entre 4,8 e 6,6 V e possui uma corrente nominal de 100 mA. O dimensional e peso são reduzidos e a amplitude de trabalho é de 0 à 180° com alta velocidade (0,3s /90°). (TOWERPRO, 2017).

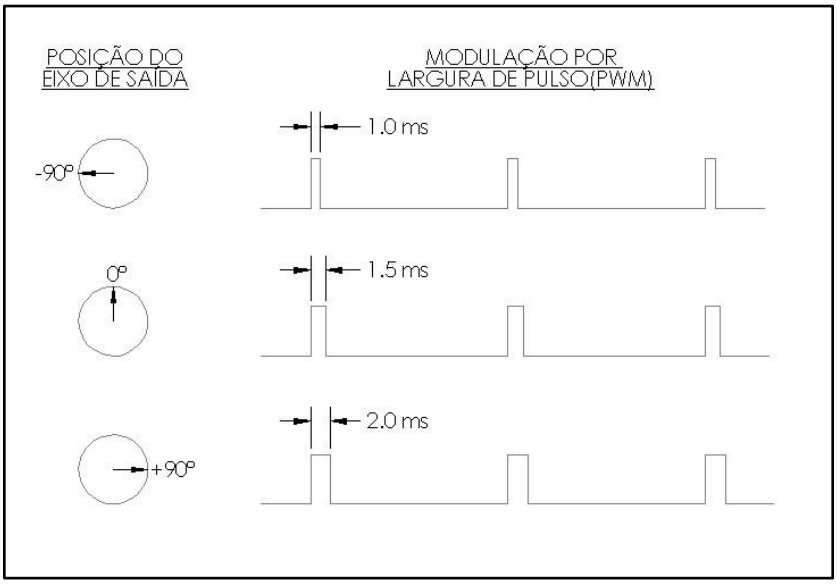
Figura 27 – Servomotor MG995.



Fonte: AUTOR (2017).

A interface de ligação é composta de três condutores, sendo os dois primeiros condutores destinados a alimentação e o terceiro condutor é destinado ao sinal de controle, que utiliza o método de modulação por largura do pulso (PWM), baseando-se nas características de frequência, e largura do pulso (variável que determina a posição do eixo e sentido de giro). Geralmente a frequência média de operação é de 50 Hz e variação da largura do pulso é de 1 à 2 ms, sendo que a largura máxima determina o deslocamento em +90º e a largura mínima indica o deslocamento em -90°, conforme apresentado na Figura 28.

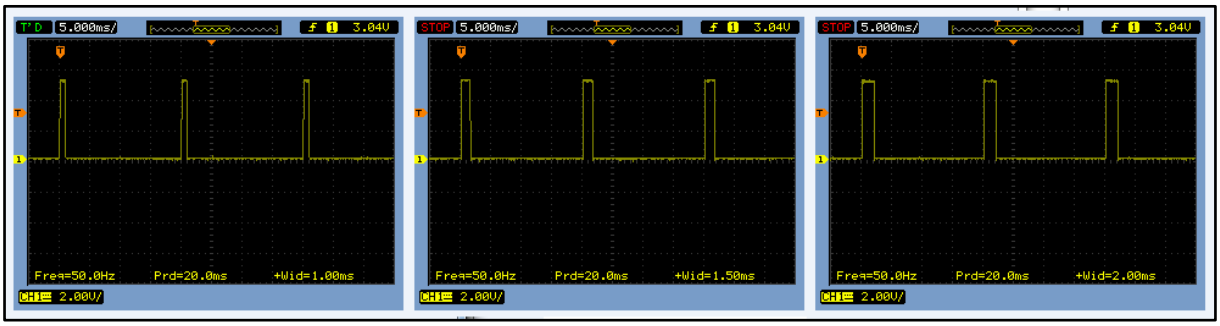
Figura 28 – Modulação por largura de pulso.



Fonte: AUTOR (2017).

Considerando a amplitude das coordenadas foi modulado o sinal de acordo com o dimensionado, variando de 1 ms à 2 ms com frequência de 50 Hz. Com a utilização de um osciloscópio ligado ao pino 9 (acionamento coordenada DC) e a referência do controlador, foram obtidas as 3 larguras de pulso referencias (0°, 90° e 180°) respectivamente demonstradas na Figura 29.

Figura 29 – Modulação por largura de pulso gerada.

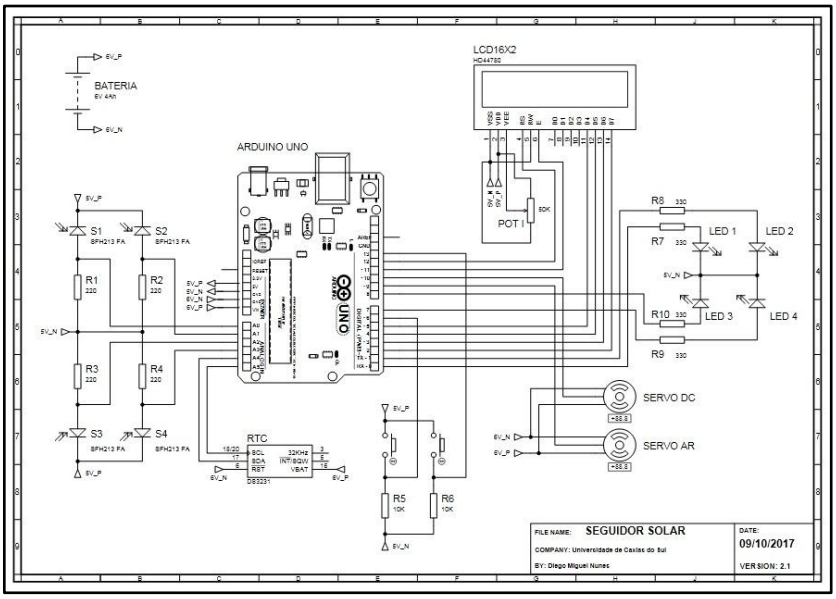


Fonte: AUTOR (2017).

3.1.4 Esquema Elétrico

Para o desenvolvimento do esquema elétrico foi utilizado o software Proteus Professional na versão 8.0, utilizado para realizar simulações das iterações entre os componentes eletrônicos e avaliação das tensões e correntes presentes no circuito. O esquema elétrico apresentado de forma reduzida na Figura 30 está disponível em escala maior no Apêndice A deste relatório. Contempla também elementos de interface como botões e LED's indicativos.

Figura 30 – Esquema elétrico.



Fonte: AUTOR (2017).

3.1.5 Desenvolvimento do Algoritmo Operacional

Algoritmo Operacional foi desenvolvido a partir de um fluxograma de tomada de decisões e ações, embasado através de informações disponibilizadas pelo sistema sensor e condições de contorno predefinidas. Figura 31 apresenta o fluxograma da lógica operacional.

O sistema é iniciado primeiramente na posição de repouso (DC = AR = 90°) e com a variável acumuladora zerada (CONT = 0), nessa posição o sistema sensor é

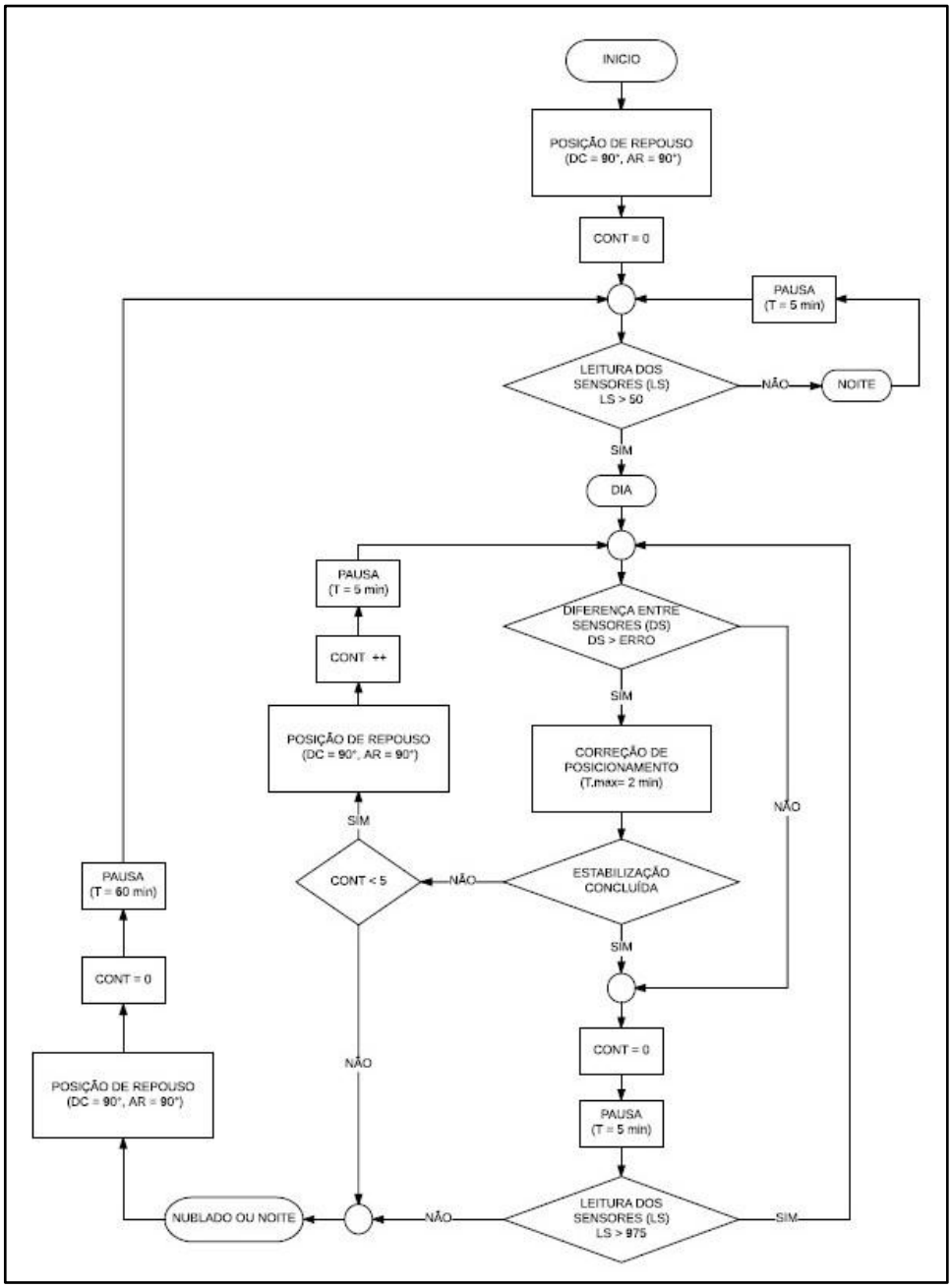
capaz de identificar luminosidades provenientes que qualquer direção. Após é verificado a leitura dos sensores (LS), se for < 50 significa que não existe luminosidade suficiente (noite) e assim o sistema só fará uma nova verificação após 5 minutos. Mas se ao menos dois sensores apresentarem a LS > 50, significa um aumento gradativo de luminosidade (nascer do sol).

Se a diferença entre as associações de sensores (DS) for maior que o erro estipulado, é acionado a ação de correção da posição por 2 minutos, se nesse intervalo de tempo não foi possível estabilizar a posição, e a variável contadora CONT é menor que cinco, o sistema retorna a posição de repouso, adiciona um incremento em CONT e pausa por 5 minutos até que faça uma nova verificação. Ao acumular cinco tentativas seguidas sem sucesso de estabilização o sistema identifica essa instabilidade luminosa (nublado ou noite), retornando a posição de repouso, zerando o CONT e executa uma pausa de 60 minutos até reiniciar o ciclo novamente.

Caso estabilizado, uma nova pausa de 5 minutos é executada. Se DS não for maior que o erro, então uma nova pausa de 5 minutos é incrementada. No fluxo continuado é verificado novamente LS, caso essa leitura for maior que 975 significa luminosidade suficiente, habilitando assim uma nova verificação entre DS e o erro. Se LS não for maior que 975 então significa que a luminosidade não é suficiente (pôr do sol ou período nublado), a posição de repouso é requisitada e uma pausa de 60 minutos antes que LS seja avaliado novamente no início do fluxograma (LS > 50).

Analisando o período de uma hora, o caminho crítico do fluxograma representa a demanda de até 12,3 minutos de utilização dos acionamentos, além da utilização contínua do controlador e sensores nesse período e que cada demanda da posição de repouso demanda 0,05 minutos de acionamentos ativos. Enquanto que o caminho ótimo utiliza apenas 2,58 minutos dos acionamentos ao longo de uma hora.

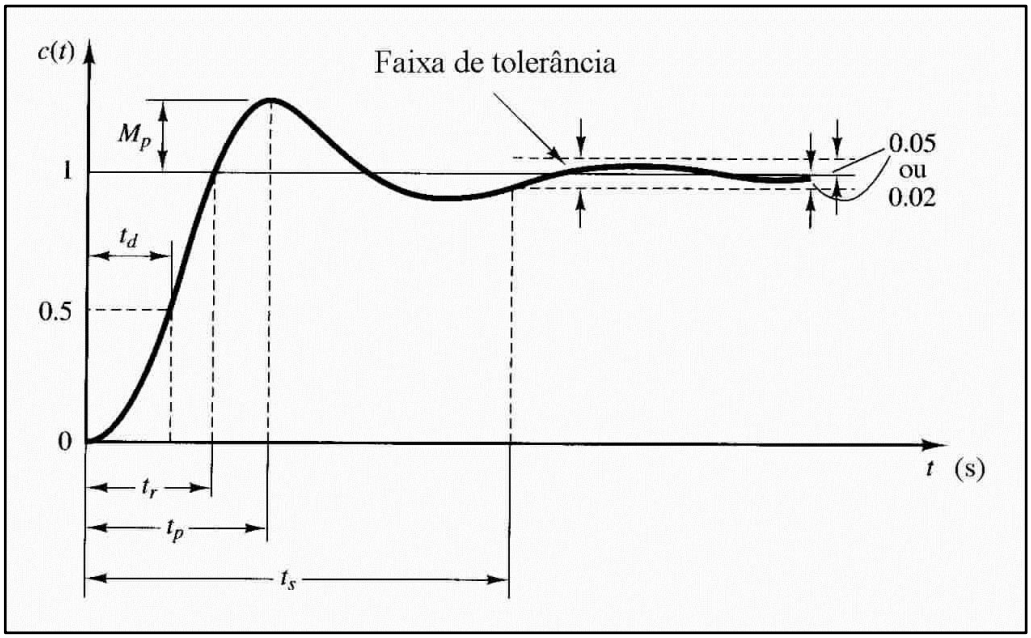
Figura 31 – Fluxograma.



Fonte: AUTOR (2017).

A diferença entre as associações S12 e S34 representa a orientação da movimentação na coordenada DC e a diferença entra as associações S13 e S24 representa a orientação na coordenada AR. De acordo com a Figura 32, a estratégia de controle é baseada na minimização do erro entre os sinais associados, estabilizando o posicionamento quando a curva da resposta permanece dentro de uma faixa de tolerância determinada. Essa técnica é utilizada em sistemas de controle que não demandam rapidez na transição do regime permanente para o transitório.

Figura 32 – Resposta típica de um sistema de 2ª ordem.



Fonte: OGATA (2010).

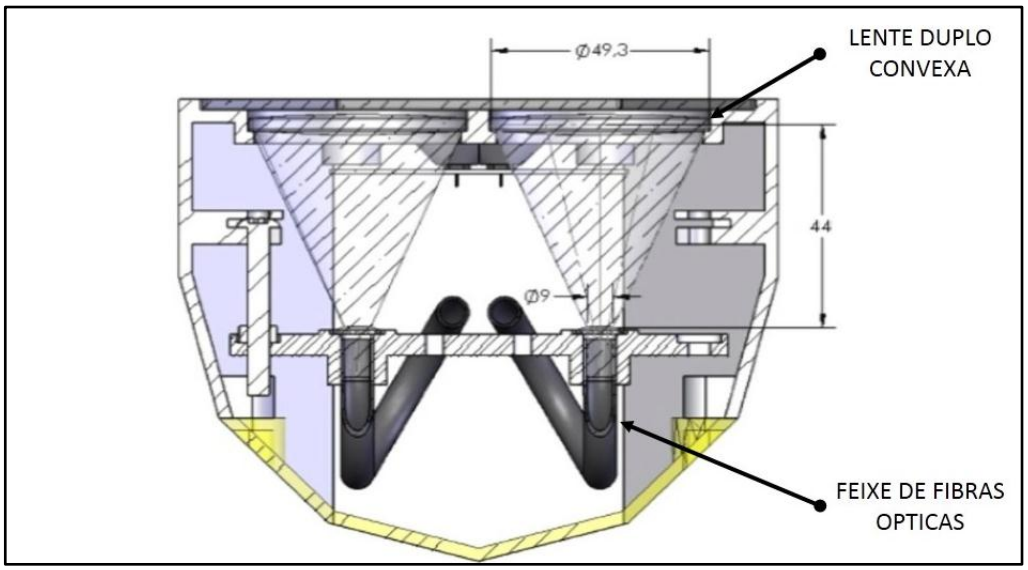
O erro estabelecido é de 5 valores, aproximadamente 0,5% da amplitude máxima que o sistema sensor dispõe, e a resolução angular é de 0,1°. Considerando que o tempo de resposta efetivo dos acionamentos é de 50 ms para cada incremento angular, o tempo de assentamento (Ts) máximo obtido é de 90 segundos (deslocamento total de 90° em ambas coordenadas). A atualização dos parâmetros dos sensores foi atrelada a esse parâmetro como forma de oferecer um sincronismo entre a leitura dos sinais e a posição inferida nos acionamentos, resultando em uma frequência de 20Hz.

3.1.5 Captação Luminosa

A intensidade de captação é um recurso que promove a utilização mais eficiente dos meios de transmissão e um modo a amplificar a energia luminosa captada é utilizar elementos concentradores de luz, como exemplo as lentes convergentes delgadas duplo convexas. Utilizando esse recurso em um sistema de duas lentes duplo convexo dimensionadas com Ø 49,3 mm, R1 e R2 de 55 mm, índice de refração de 1,5 e distância focal determinada pelo fornecedor de 55 mm, o que foi comprovado através da equação dos fabricantes de lentes. A distância focal foi reduzida para 44,0 mm, obtida através do teorema de Pitágoras, ampliando o ponto

focal para Ø10 mm. A Figura 33 expõe uma secção transversal do sistema de captação luminosa.

Figura 33 – Sistema de captação intensificador.



Fonte: AUTOR (2017).

3.1.6 Cabo de Transmissão Luminosa

As fibras óticas podem ser feitas com materiais plásticos (silicone, acrílico, polimetilmetacrilato – PMMA, poliestireno), desde que o índice de refração do núcleo seja superior ao da casca. Alguns materiais plásticos transparentes possuem AN superiores a 0,5, permitindo assim uma maior captação de energia luminosa na janela do espectro visível, em torno de 630 nm. Outra característica importante é a grande flexibilidade mecânica e tolerância ao uso de conexões e acoplamentos, dado pelo maior dimensional do núcleo. A desvantagem está nas perdas a longas distancias, na ordem de centenas de decibéis por quilometro, por isso são aplicadas em sistemas de comunicação de automóveis e principalmente em sistemas de iluminação, devidos as pequenas distâncias e modestos requisitos de banda. (GIOZZA, 1991).

Conforme apresentado na Figura 34, o elemento de transmissão luminosa definido pra o projeto é a fibra optica de material PMMA, dimensional do núcleo de 2,5 mm e com casca em PVC de 0,75 mm de espessura, índice de reflexão de 1,55,

temperatura de trabalho entre -50 à 90°C, peso de 0,095 kg/m. O cabo utilizado no projeto possui 14 fibras, sendo dividido em dois feixes de 7 fibras para cada captação e novamente unidas em um cabo único, envolto em um protetor de chicotes elétricos, para difusão luminosa única.

Figura 34 - Feixe de fibra opticas PMMA.

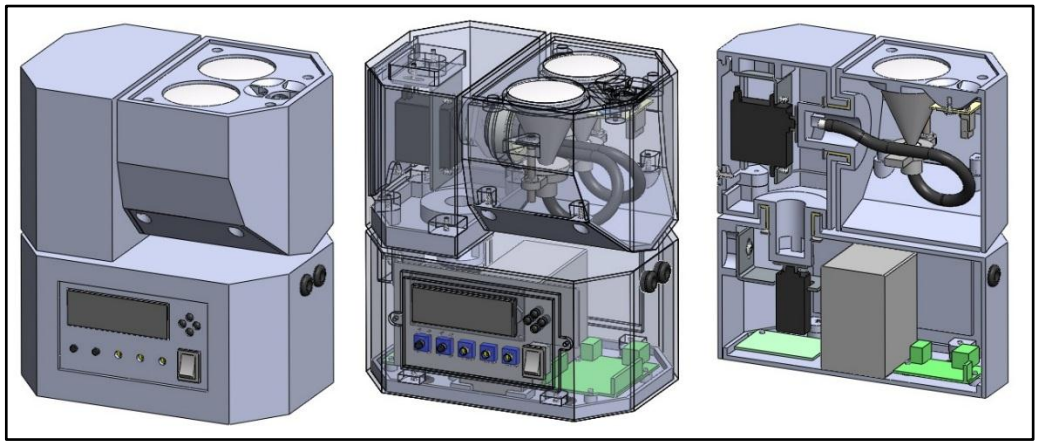


Fonte: AUTOR (2017).

3.2 INTEGRAÇÃO DOS COMPONENTES

O sistema proposto dispõe de um invólucro projetado em software de Cad Solidworks e manufaturado através da tecnologia de impressão 3D, além dos componentes eletrônicos, eletromecânicos e óticos já citados contempla também com peças em alumínio e elementos de fixação mecânica como parafusos, buchas e adesivos. A Figura 35 apresenta diversas vistas do protótipo que possui dimensional de 195x190x136 mm (AxLxC) e a Figura 36 com modelo real do protótipo finalizado.

Figura 35 – Modelo Virtual em 3D.



Fonte: AUTOR (2017).

Figura 36 – Modelo real finalizado do protótipo.



Fonte: AUTOR (2017).

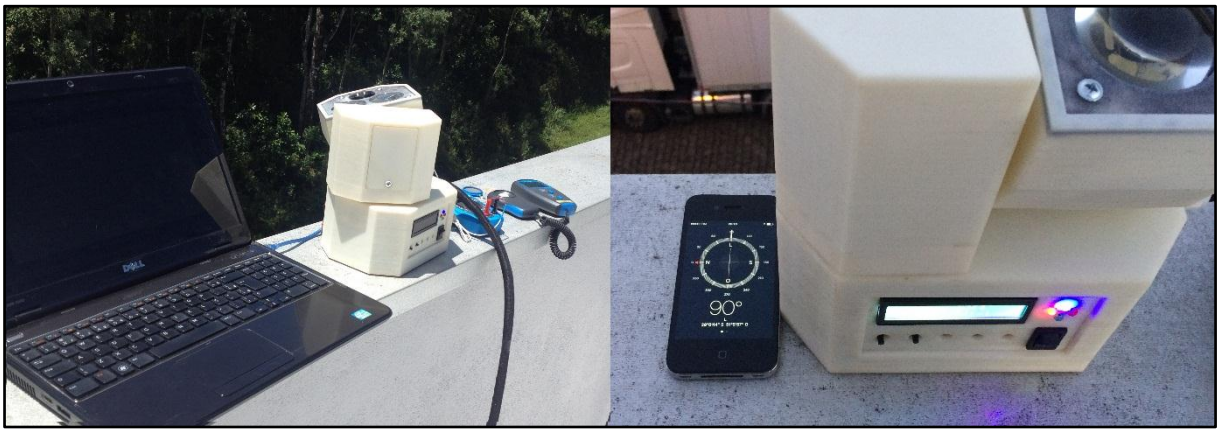
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento das etapas apresentadas anteriormente e as ferramentas e dispositivos utilizados em todos testes.

4.1 POSICIONAMENTO DO PROTÓTIPO PARA TESTES

De modo a favorecer a maior amplitude angular de captação luminosa, o protótipo foi instalado no ponto mais alto disponível, no terraço de um prédio de cinco pavimentos situado em Caxias do Sul, RS, com a face frontal direcionada a leste, conforme Figura 37.

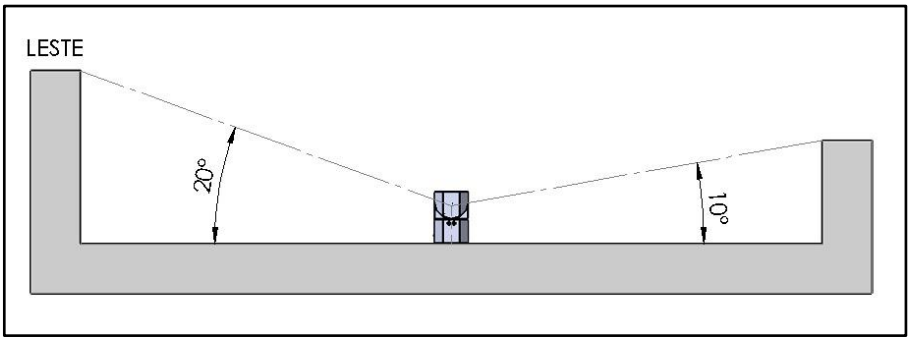
Figura 37 – Posicionamento para Testes.



Fonte: AUTOR (2017).

Nessa posição a restrição angular imposta ao sistema, por obstáculos presentes no entorno como árvores e edificações, limitou o curso máximo na coordenada DC em 20° sentido leste e 10° sentido à oeste, conforme representado na Figura 38, devido a menor amplitude utilizada a coordenada AR não apresentou restrição.

Figura 38 – Amplitude efetiva do local instalado.

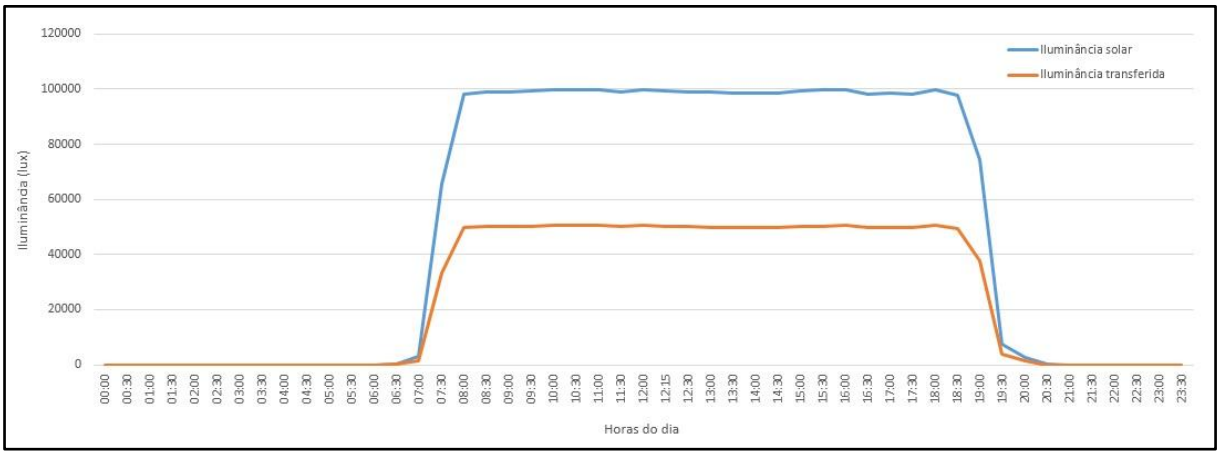


Fonte: AUTOR (2017).

4.2 PERÍODO EEFICIENTE E INTENSIDADE LUMINOSA

Durante o desenvolvimento do protótipo foram feitos testes parciais em uma fração do dia, com diferentes condições e intensidades luminosas. O dia eleito para realização de um teste completo de duração máxima diária foi em 15/11/2017, com condição solar predominante, a iluminância solar e iluminância transferida podem ser avaliadas na Figura 39.

Figura 39 – Iluminância solar e iluminância transferida.



Fonte: AUTOR (2017).

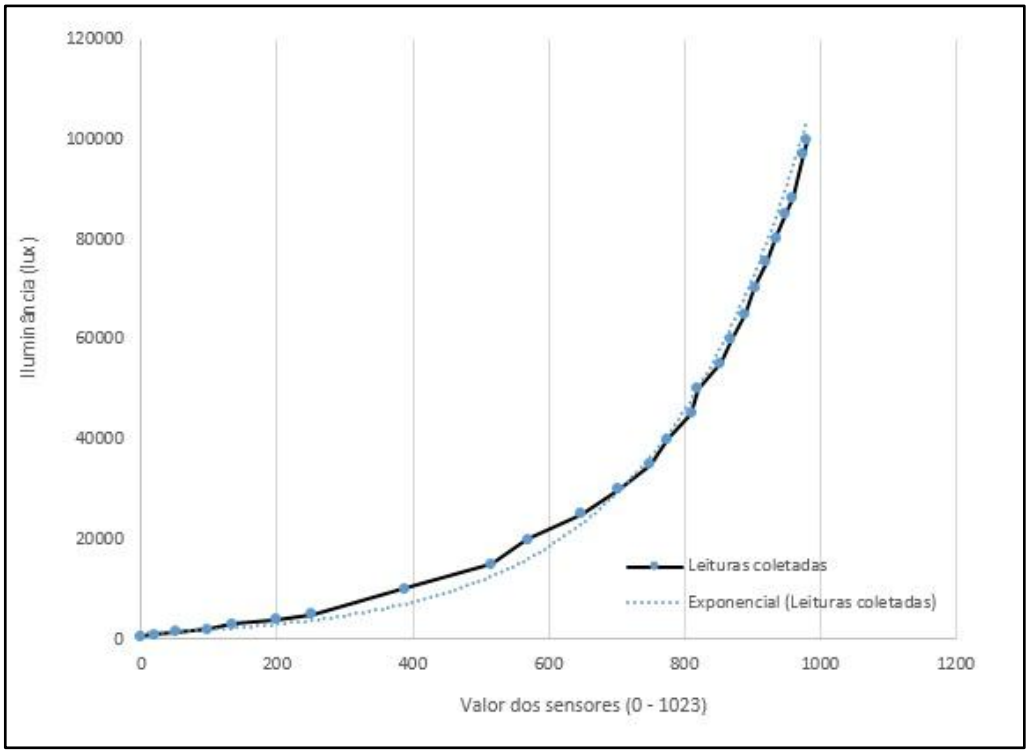
Com o nascer do sol ocorrido as 6:22 no horário local, o período eficiente da máxima iluminância iniciou aproximadamente às 8:00 horas, obtendo a leitura da iluminância solar de 98.200 lx e transferência de 49.700 lx mensurada na extremidade

difusora do cabo optico. O período eficiente se encerrou aproximadamente às 18:30, com 97.200 lx e 49500 lx respectivamente, o pôr do sol ocorreu às 19:57. Com duração de10,5 horas, a intensidade média calculada foi de 98.850 lx com variação de +-1%.

4.3 CURVA DE RESPOSTA DO CONE SENSOR

Interpolando os valores de iluminância solar com o valor médio lido pelo cone sensor ao longo do dia testado, foi gerado o gráfico no software Excel da Microsoft com a curva de resposta apresentada na Figura 40. Utilizando método por aproximação exponencial que o software possui, foi obtido o modelo algébrico da curva de resposta do cone sensor da curva amostrada e apresentada na Equação 12.

Figura 40 – Curva de resposta do cone sensor.



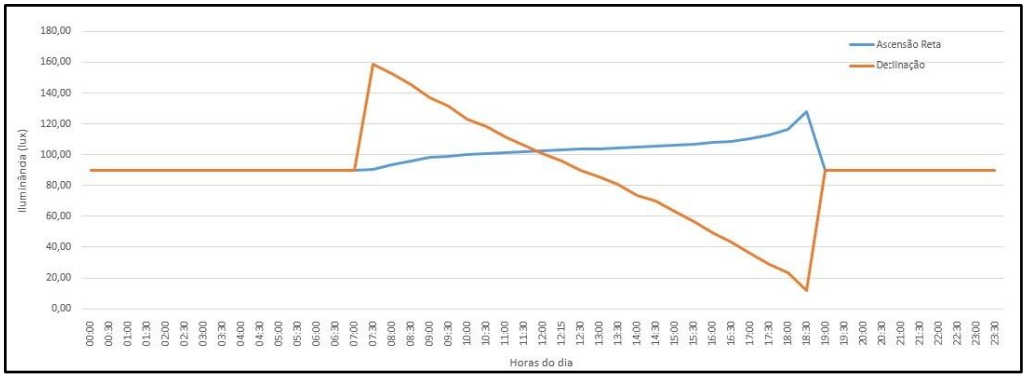
Fonte: AUTOR (2017).

$$Iluminância = 1465{,}5 * e^{0{,}0043\ ValorSensor} \quad (12)$$

4.4 TRAJETÓRIA AO LONGO DO DIA AMOSTRADO

A trajetória solar rastreada ao longo do dia amostrado está apresentada na Figura 41, podendo-se observar a correção em ambas coordenadas, sendo que conforme esperado a variação na declinação foi superior a coordenada de ascensão reta. Durante o rastreamento ocorreram 8 eventos de falha intervalados, ambos devida a variação na iluminância solar, atingindo níveis abaixo do limite estabelecido para eficiência, inferindo 5 minutos de pausa em cada evento falho.

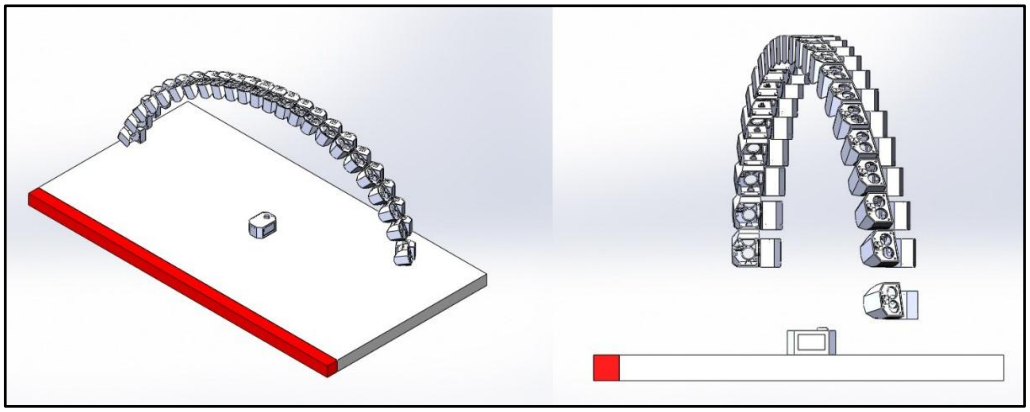
Figura 41 – Trajetória solar no dia amostrado.



Fonte: AUTOR (2017).

A trajetória amostrada foi inferida virtualmente em um modelo tridimensional, representada na Figura 42, com destaque na variação angular dos elementos móveis do dispositivo, a orientação norte está representada pela indicação vermelha.

Figura 42 – Simulado virtual da trajetória amostrada.



Fonte: AUTOR (2017).

4.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O fluxo luminoso obtido na extremidade do feixe de fibras opticas, dentro do período efetivo e com luminosidade solar de 98,5 mil lux, foi de 50,5 mil lux, mensurados através de um luxímetro da marca Minipa, com região sensorial semiesférica de Ø22 mm, conforme Figura 43. Foi utilizado um anel de borracha flexível entre a extremidade do feixe de fibras e o entorno da região sensorial do instrumento para obter uma medida consistente do fluxo luminoso.

Figura 43 – Medição da iluminância solar e transferida.



Fonte: AUTOR (2017).

Como forma de obter um comparativo de eficiência energética com outras fontes de luminosidade, se fez necessário a quantização da intensidade luminosa em lumens por watt. Utilizando como base a Equação 2, o fluxo luminoso obtido e a área da superfície semiesférica do luxímetro, o cálculo da intensidade luminosa é apresentado na Equação 13.

$$dF = lx * dA = 50{,}5Klx * \left(\frac{4*\pi*0{,}011^2 m}{2}\right) \cong 38{,}393\ lm \qquad (13)$$

Para fins de cálculo da potência consumida os periféricos dispensáveis como display e LEDs indicativos foram subtraídos do consumo, uma vez que no protótipo possuem a função de indicação instantânea de parâmetros para avaliação. De acordo com os dados técnicos e medições comprobatórias do servomotor, sensor e controlador, os cálculos de potência são apresentados nas Equação 14, 15 e 16.

$$Pservo = V * I = 6 * 0{,}1 = 6x10^{-1}W \quad (14)$$

$$Psensor = V * I = 5 * 0{,}015 = 75x10^{-3}W \quad (15)$$

$$Pcontrolador = V * I = 6 * 0{,}045 = 270x10^{-3}W \quad (16)$$

O consumo de energia de um dispositivo é determinado pela multiplicação da potência pela variação de tempo utilizado em horas, a Equação 17 apresenta essa relação, obtendo-se a resposta em W/h.

$$E = P * \Delta t \quad (17)$$

Considerando o caminho crítico do fluxograma é possível obter o máximo consumo de energia através do cálculo da Equação 18.

$$Emax = (2 * Pservo * 0{,}1230) + (4 * Psensor) + (Pcontrolador) \cong 0{,}718\,Wh \quad (18)$$

Para cálculo da eficiência mínima é considerado a razão do fluxo luminoso pela máxima energia consumida, conforme apresentada na Equação 19.

$$EficiênciaMin = \frac{dF}{Emax} = \frac{38{,}393}{0{,}718} \cong 53{,}472\ lm/W \quad (19)$$

Considerando o caminho ótimo do fluxograma é possível obter o menor consumo de energia através do cálculo da Equação 20.

$$Emin = (2 * Pservo * 0{,}0258) + (4 * Psensor) + (Pcontrolador) \cong 0{,}601\ Wh \quad (20)$$

Para cálculo da eficiência máxima é considerado a razão do fluxo luminoso pela menor energia consumida, conforme apresentada na Equação 21.

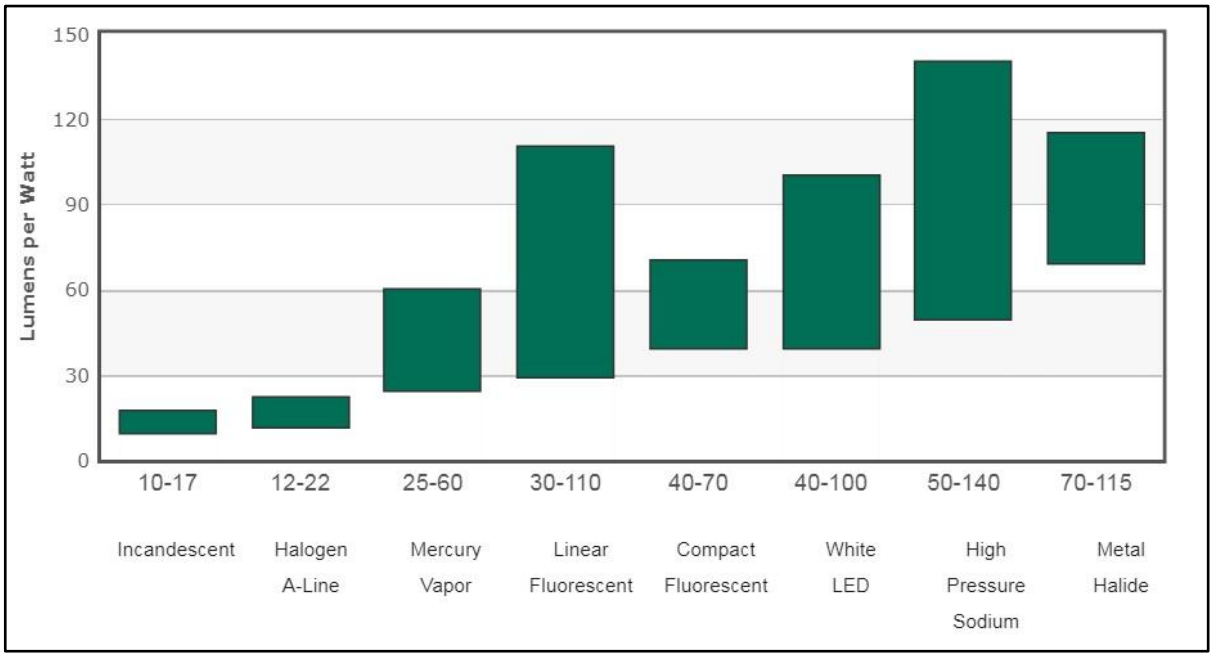
$$EficiênciaMax = \frac{dF}{Emin} = \frac{38{,}393}{0{,}601} \cong 63{,}881\ lm/W \quad (21)$$

A potência do dispositivo fora do período eficiente considera as potência do controlador e sensores, conforme apresentada na Equação 22.

$$Erepouso = (4 * Psensor) + (Pcontrolador) \cong 0{,}570\ Wh \quad (22)$$

A eficiência energética na faixa de 53,472 à 63,881 lm/W obtida com uma pequena área de captação, de 0,382 dm², evidência o potencial energético equivalente a sistemas de iluminação por fluorescentes compactas, conforme comparativo em lumens por watt apresentado na Figura 44. Se levado em consideração a relação entre a área captada com os lumens transferidos, propondo um aumento de 80% da área captada (0,688 dm²), uma vez que os acionamentos possuem o torque disponível para adição de novas lentes e afins, esse balanço atingirá a eficiência de 115 lm/W, equivalente a eficiência da lâmpada de sódio de alta pressão.

Figura 44 – Eficiência energética de fontes de iluminação.



Fonte: MGE (2017).

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

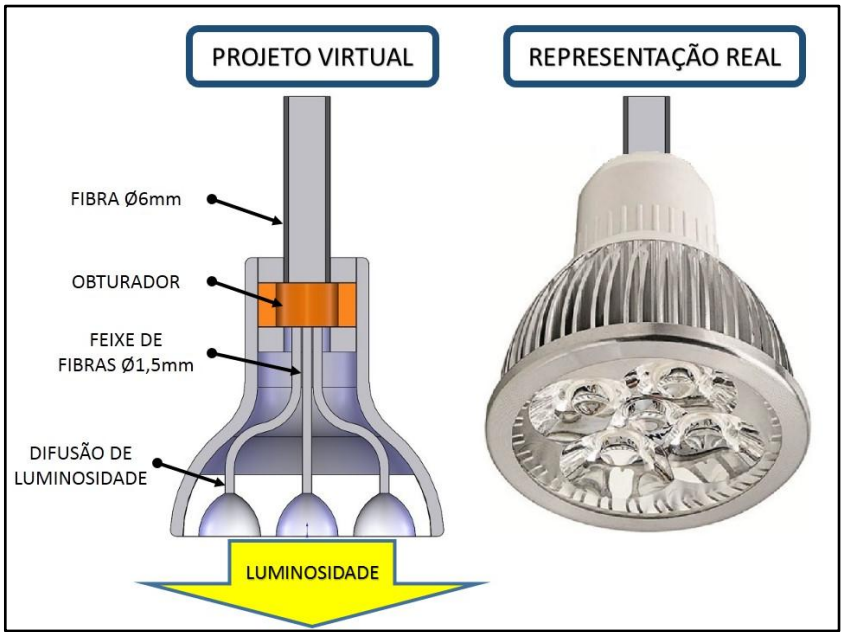
De acordo com os resultados obtidos com dispositivo protótipo, é evidente a necessidade de novos estudos serem realizados de forma a viabilizar comercialmente esse recurso energético, nesse tópico é apresentado aspectos identificados ao longo do desenvolvimento e sugerido para estudos futuros.

Se faz necessário também a criação de um banco de dados para realização de testes anuais para identificação e histórico de iluminâncias incidentes. Como contribuição o protótipo já consta um módulo de referencial de tempo instalado e configurado de modo a considerar via firmware os parâmetros de data e hora. Possibilitando até mesmo uma aplicação de posicionamento algébrico do sistema.

O potencial cliente do sistema é o setor comercial e industrial, visto que tal período de trabalho coincide com período que dispomos de luminosidade solar. Uma lâmpada incandescente de 60w ou equivalente de LED na cor branca de 10 W, comumente utilizada em sistemas de iluminação, oferece um fluxo luminoso de aproximadamente 850 lm. Como forma equivalente a essa fonte a área de captação necessária é de 8,457 dm^2, ou seja, visando atingir comercialmente a área de captação de 1 m^2 equivaleria o fluxo luminoso de 11,8 lâmpadas referência.

Se faz necessário a comutação e difusão luminosa de forma controlada, possibilitando assim a integração com sistemas convencionais de iluminação. Uma sugestão é apresentada na Figura 45, utilizando um sistema obturador para controle da luminosidade dissipada.

Figura 45 – Projeto do difusor luminoso.



Fonte: AUTOR (2017).

6. CONCLUSÃO

O emprego de energias renováveis em sistemas e produtos que contribuem para a vida do ser humano é um desafio, que requer a exploração aliando conhecimento científico com criatividade, devido a linha tênue entre o atendimento das expectativas e a eficiência energética obtida. A eficiência e o fluxo luminoso obtido com o protótipo propicia um horizonte favorável à larga escala, atingindo um fluxo luminoso de até 10.050 lumens por m², uma área pequena se levada em conta com os dimensionais praticados na construção civil, sendo assim possível a utilização até mesmo em edificações já construídas.

O presente trabalho propiciou o estudo da aplicação e levantamento dos parâmetros necessários para definição e execução de um sistema seguidor solar com sistema de captação, transferência e distribuição luminosa. O objetivo de definição do sensoriamento foi amplamente atendido, a proposta inovadora do cone sensor unificando pontualmente os sensores e utilizando a informação dos 4 sensores para tomada de decisão de sentido de cada coordenada, juntamente com o modelamento algébrico obtido. Viabilizando até mesmo um estudo para propriedade de patente do cone sensor. O objetivo, sobre a definição do sistema de movimentação em dois graus de liberdade, foi alcançado a partir da utilização dos acionamentos disponíveis comercialmente com torque especificado, cada um dedicado à movimentação em uma coordenada diferente. No que diz respeito a tratativa da luminosidade, o objetivo foi atendido, com a ressalva para o sistema de controle de luminosidade, que foi brevemente abordado uma vez que o estudo inicialmente explorado é sugerido para trabalhos futuros.

Por fim a partir da habilidade no desenvolvimento de projetos mecânicos, algo que possibilitou a integração dos componentes eletroeletrônicos e mecânicos, com atendimento de todas as peculiaridades de cada componente. Tendo em vista a continuidade da proposta e estudo dos tópicos citados como sugestão para trabalhos futuros o recurso tem grande potencial de tornar-se um produto a ser comercializado.

REFERÊNCIAS

ABILUX, **Associação Brasileira da Industria de Iluminação**. Abilux aponta medidas para reduzir o consumo de energia. Disponível em: <http://www.abilux.com.br/portal/pdf/destaques/destaque_2015-02-12.pdf>. Acessado em: 03 Abr. 2017

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5101**: Iluminação Pública. Rio de Janeiro: 2012.

AGUIRRE, L**. Fundamentos de Instrumentação**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**: Consumo. Brasília: ANEEL. 2008.

ARDUINO. **Arduino UNO & Genuino UNO.** Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>. Acesso em: 28 Maio 2017

BOYLESTAD, R, **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8ª ed. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

CAF, **Banco de Desenvolvimento da América Latina**. América Latina: em busca de um crescimento baixo em emissões. Disponível em: <https://www.caf.com/pt/presente/noticias/2017/01/america-latina-em-busca-de-um-crescimento-baixo-em-emissoes>. Acessado em: 03 Abr. 2017

CITISYSTEMS. **Servo Motor:** Veja como Funciona e Quais os Tipos**.** Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/servo-motor/>. Acesso em: 22 Maio 2017

COMETTA, E. **Energia Solar**. Utilização e empregos pragmáticos. 1ª ed. ed. São Paulo: HEMUS, 1978.

COSTA, G. **Iluminação Econômica:** Cálculo e Avaliação. 4. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2006.

DISENOFOTOGRAFIA. **Diafragma**. 2013. Disponível em: <https://disenofotografia.wordpress.com/>. Acesso em: 10 julho 2017

FIGINI, G. **Eletrônica Industrial**. Servomecanismos - Teoria da Regulagem Automática. 1ª ed. ed. Curitiba: Hemus, 2002.

GHELLERE, G. **Artigo LDR Light Dependent Resistor**. Foz do Iguaçu:2009. Disponível em: <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downcompendio/compendiov7.pdf> Acesso em: 20 Maio 2017

GIMENEZ, S. **Microcontroladores 8051**. Teoria de hardware e software/Aplicações em controle digital/Laboratório e simulação. 1ª ed. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil LTDA, 2002.

GIOZZA, W.; CONFORTI, E.; WALDMAN, H. **Fibras Opticas**. Tecnologia e projetos de sistemas. 1ª ed. ed. Rio de Janeiro: Embratel; São Paulo: Makron, 1991.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. Instituto de Energia Solar, Universidade Politécnica de Madri. Madri: Wiley, 2. ed., 2011.

MGE – Madison Gas and Eletric. Lumens Per Watt Comparison. 2017. Disponível em: <https://www.mge.com/saving-energy/home/lighting/lumens-comparison.html >. Acesso em: 09 setembro 2017.

MICROSCHIP. **PIC16F87XA** Datassheet de componente Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582b.pdf>. Acesso em: 15 Maio 2017

MICROSCHIP. **Stepping Motors Fundamentals** Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00907a.pdf>. Acesso em: 15 Maio 2017

MOREIRA, V. **Iluminação Elétrica.** São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

MURATORI, J. R.; DAL BÓ, P. H. **Automação Residencial**: Conceitos e Aplicações. 1ª. ed. Belo Horizonte: Educere, 2013.

NEWTON, I. **Optica.** Tradução, introdução e notas de André Koch T. Assis. 1ª. ed. São Paulo: EDUSP, 2002.

OGATA, K, **Engenharia de controle moderno**. 4ª ed. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

OKUNO, E; VILELA, M. **Radiação Ultravioleta: Características e Efeito**.1ª ed. ed. São Paulo: SBF - Sociedade Brasileira de Física, 2005.

OSRAM. **Iluminação: Conceitos e Projetos.** Nota de aplicação 2008. Disponível em:<http:/www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/manuais/Osram/apostila_conceitos_e_projetos_osram.pdf> Acesso em: 19 de março de 2017.

ROBBINS, C. **Daylighting. design and analysis**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986.

SIEMENS. **SFH 213 E SFH 213 FA** Datassheet de componente Disponível em: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/45622/SIEMENS/SFH213.html>. Acesso em: 15 Maio 2017

SMARTGLASS. **Vidros inteligentes**. 2017. Disponível em: <http://www.smartglass.net.br >. Acesso em: 23 Abril 2017.

SZOKOLAY, S. **Passive and low energy design for thermal and visual comfort**. In: PLEA 84. Cidade do México: 1984.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil** – Banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acesso em: 05 Abril 2017.

TOWERPRO. **MG995.** Disponível em: <http://www.towerpro.com.tw/product/mg995/>. Acesso em: 20 Abril 2017

TREEHUNGGER. **Daylighting Is Making a Comeback**. 2009. Disponível em: <https://www.treehugger.com/sustainable-product-design/daylighting-is-making-a-comeback.html>. Acesso em: 10 julho 2017.

UFRGS. **Astronomia e Astrofísica**. Site da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/ >. Acesso em: 15 Maio 2017

YOUNG, H. **Física IV**. Ótica e física moderna. 1ª ed. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2004.

APÊNDICE A

ESQUEMA ELETRICO DO PROTÓTIPO

