

Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá

Um estudo sobre os Sistemas de
Iluminação Automáticos e os Sistemas
de Controle Distribuído para automação
predial

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100052120

Orientador: Prof. Tit. Mário Pinotti Junior


São Carlos
2004



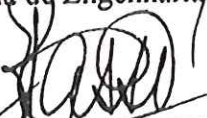
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ÁLVARO MESSIAS BIGONHA TIBIRIÇÁ**

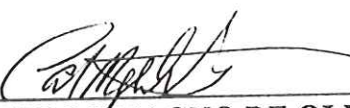
Dissertação defendida e julgada em 25-10-2004 perante a Comissão Julgadora:



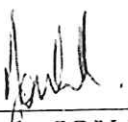
Prof. Titular **MÁRIO PINOTTI JUNIOR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) aprovado



Prof. Dr. **ADMIR BASSO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) aprovado



Prof. Dr. **CARLOS MAGNO DE OLIVEIRA VALENTE**
(Centro Universitário de Araraquara/UNIARA) aprovado



Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica



Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Aos meus pais e ao meu irmão, pessoas especiais com as
quais sempre pude contar e que sempre me incentivaram e
auxiliaram pelos caminhos que percorri.

Agradecimentos

São inúmeras as pessoas com que contamos no dia-a-dia, sem as quais qualquer trabalho seria muitas vezes mais custoso. Deixo aqui, os meus agradecimentos a algumas destas pessoas que participaram ativamente da minha vida e deste trabalho durante estes últimos quase 30 meses:

- ao meu orientador, Prof. Tit. Mário Pinotti Junior, por sua inestimável amizade, conselhos e sugestões;
- ao Prof. Passarini, chefe do Laboratório de Eletrônica Embarcada, pela amizade e contribuição para que este trabalho pudesse ser realizado;
- à Cíntia, pelo apoio, carinho e compreensão nesta caminhada final;
- ao Cristiano, meu irmão, pela amizade, pelo companheirismo e pela parceria em muitos momentos deste trabalho;
- aos meus pais, pelo incentivo, amor, ajuda e por participarem ativamente da minha vida dando conforto nos momentos mais difíceis;
- à equipe e aos colegas do Laboratório de Eletrônica Embarcada (Carlão, Dennis, Fabiano, Josemar, Márcio, Marcão,...);
- aos inúmeros professores que contribuíram para minha formação, em especial, aos professores Admir Basso e Rosana Caram do Departamento de Arquitetura (EESC) com os quais tive a oportunidade de aprender um pouco mais sobre o tema desta dissertação e analisá-lo sob uma ótica diferente da dos engenheiros de controle;
- à CAPES, por ter financiado em forma de bolsa este trabalho de mestrado;
- à FAPESP, por ter financiado a compra dos equipamentos utilizados neste trabalho.

“Quando Deus iniciou a criação do céu e da terra, a terra era deserta e vazia, e havia treva na superfície do abismo; o sopro de Deus pairava na superfície das águas, e Deus disse: ‘Que a luz seja!’ E a luz veio a ser. Deus viu que a luz era boa. Deus separou a luz da treva. Deus chamou a luz de ‘dia’ e à treva de ‘noite’. Houve uma tarde, houve uma manhã: o primeiro dia.”

Bíblia Sagrada – Gênesis 1,1-5

Resumo

TIBIRIÇÁ, A. M. B. **Um estudo sobre os Sistemas de Iluminação Automáticos e os Sistemas de Controle Distribuído para automação predial.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

Este trabalho faz um levantamento dos Sistemas de Iluminação Automáticos (SIA) utilizados atualmente, das tecnologias empregadas e das linhas de pesquisas que vêm surgindo neste tema. É analisada também a relação dos sistemas de controle distribuído (SCD) com os SIA e com a automação predial. Um estudo de caso de um SIA que utiliza um SCD como plataforma tecnológica também é analisado. Ao final da dissertação, propõe-se uma tese, fruto das análises feitas durante este trabalho, que visa aumentar a modularidade, a flexibilidade e a interoperabilidade dos sistemas de automação predial baseados em SCD. Durante a dissertação são descritas: as características da luz; a relação entre a luz e o ser humano; os principais componentes de um SIA; as características básicas de um SCD; e a tecnologia Lonworks.

Palavras chaves: automação predial; iluminação; Lonworks; sistemas de iluminação automáticos; sistemas de controle distribuído.

Abstract

TIBIRIÇÁ, A. M. B. **A study of Illumination Automatic Systems and Distributed Control Systems for building automation.** M. Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

This work describes the Illumination Automatic Systems (IAS) used nowadays, the used technologies and the research lines that arise in this knowledge area. It's also analyzed the relation between Distributed Control Systems (DCS), IAS and building automation. A case study is done with a system that uses IAS and DCS. In the end of this work, it's suggested a thesis, result of analyses done during this work, with the objective of increasing the modularity, flexibility and interoperability of buildings automation systems based on DCS technologies. During this dissertation is described: the light characteristics; the relation between light and the human being; the main components of IAS; the characteristics of a DCS; and the Lonworks technology.

Keywords: building automation; distributed control systems; illumination; illumination control systems; Lonworks.

Lista de Figuras

Figura 1 - Consumo médio (kWh/(m ² .mês)) – 1995.....	3
Figura 2 - Espectro eletromagnético (em comprimentos de onda) – adaptado de (LIGHT RESEARCH CENTER, 2000).....	9
Figura 3 - Exemplo de absorvância, da refletância e da transmitância.	11
Figura 4 - Reflexão direta (a), reflexão mista (b) e reflexão difusa (c) – retirado de (LIGHT RESEARCH CENTER, 2000).....	11
Figura 5 - Olho humano – retirado de (SEUS OLHOS, 2004).....	14
Figura 6 - Sensibilidade dos três tipos de cones (receptores) em diferentes comprimentos de onda – adaptado de (SCHILER e JAPEE).	15
Figura 7 - Curva de sensibilidade do olho – eficácia luminosa espectral – retirado de (OSRAM).....	15
Figura 8 - Esquema: fluxo luminoso, iluminância e intensidade luminosa – adaptado de (SCHILER e JAPEE).....	18
Figura 9 - Variações circadianas de algumas funções no corpo humano – adaptado de (UNITED STATES CONGRESS, 1992).....	20
Figura 10 - Deslocamento do ciclo circadiano em função da quantidade de luz e do horário de aplicação desta – adaptado de (REA, 2002).	21
Figura 11 - Performance visual relativa para a leitura de um material de alto contraste, e a supressão relativa de melatonina pela luz em função da iluminância no olho – adaptado de (REA, 2002).....	23
Figura 12 - Sensibilidade espectral fotópica, escotópica e do ciclo circadiano (empírica) – adaptado de (REA, 2002).	23
Figura 13 - Quantidade de tempo necessário para medir a supressão de melatonina pela luz durante a noite, como uma função da iluminância observada no olho – adaptado de (REA, 2002).	24
Figura 14 – Desenho esquemático da relação entre os elementos de um sistema de controle.....	25
Figura 15 – Esquema: sensores e os sistemas de controle.	26
Figura 16 - Esquema do funcionamento dos sensores de ocupação ultra-sônicos: quando algum corpo se movimenta dentro da área de atuação do sensor há uma variação na frequência das ondas recebidas – retirado de LIGHT RESEARCH CENTER (1997).	29
Figura 17 - Painel de cena.....	30
Figura 18 - Interruptores deslizantes e rotativos – retirado de (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION, 1992).....	30
Figura 19 – Esquema: os atuadores e os sistemas de controle.	32
Figura 20 - Formatos comuns de lâmpadas incandescentes – retirado de (LIGHT RESEARCH CENTER, 2000).....	32
Figura 21 - Eficiência luminosa de diferentes tipos de lâmpadas (Dulux, Metálica HQI, Lumilux e Sódio NAV são modelos da Osram) – retirado de (OSRAM).....	34
Figura 22 - Exemplo de uma CDL. (tracejada – longitudinal / cheia – transversal) – retirado de (OSRAM).	35
Figura 23 – Esquema: utilização de venezianas automáticas em um SIA – adaptado de (LEE, DIBARTOLOMEO e SELKOWITZ, 1998).	36
Figura 24 - Vidro eletrocromico com transmitância total e transmitância parcial – retirado de (LEE, DIBARTOLOMEO e SELKOWITZ, 2004).	37
Figura 25 – Esquema: os controladores e os sistemas de controle.	38
Figura 26 – Sistema de Controle Centralizado.....	45
Figura 27 – Sistema de Controle Distribuído.....	46
Figura 28 – Níveis do modelo OSI – retirado de (SOARES, LEMOS e COLCHER, 1995).	48
Figura 29 – Modelo de um sistema orientado a objetos – retirado de (COLLEMAN <i>et al</i> , 1996).	51
Figura 30 – Esquema de uma classe e suas instâncias.	52
Figura 31 – SCDOO utilizando o Método de Comunicação por Portas.....	53
Figura 32 – Esquema de configuração de uma rede Lonworks – retirado de (TOSHIBA).	56
Figura 33 – Funcionamento dos <i>slots</i> de tempo e prioridade no protocolo Lontalk.....	56
Figura 34 – Conexão das variáveis de redes entre três nós.	57
Figura 35 – Esquema dos nós Lonworks.....	58

Figura 36 – Diagrama de blocos do Neuron Chip – retirado de (TOSHIBA).....	58
Figura 37 – Representação gráfica de um bloco funcional (interface).....	61
Figura 38 – Esquema das conexões entre blocos funcionais.	62
Figura 39 – Esquema de um sistema de iluminação Lonworks.	62
Figura 40 – Esquema da sala no LEE onde está instalado o SIA.	64
Figura 41 – LRI 5133/10.....	64
Figura 42 – LRC 5042/00.....	64
Figura 43 – Luminária Philips TCS 312 para lâmpadas de 32 W.	65
Figura 44 – Esquema da disposição dos componentes do SIA na sala.....	66
Figura 45 – Conexão física dos componentes de um SIA.....	66
Figura 46 – Blocos funcionais do sensor de luz e ocupação (LRI 5133/10).	67
Figura 47 – Bloco funcional Switch do interruptor.	67
Figura 48 – Bloco funcional de controle da iluminação do controlador (LRC 5042/00).....	68
Figura 49 – Tela principal do Lonmaker contendo os subsistemas implementados no LEE e os dispositivos de interface com o computador e de uso geral (interruptores).....	70
Figura 50 - WA – 1 & 6 – subsistema de iluminação das áreas de trabalho 1 e 6.....	71
Figura 51 – Sugestão de interconexão entre blocos funcionais da Lonmark para a área de iluminação.	77
Figura 52 – Esquema da ligação do interruptor com o Neuron Chip.	93
Figura 53 – Localização e nome das luminárias.	100
Figura 54 – Distribuição de iluminâncias das luminárias da iluminação geral (em lux).....	101
Figura 55 – Distribuição de iluminâncias das luminárias da área de trabalho 1 (em lux).	101
Figura 56 – Distribuição de iluminâncias das luminárias da área de trabalho 2 (em lux).	102
Figura 57 – Distribuição de iluminâncias das luminárias da área de trabalho 3 (em lux).	102
Figura 58 – Relação entre o valor de comando e o valor real da iluminância e da potência das lâmpadas.	103

Lista de Quadros

Quadro 1 – Camadas do protocolo LonTalk.....	55
Quadro 2 – Canais Lonworks mais utilizados.....	55
Quadro 3 – Canais padronizados e recomendados pela Lonmark.	60
Quadro 4 – Exemplos de variáveis de rede padrão (SNVTs) definidas pela Lonmark.	60
Quadro 5 – Exemplos de algoritmos de controle para SIA.....	78
Quadro 6 – Trafego na rede Lonworks do LEE.....	104

Lista de siglas

SCD	Sistema(s) de Controle Distribuído
SI	Sistema Internacional de Unidades
SIA	Sistema(s) de Iluminação Automático(s)

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. LUZ, VISÃO E CICLO CIRCADIANO	7
2.1. LUZ	8
2.1.1. RADIOMETRIA	9
2.1.2. PROPRIEDADES DA LUZ	10
2.1.3. PRODUÇÃO DE LUZ.....	12
2.2. VISÃO	14
2.2.1. FOTOMETRIA.....	16
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DA VISÃO RELEVANTES À ILUMINAÇÃO	18
2.3. CICLO CIRCADIANO.....	20
2.3.1. FOTOMETRIA PARA O CICLO CIRCADIANO	22
3. COMPONENTES DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO AUTOMÁTICO	25
3.1. SENSORES.....	26
3.1.1. SENSORES DE LUZ	26
3.1.2. SENSORES DE MOVIMENTO	28
3.1.3. INTERRUPTORES	30
3.1.4. SENSORES DE POSICIONAMENTO SOLAR.....	30
3.1.5. SENSORES HORÁRIOS.....	31
3.1.6. SENSORES DE CONSUMO ENERGÉTICO	31
3.1.7. SENSORES DE POSICIONAMENTO DE CORTINAS/JANELAS.....	31
3.1.8. SENSORES DE TRANSMITÂNCIA DE VIDRO	31
3.2. ATUADORES	32
3.2.1. LÂMPADAS	32
3.2.1.1. Luminárias	35
3.2.2. CORTINAS/VENEZIANAS AUTOMÁTICAS.....	36
3.2.3. VIDROS ELETROCRÔMICOS.....	37
3.3. CONTROLADORES E ALGORITMOS DE CONTROLE.....	38
3.3.1. PROGRAMAÇÃO POR HORÁRIO	39
3.3.2. PROGRAMAÇÃO POR OCUPAÇÃO	39
3.3.3. PROGRAMAÇÃO POR CONSUMO ENERGÉTICO.....	39
3.3.4. PROGRAMAÇÃO POR NÍVEL DE ILUMINÂNCIA	40
3.3.5. PROGRAMAÇÃO POR POSICIONAMENTO SOLAR.....	40
3.3.6. PROGRAMAÇÃO POR EVENTOS	41
3.3.7. PROGRAMAÇÃO PARA SATISFAÇÃO DO USUÁRIO	41
3.4. INTEGRAÇÃO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO AUTOMÁTICO COM OUTROS SISTEMAS PREDIAIS.....	43
4. SISTEMAS DE CONTROLE DISTRIBUÍDO	45
4.1. O MODELO DE REFERÊNCIA ISO OSI.....	48
4.2. ORIENTAÇÃO OBJETO	50
4.2.1. CONCEITOS	51
4.3. A TECNOLOGIA LONWORKS.....	54
4.3.1. LONTALK – O PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO	54
4.3.2. O NÓ LONWORKS	58
4.3.3. LONMARK, A INTEROPERABILIDADE E OS OBJETOS	59

5. <u>UM ESTUDO DE CASO DE UM SISTEMA DE ILUMINAÇÃO AUTOMÁTICO LONWORKS..</u>	63
5.1. O SIA E SEUS COMPONENTES	64
5.2. OS BLOCOS FUNCIONAIS DO SIA	67
5.3. A CONFIGURAÇÃO DOS BLOCOS FUNCIONAIS	70
5.4. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO AUTOMÁTICO.....	73
6. <u>ANÁLISE DOS BLOCOS FUNCIONAIS DA TECNOLOGIA LONWORKS PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO AUTOMÁTICOS E APLICAÇÕES EM AUTOMAÇÃO PREDIAL...</u>	75
7. <u>CONCLUSÕES</u>	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
APÊNDICE A – DOCUMENTAÇÃO DO SWITCH	93
APÊNDICE B – DADOS LEVANTADOS	100
ÍNDICE.....	105

1. Introdução

“O homem é um ser totalmente dependente da luz, pois cerca de 70% da percepção humana é visual. Ela faz parte de sua vida, do seu dia-a-dia, do seu modo de habitar. Desde que nasce, o homem está sendo submetido ao ritmo da natureza, da existência da noite e do dia, elementos que são condições necessárias para que ele se sinta pertencente ao próprio tempo” (VIANNA e GONÇALVES, 2001). A luz é o agente ambiental mais importante para a sincronização dos ritmos biológicos com o ciclo de 24 horas da Terra (UNITED STATES CONGRESS, 1991), e exerce importante papel na regulação do comportamento humano, incluindo o ciclo dormir/acordar e as depressões sazonais (comuns em grandes latitudes) (FIGUEIRO *et al.*, 2002). Embora muitas vezes de forma despercebida, a iluminação sempre esteve presente na história da humanidade. “Se no início dos tempos a civilização preocupava-se com fogo, hoje preocupa-se com a obtenção de mais luz com menos dispêndio de energia” (COSTA, 2000).

Nas sociedades modernas, segundo Kolokotsa *et al.* (2001), as pessoas passam 80% da vida dentro das edificações. No entanto, pouca ênfase ainda é dada à qualidade desses ambientes. Promover condições de conforto e eficiência energética nos ambientes construídos tem se tornado cada dia mais importante. A melhora na qualidade dos ambientes contribui para o aumento da produtividade dos usuários e a diminuição do estresse provocado pelo desconforto ambiental, o que repercute diretamente na qualidade dos serviços e na qualidade de vida das pessoas. Nesse contexto, a iluminação desempenha um papel importante, assim como os sistemas de controle e automação predial que vêm sendo integrados, cada vez mais, às edificações.

Do ponto de vista energético, a iluminação é responsável por 24% da energia elétrica usada em edifícios comerciais no Brasil (PINTO, 2000). Geller, *apud* em

(DUTRA *et al.*, 1998), aponta que no setor público brasileiro essa fatia é de 44%. O autor ainda ressalta que em prédios públicos onde não há condicionamento de ar, o consumo de energia elétrica com iluminação representa 90% do todo. Do total da energia consumida no Brasil, 17% é com iluminação (COSTA, 2000). Esses dados refletem a importância dos sistemas de iluminação no consumo energético das edificações e na matriz energética brasileira, e a necessidade de racionalização do uso da energia elétrica consumida com iluminação.

Segundo Kolokotsa *et al.* (2001), os sistemas prediais que utilizam somente controle manual, inclusive o de iluminação, têm se mostrado desastrosos no quesito eficiência energética; por exemplo, mantendo-se cortinas fechadas durante o dia, bloqueia-se a entrada da luz natural, requerendo-se ligar lâmpadas, inclusive em locais desocupados, etc. A tendência de incorporação de controladores automáticos nas edificações tem sido cada vez maior. Novos controladores têm melhorado o desempenho energético e a manutenção dos sistemas prediais (GUILLEMIN e MOLTENI, 2002).

Um importante levantamento do consumo energético de edifícios comerciais administrativos em São Paulo foi realizado por Pinto (2000), e permite comparar a eficiência energética de edifícios automatizados e não automatizados. Foram considerados 143 edifícios, classificados em quatro grandes grupos:

Grupo 1 – Edifícios com sistema de automação e políticas de conservação de energia (12 edifícios)

- aproveitamento da iluminação natural;
- eficiência na programação horária dos serviços prestados;
- materiais utilizados na edificação, por exemplo, materiais com condutividade térmica baixa, forma e dimensão bem projetadas;
- regime de ocupação bem dimensionado; e
- racionalização da utilização do condicionamento.

Grupo 2 – Edifícios com sistema de automação (17 edifícios)

Para estes edifícios não foram considerados fatores de construção e aspectos arquitetônicos. Foi considerada a capacidade dos sistemas de automação para redução do consumo de energia, redução dos custos operacionais e controle da edificação.

Grupo 3 – Edifícios com políticas de conservação de energia (39 edifícios)

Nesse grupo de edifícios foram observados os mesmos fatores descritos no grupo 1, apenas não existindo a otimização dos recursos da edificação propiciados por um sistema de automação.

Grupo 4 – Edifícios sem preocupação com conservação de energia (75 edifícios)

Não se encontra nenhum dos fatores citados nos casos anteriores; vê-se que a maioria dos edifícios amostrados nesse grupo traz soluções de construção, arquitetura e dimensionamento de equipamentos utilizando tecnologia de países cujas variáveis climáticas não são semelhantes às brasileiras.

O consumo energético dos edifícios de cada um dos quatro grupos foi levantado no ano de 1995. A Figura 1 mostra o consumo médio dos grupos por unidade de área e por mês.

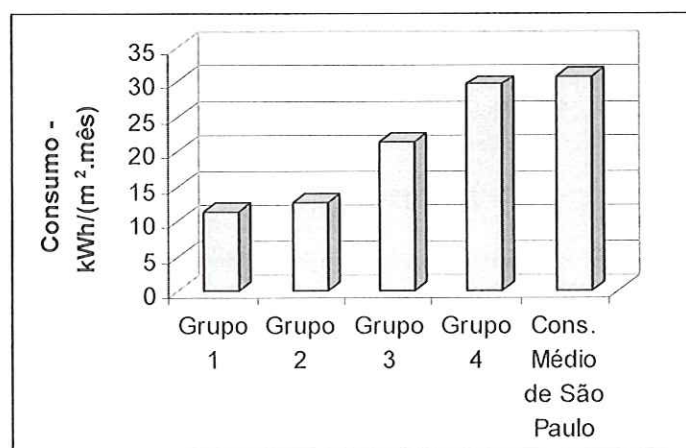


Figura 1 - Consumo médio (kWh/(m².mês)) – 1995

Os edifícios do **grupo 3** (edificações com políticas de conservação de energia), projetados adequadamente do ponto de vista arquitetônico e de eficiência energética, obtiveram uma economia energética em torno de 30% em relação aos do **grupo 4**. Já os edifícios dos **grupos 1 e 2** (edificações com sistemas de automação) obtiveram economia na ordem de 60% em relação ao **grupo 4**. Esses resultados demonstram o potencial da automação predial na eficiência energética das edificações e conseqüentemente a potencialidade dos **Sistemas de Iluminação Automáticos – SIA** – na economia de energia. Historicamente, os SIA que integram iluminação natural e artificial podem reduzir de 30% a 60% o consumo de energia elétrica com iluminação (ATIF e GALASIU, 2003).

Os SIA são de grande importância para economia energética. Entretanto, outras conseqüências financeiras relevantes são tão ou mais importantes que esta. Destacam-se as seguintes (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION, 1992):

- **Aumento de produtividade dos usuários.** Um aumento de produtividade é obtido quando é dada ao usuário condição ótima de iluminação – quantidade e qualidade de luz. Tarefas e usuários diferentes necessitam de condições de iluminação diferentes. A possibilidade de ajuste eficiente e rápido da condição de iluminação, proporcionada pelos SIA, é requisito necessário e intimamente relacionado à produtividade.
- **Prevenção de poluição.** A economia de eletricidade proporcionada pelos SIA, evita poluição causada na geração de energia elétrica.
- **Diminuição das taxas de erro em ambientes de trabalho.** Assim como aumentam a produtividade, SIA que garantam boas condições de iluminação diminuem as taxas de erros e acidentes de trabalho.
- **Aumento de flexibilidade dos ambientes.** A flexibilidade e a possibilidade de ajuste dos SIA permitem que o mesmo ambiente possa ser utilizado com diferentes condições de iluminação por pessoas diferentes e para funções que requerem diferentes níveis de luz.
- **Melhoramento da estética.** O controle da iluminação tem um papel importante na estética dos ambientes: cria realces/contrastes, estabelece efeitos visuais em paredes, ilumina objetos específicos, etc. O ajuste fino necessário às aplicações de estética só é obtido através de um bom sistema de controle.

- **Alteração do humor.** Os sistemas de controle podem, através do ajuste da iluminação ambiente, provocar variações no humor como estimular ou relaxar os usuários.
- **Valor agregado á edificação.** Edificações que possuem SIA têm um valor de mercado maior que edificações similares que não fazem uso deste tipo de tecnologia.
- **Facilidade de gerência/manutenção.** Sistemas de controle microprocessados facilitam a manutenção, o monitoramento e o gerenciamento da iluminação.

Sistemas de controle microprocessados para iluminação, ou SIA, vêm ganhando adeptos desde a década de 1980 em todo o mundo, principalmente porque se pagam com a economia de energia conseguida (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION, 1992) e porque trazem benefícios que melhoram a qualidade de vida do homem. No entanto, eles têm sido baseados em padrões fechados dos fabricantes, o que tem limitado a capacidade de operação entre produtos de diferentes fabricantes num mesmo sistema (HELVAR MERCA LIMITED, 2000).

São diversos os componentes utilizados atualmente em um SIA: sensores de ocupação, sensores de luz, interruptores, temporizadores, reatores eletrônicos dimerizáveis, cortinas motorizadas, vidros eletrocromicos, venezianas motorizadas, etc. A integração harmônica de todos esses componentes é um desafio nos tempos atuais: o mercado de componentes para os SIA é fragmentado, fabricantes freqüentemente produzem produtos que não trabalham bem em conjunto (RUBINSTEIN, JENNINGS e PETTLER, 2002).

A utilização de tecnologias que integrem produtos de diferentes fabricantes e dos diversos sistemas prediais em único sistema, de forma harmônica, é tão importante quanto as próprias soluções que têm sido encontradas para problemas de automação predial. Para uma edificação funcionar como um sistema integrado, o ingrediente tecnológico final necessário é um Sistema de Controle Distribuído (SCD).

“O SCD precisa, idealmente, operar em tempo real, e ter interfaces de comunicação de baixo custo como a natureza dos próprios componentes utilizados nos prédios” (SHARPLES, CALLAGHAN e CLARKE, 1999). As tecnologias de SCD incorporam processamento em cada componente, o que agrega “inteligência” ao

componente e permite que ele se comunique com os demais componentes acoplados à rede. Utilizar um SCD resolve não só o problema da interoperabilidade entre produtos de diferentes fabricantes, como possibilita a integração entre os diversos subsistemas prediais: iluminação, condicionamento de ar, controle de acesso, incêndio, etc.

À luz do anteriormente exposto, este trabalho objetiva: 1) levantar o estado da arte dos Sistemas de Iluminação Automáticos (SIA) e as influências dos sistemas de iluminação na qualidade de vida do ser humano, assim como para economia de energia de um modo geral; 2) caracterizar a importância e as vantagens da utilização de Sistemas de Controle Distribuído (SCD) nos sistemas de automação predial; 3) analisar os novos paradigmas que se propõem aos SIA e à automação predial frente aos SCD.

2. Luz, visão e ciclo circadiano

A luz tem um papel fundamental na vida humana. É difícil imaginar o desenvolvimento da espécie humana sem luz: “É a luz que incide nos objetos que torna possível vê-los e orientarmo-nos no espaço” (JDÁNOV e JDÁNOV, 1985). A grande maioria das atividades humanas não seria possível na ausência de luz. Controlar a luz que ilumina os ambientes é fator determinante na qualidade de vida do ser humano. Só é possível projetar Sistemas de Iluminação Automáticos (SIA) com qualidade quando se conhecem os fenômenos físicos que envolvem a luz, assim como os efeitos e a influência da luz na visão e no funcionamento do corpo humano.

Por mais de 100 anos, os estudos na área de iluminação foram focados nos efeitos que a luz provoca no sentido da visão. Surgiu dessa abordagem a fotometria – com grandezas que relacionam luz e visão. Nos últimos anos, no entanto, uma outra abordagem tem sido considerada: os efeitos da luz no funcionamento do corpo humano. Além de sensibilizar a visão humana, a luz também é responsável por sincronizar o ciclo biológico humano diário ou o **ciclo circadiano** com o período de rotação da Terra. Conhecer os efeitos que a luz provoca no ser humano é fundamental para os projetistas dos SIA, já que estes objetivam o bem estar do ser humano.

Este capítulo trata: dos fenômenos físicos que envolvem a luz; dos aspectos funcionais da visão e da fotometria; e dos efeitos da luz no ciclo circadiano e as grandezas físicas relacionadas.

2.1. Luz

A natureza da luz intrigou cientistas durante séculos. As primeiras teorias propunham que a luz era algo que emanava dos olhos. Posteriormente foi observado que a luz provinha dos objetos e penetrava nos olhos causando a sensação da visão. A questão sobre o que realmente era luz, perdurou por séculos. Teorias corpusculares (partículas) e teorias ondulatórias foram propostas. Até o século XIX, os seguidores de Newton defendiam o caráter corpuscular da luz. A teoria ondulatória ganhou força durante o século XIX com a descoberta de que a luz apresentava o mesmo comportamento para se propagar pelo espaço que as ondas eletromagnéticas, portanto ela deveria ser também uma onda eletromagnética. No entanto, alguns fenômenos observados ainda não eram explicados, principalmente os que envolviam a interação entre luz e matéria. Somente no século XX, com a mecânica quântica, a luz foi completamente modelada como uma onda-partícula, isto é, a luz (e todas as outras ondas eletromagnéticas) apresenta características ondulatórias e corpusculares dependendo do fenômeno em estudo. É a conhecida **relação de Einstein** $E = h \cdot f$ – onde E é a energia de uma partícula de luz (fóton), h é a constante de Planck e f é a frequência ondular da luz – que relaciona seu caráter dual (onda-partícula): a luz é uma onda eletromagnética que carrega consigo partículas de energia, os fótons, com energia proporcional à frequência de onda da luz.

A luz é uma porção do **espectro eletromagnético** muito especial: é a parte do espectro eletromagnético que sensibiliza no homem o sentido da visão. Essa faixa do espectro é conhecida como **espectro visível** e compreende os comprimentos de onda de 380 nm (violeta) a 780 nm (vermelho)¹, que é justamente a porção mais abundante do espectro da radiação solar. Os comprimentos de onda imediatamente inferiores a 380 nm compõem a radiação ultravioleta e os comprimentos imediatamente superiores a 780 nm compõem a radiação infravermelha (Figura 2).

¹ Em geral, as ondas eletromagnéticas são descritas por meio do seu comprimento de onda no vácuo, no entanto é importante ressaltar que a frequência da onda é que é a característica fundamental (JDÁNOV e JDÁNOV, 1985). O que sensibiliza o sentido da visão é a frequência e não o comprimento de onda.

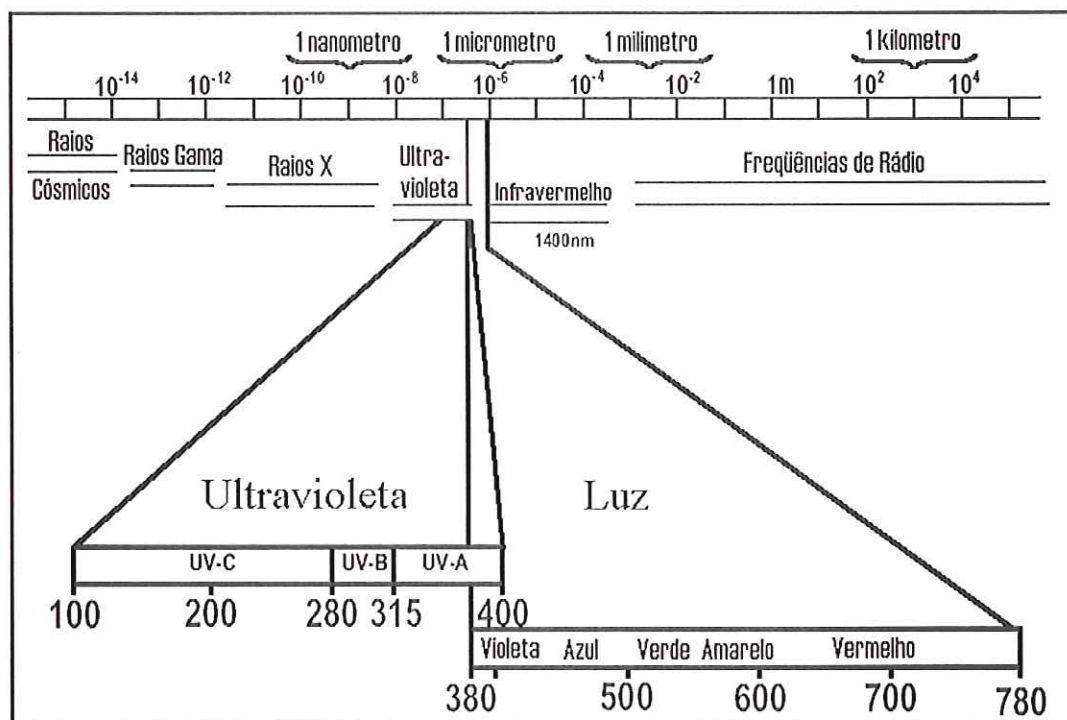


Figura 2 - Espectro eletromagnético (em comprimentos de onda) – adaptado de (LIGHT RESEARCH CENTER, 2000).

2.1.1. Radiometria

A **radiometria** é a ciência que estuda e quantifica, por intermédio das grandezas radiométricas, a energia transportada nas ondas eletromagnéticas. O conhecimento dessas grandezas contribui para a comparação energética de diferentes fontes de luz, para a quantificação do calor gerado na absorção de radiação pelos corpos, para a quantificação da energia incidente em diferentes superfícies, etc. Neste trabalho são descritas as seguintes grandezas: fluxo radiante, irradiância, exitância, intensidade radiante e radiância.

A quantidade de energia por unidade de tempo (ou potência) emitida, recebida ou em transporte na forma de ondas eletromagnéticas é definida como **fluxo radiante** (Φ). A unidade de medida no SI é o Watt (W). O fluxo radiante permite a comparação da potência e da eficiência energética de diferentes fontes de luz artificial.

Irradiância (E) é o fluxo radiante por unidade de área incidente numa superfície. Sua unidade no SI é Watt por metro quadrado ($W.m^{-2}$). A irradiância permite comparar a concentração de energia por unidade de tempo de ondas eletromagnéticas que incidem numa determinada superfície.

$$E = \frac{d\Phi}{dA}, \text{ onde } A \text{ é a área da superfície em questão.}$$

Exitância (M) é o fluxo radiante por unidade de área emitida por uma superfície. Sua unidade no SI é Watt por metro quadrado ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). A exitância permite comparar a concentração de energia por unidade de tempo de ondas eletromagnéticas que deixam uma determinada superfície por reflexão (M_ρ - exitância devido à reflexão) ou por transmissão (M_τ - exitância devido à transmissão).

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \Rightarrow \begin{cases} M_\tau = \frac{d\Phi_\tau}{dA} = \tau \cdot E \Rightarrow \tau = \frac{M_\tau}{E} \\ M_\rho = \frac{d\Phi_\rho}{dA} = \rho \cdot E \Rightarrow \rho = \frac{M_\rho}{E} \end{cases}$$

onde: A é a área da superfície em questão;
 ρ é a refletância;
 τ é a transmitância.

O fluxo radiante radiado em uma determinada direção é a **intensidade radiante (I)**. Ela é a medida de energia por unidade de tempo por unidade de ângulo sólido da radiação que se propaga na mesma direção que o ângulo sólido tomado. Sua unidade no SI é Watt por esterradiano ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$).

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}, \text{ onde } \omega \text{ é o ângulo sólido em questão.}$$

A **radiância (L)** é a intensidade radiante incidente num elemento de área dA aparente para um referencial dado. Sua unidade no SI é Watt por metro quadrado por esterradiano ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$).

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos\theta}, \text{ onde } \theta \text{ é a direção (ângulo) do referencial em questão.}$$

2.1.2. Propriedades da luz

Quando encontra uma superfície, a luz é em parte absorvida, em parte refletida e em parte transmitida. A razão entre o fluxo radiante absorvido e o fluxo radiante incidente é chamada de **absortância**² (α). Similarmente, **refletância**³ (ρ) é a razão entre

² Razão do fluxo luminoso ou radiante absorvido, para o fluxo incidente. (NBR 5461 – definição 3.6.19)

o fluxo radiante refletido e o fluxo radiante incidente; e **transmitância**⁴ (τ) é a razão entre o fluxo radiante transmitido e o fluxo radiante incidente. Na Figura 3, a absorptância é 0,05 (5%), a refletância é 0,70 (70%) e a transmitância é 0,25 (25%). Vale ressaltar que a soma da absorptância, da refletância e da transmitância num determinado ponto da superfície é sempre igual a 1,00 (100%).

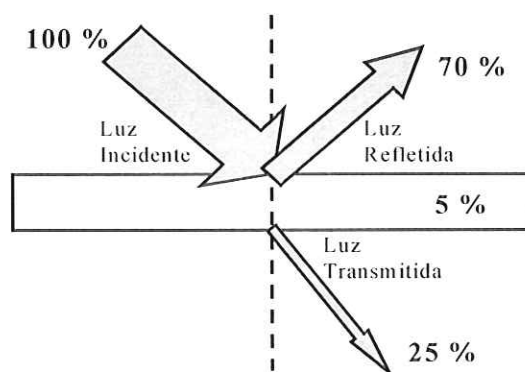


Figura 3 - Exemplo de absorptância, da refletância e da transmitância.

A luz que ilumina os ambientes assume duas formas: difusa e direta. **Luz direta** é a que procede diretamente de fontes de luz, como do Sol ou de lâmpadas, ou por reflexão destas em superfícies especulares (**reflexão especular**⁵ – que obedece às leis da reflexão óptica). **Luz difusa** é o resultado da reflexão da luz direta em superfícies não especulares (**reflexão difusa**⁶) ou em substâncias que promovam o espalhamento da luz (como ocorre na abóbada celeste), aonde a luz que chega numa determinada direção é refletida em todas as direções, isto é, ela sofre um espalhamento perdendo assim sua intensidade numa direção específica. Há casos em que a luz refletida apresenta caráter parcialmente especular e parcialmente difuso (**reflexão mista**⁷). A Figura 4 ilustra os três tipos de reflexão.

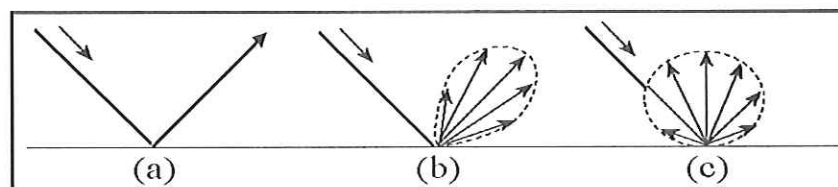


Figura 4 - Reflexão direta (a), reflexão mista (b) e reflexão difusa (c) – retirado de (LIGHT RESEARCH CENTER, 2000)

³ Razão do fluxo luminoso ou radiante refletido, para o fluxo incidente. (NBR 5461 – definição 3.6.7)

⁴ Razão do fluxo luminoso ou radiante transmitido, para o fluxo incidente. (NBR 5461 – definição 3.6.14)

⁵ Reflexão sem difusão que obedece às leis de reflexão óptica estabelecidas para espelhos. (NBR 5461 – definição 3.6.1)

⁶ Difusão por reflexão, na qual, em escala macroscópica, não há reflexão especular. (NBR 5461 – definição 3.6.2)

⁷ Reflexão parcialmente especular e parcialmente difusa. (NBR 5461 – definição 3.6.3)

2.1.3. Produção de luz

A produção de luz ocorre nas estrelas, como o Sol, desde o início do universo. Há 500.000 anos o *homo erectus* já empregava fogueiras para obtenção de luz e calor. O domínio do fogo se deu apenas com o homem de *Neanderthal* há 200.000 anos atrás (COSTA, 2000). Somente no século XIX o homem começou a dominar tecnologias que produzissem luz com mais eficiência, e a entender os fenômenos físicos responsáveis pela produção de luz. Atualmente são três os fenômenos físicos conhecidos e capazes de produzir luz: incandescência, luminescência e o efeito Vavilov–Tcherenkov (JDÁNOV e JDÁNOV, 1985).

A **incandescência** foi a primeira forma de produção de luz utilizada pelo homem, nos primórdios da humanidade através do fogo e mais recentemente com as lâmpadas incandescentes inventadas por Thomas Edison no final do século XIX. “A radiação luminosa obtida em **fontes incandescentes** se deve à excitação dos átomos e moléculas, provocada pelo movimento caótico das partículas do corpo aquecido a uma temperatura elevada. A energia das radiações emitidas por tais fontes luminosas produz-se à custa da sua energia interna” (JDÁNOV e JDÁNOV, 1985).

Na **luminescência**, a excitação dos átomos ou moléculas não tem a temperatura elevada como origem, mas sim o fluxo de partículas (elétrons) acelerado que se move devido a um agente excitador (fonte de energia) externo, seja químico, mecânico ou elétrico (JDÁNOV e JDÁNOV, 1985). Dentro da luminescência encontram-se dois grupos de fontes: **fluorescentes** e **fosforescentes**. A diferença entre os dois grupos é o tempo durante o qual se pode observar a produção de luz após ter cessado a ação do agente excitador. As **fontes fluorescentes** cessam imediatamente, enquanto que as **fontes fosforescentes** podem perdurar a produção de luz por dias.

O terceiro fenômeno, que ainda não possui aplicações comerciais relevantes, foi descoberto em 1934 pelos físicos soviéticos P. A. Vavilov e S. I. Tcherenkov e passou a ser denominado **efeito Vavilov-Tcherenkov**. Este efeito é observado sempre que uma fonte radioativa está circundada por um meio denso e transparente como a água. A radiação luminosa surge quando o movimento de partículas (elétrons) num meio transparente tem velocidade maior que a velocidade de propagação da luz neste meio. Quando uma partícula carregada atravessa um meio com velocidade superior à da luz

neste meio, esta excita os átomos do meio que começam a emitir radiação coerente (JDÁNOV e JDÁNOV, 1985).

2.2. Visão

A visão, sentido que permite ao ser humano distinguir a porção do espectro eletromagnético definida como luz, tem um papel de destaque entre os cinco sentidos – cerca de 70% da percepção humana é visual (VIANNA e GONÇALVES, 2001). Ela é particularmente importante em funções que requerem percepção de relações espaciais e detalhes. É através dos olhos, órgãos responsáveis por captar a luz e enviá-la ao córtex visual no cérebro, que a luz sensibiliza o homem.

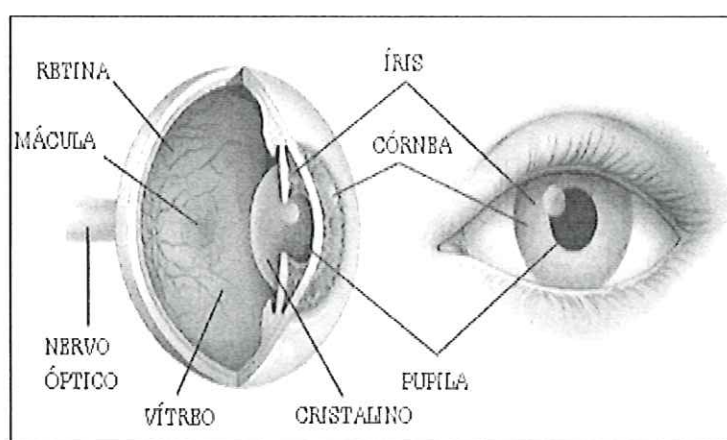


Figura 5 - Olho humano – retirado de (SEUS OLHOS, 2004)

O olho é dividido em partes menores (ver Figura 5) com funções diferentes no processamento da luz. A luz penetra através da pupila, uma abertura da íris que varia o diâmetro para controlar a quantidade de luz no interior do olho baseando-se na quantidade média de luz no ambiente. A córnea e o cristalino são lentes que por refração focalizam a luz na retina. Na retina, a luz sensibiliza as terminações nervosas (células) desencadeando impulsos nervosos, que se propagam através do nervo óptico transmitindo as informações captadas até o cérebro, onde é produzida a sensação da visão.

A retina é composta por dois tipos de células nervosas: os **cones** e os **bastonetes**. Os bastonetes são muito mais sensíveis à luz e aos movimentos que os cones. Na visão noturna praticamente só os bastonetes captam luz, já que esta só está disponível em baixas intensidades. Os cones captam as cores e os detalhes, mas necessitam de uma quantidade de luz muito maior (10.000 vezes mais) que os bastonetes. Há três tipos de cones, cada tipo é mais sensível à luz numa faixa do espectro visível. É a composição dos sinais transmitidos pelos três tipos de cones que provoca a sensação das **cores** no

homem. A Figura 6 mostra as curvas de sensibilidade para os três tipos de cones (azul, verde e vermelho).

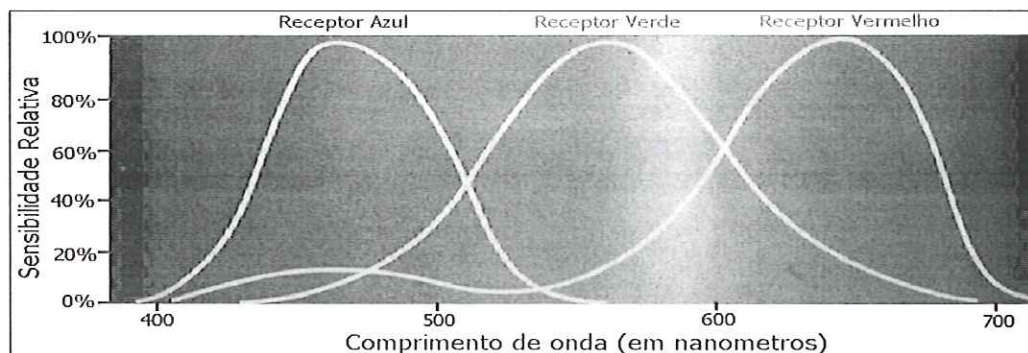


Figura 6 - Sensibilidade dos três tipos de cones (receptores) em diferentes comprimentos de onda – adaptado de (SCHILER e JAPEE).

A soma das três curvas de sensibilidade dos três tipos de cones resulta na **curva de sensibilidade fotópica $V(\lambda)$** que possui forma de sino e é um padrão para a fotometria. A curva de sensibilidade fotópica mostra a sensibilidade dos cones na retina que ocorre em situações com alta luminosidade (dia). Em baixas luminosidades (noite) – situação onde os bastonetes são os principais receptores de luz – a curva de sensibilidade se desloca para a esquerda formando a **curva de sensibilidade escotópica $V'(\lambda)$** . A Figura 7 mostra as duas curvas de sensibilidade (fotópica e escotópica) em função do comprimento de onda.

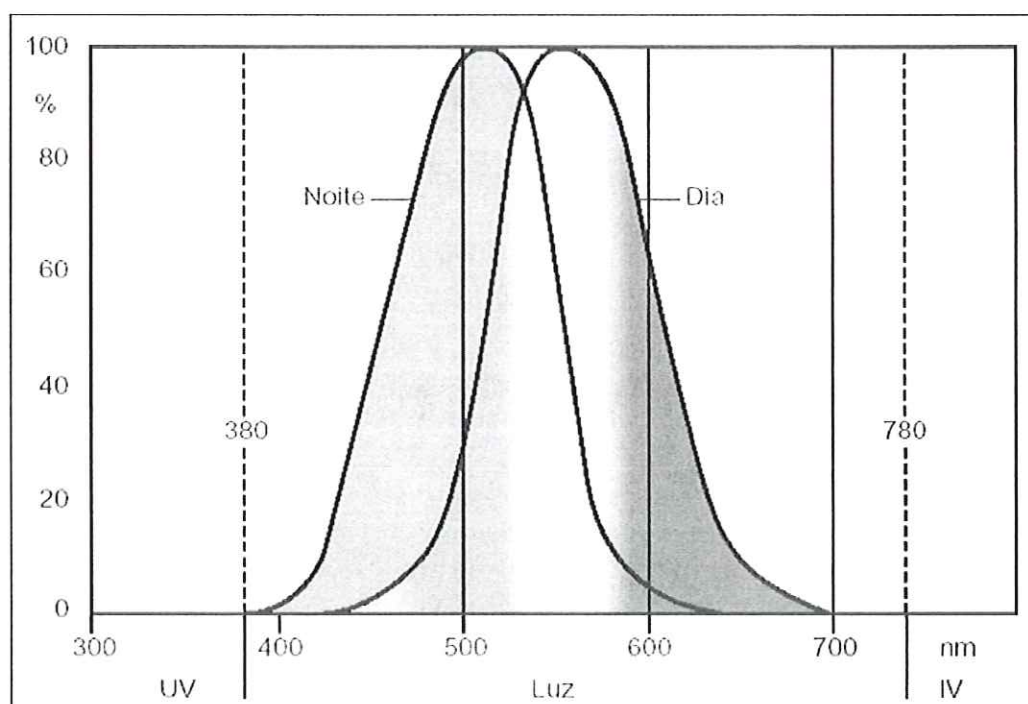


Figura 7 - Curva de sensibilidade do olho – eficácia luminosa espectral – retirado de (OSRAM)

2.2.1. Fotometria

A energia transportada pela luz não sensibiliza o olho da mesma forma em todos os comprimentos de onda como mostra a curva de sensibilidade do olho (Figura 7). A fotometria é derivada da ponderação das grandezas radiométricas pela curva de sensibilidade fotópica $V(\lambda)$. Ela auxilia: a comparação energética de diferentes fontes de luz na faixa de comprimentos de onda que sensibiliza o olho humano; o estudo da qualidade da iluminação em ambientes; o dimensionamento de sistemas de iluminação, etc. As grandezas fotométricas relacionadas às grandezas radiométricas – fluxo radiante, irradiância, exitância, intensidade radiante e radiância – são respectivamente: fluxo luminoso, iluminância, exitância luminosa, intensidade luminosa e luminância.

O **fluxo luminoso**⁸ (Φ_v) é derivado do fluxo radiante (Φ) ponderado pela sensibilidade fotópica do olho humano $V(\lambda)$. Sua unidade no SI é o **lúmen**⁹ (lm) que equivale a $\frac{1}{683}$ Watt para radiação monocromática com comprimento de onda igual a 555 nanômetros. A **eficiência luminosa**¹⁰ (η_w) das fontes de luz artificial é a razão entre o fluxo luminoso (Φ_v) e a potência consumida. A unidade de medida utilizada é o lúmen por Watt ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$).

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} \frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

onde: $\frac{d\Phi(\lambda)}{d\lambda}$ é a distribuição espectral do fluxo radiante $\Phi(\lambda)$

$V(\lambda)$ é a eficácia luminosa espectral ou sensibilidade fotópica do olho humano

K_m é o valor do watt-luminoso = 683 lm/W

λ é o comprimento de onda considerado

Iluminância¹¹ (E_v) é a densidade superficial de fluxo luminoso incidente numa superfície. Sua unidade no SI é o **lux**¹² (lx) que equivale a 1 lúmen por metro quadrado

⁸ Grandeza derivada do fluxo radiante pela avaliação da radiação de acordo com a sua ação sobre um receptor seletivo, cuja sensibilidade espectral é definida pelas curvas de eficácia luminosa espectral padrão CIE. (NBR 5461 – definição 3.4.3)

⁹ Fluxo luminoso emitido por uma fonte puntiforme e invariável de 1 candela, de mesmo valor em todas as direções, no interior de um ângulo sólido de 1 esterradiano. (NBR 5461 – definição 3.4.4)

¹⁰ Razão do fluxo energético emitido para a potência consumida. (NBR 5461 – definição 3.2.3)

¹¹ Limite da razão do fluxo luminoso recebido pela superfície em torno de um ponto considerado, para a área da superfície quando esta tende para zero. (NBR 5461 – definição 3.4.19)

(lm.m⁻²). A quantidade de luz necessária para desempenhar as diversas tarefas visuais é baseada nessa grandeza. Valores de iluminâncias de referência para as diversas atividades visuais são encontrados na norma brasileira NBR 5413 – Iluminância de Interiores.

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}, \text{ onde } A \text{ é a área da superfície em questão.}$$

Exitância luminosa¹³ (M_v) é a densidade superficial de fluxo luminoso emitido por reflexão (exitância luminosa devido à reflexão - M_{vp}) ou por transmissão (exitância luminosa devido a reflexão - M_{vt}) por uma superfície qualquer. Sua unidade no SI é o lúmen por metro quadrado (lm.m⁻²).

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \Rightarrow \begin{cases} M_{vt} = \frac{d\Phi_{vt}}{dA} = \tau \cdot E_v \Rightarrow \tau = \frac{M_{vt}}{E_v} \\ M_{vp} = \frac{d\Phi_{vp}}{dA} = \rho \cdot E_v \Rightarrow \rho = \frac{M_{vp}}{E_v} \end{cases}$$

onde: A é a área da superfície em questão
 ρ é a refletância
 τ é a transmitância

O fluxo luminoso emitido em uma determinada direção é a **intensidade luminosa**¹⁴ (I_v), que é a medida do fluxo luminoso por unidade de ângulo sólido da luz que se propaga na mesma direção que o ângulo sólido tomado. Intensidade luminosa é uma grandeza fundamental de iluminação do SI, cuja a unidade é a **candela**¹⁵ (cd) e equivale a 1 lúmen por esterradiano (lm.sr⁻¹).

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\omega}, \text{ onde } \omega \text{ é o ângulo sólido em questão.}$$

A Figura 8 ilustra os conceitos de fluxo luminoso, iluminância e intensidade luminosa.

¹² Iluminância de uma superfície plana de 1 m² de área, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de 1 lúmen, uniformemente distribuído. (NBR 5461 – definição 3.4.20)

¹³ Limite da razão do fluxo luminoso que sai da superfície em torno de um ponto considerado, para a área dessa superfície quando tende para zero. (NBR 5461 – definição 3.4.24)

¹⁴ Limite da razão do fluxo luminoso no interior de um ângulo sólido cujo eixo é a direção considerada, para esse ângulo sólido quando tende para zero. (NBR 5461 – definição 3.4.11)

¹⁵ Intensidade luminosa, numa direção dada, de uma fonte que emite uma radiação monocromática de frequência 540 x 10¹² Hertz e cuja intensidade energética, naquela direção, é 1/683 Watt por esterradiano. (NBR 5461 – definição 3.4.12)

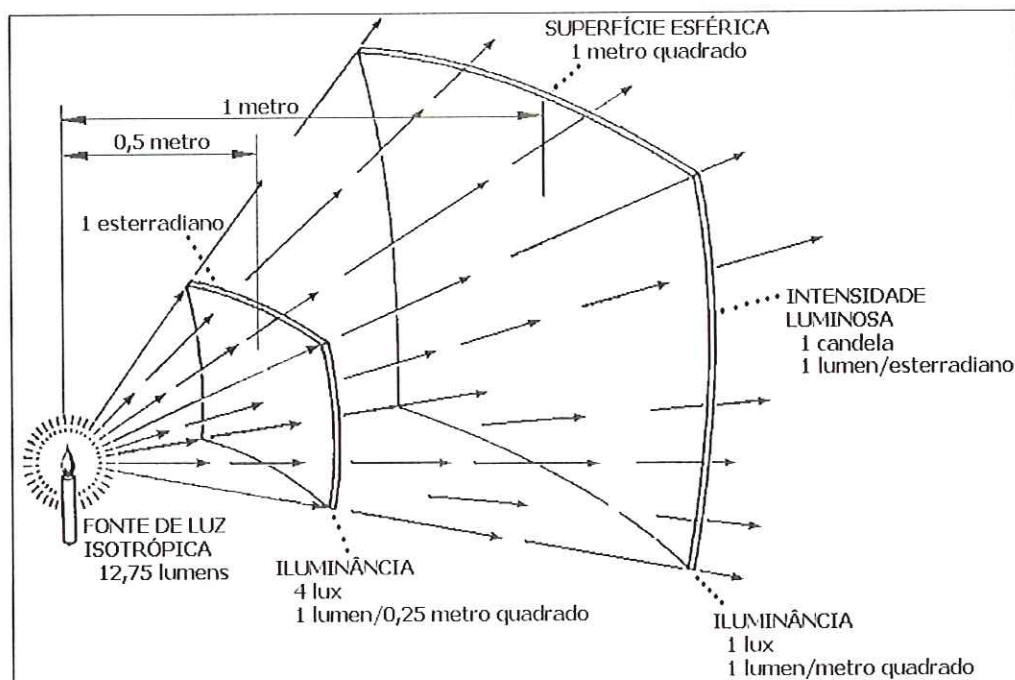


Figura 8 - Esquema: fluxo luminoso, iluminância e intensidade luminosa – adaptado de (SCHILER e JAPEE).

A **luminância**¹⁶ (L_v) é a intensidade luminosa incidente num elemento de área dA aparente para um referencial dado. A unidade no SI é candela por metro quadrado (cd.m^{-2}).

$$L_v = \frac{dI_v}{dA \cdot \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_v}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\omega}$$

onde: θ é a direção (ângulo) do referencial em questão
 ω é o ângulo sólido em questão

2.2.2. Características da visão relevantes à iluminação

O olho tem uma grande capacidade de adaptação, podendo se ajustar rapidamente para níveis de iluminância de 10 lux a 100.000 lux. Dentro dessa faixa, apenas a mudança abrupta na iluminância ou diferenças muito grandes entre o **brilho**¹⁷ de um determinado ponto e o brilho geral causam **ofuscamento**¹⁸, prejudicando a visão. O

¹⁶ Limite da razão do fluxo luminoso num ponto dado de uma superfície e que se propaga no interior de um ângulo sólido cujo eixo é uma direção considerada, para o produto desse ângulo sólido e da área projetada da superfície sobre um plano perpendicular a essa direção, quando o ângulo sólido e a área projetada tendem para zero. (NBR 5461 – definição 3.4.15)

¹⁷ Conjunto das propriedades refletoras direcionais responsáveis pelo grau em que fontes luminosas refletidas, ou as imagens dos objetos, podem ser vistas como impostas na superfície. (NBR 5461 – definição 3.6.6)

¹⁸ Condição de visão na qual há um desconforto ou uma redução da capacidade de distinguir objetos, ou ambos, devido a uma distribuição desfavorável das luminâncias ou a luminâncias elevadas, ou a contrastes excessivos no espaço ou no tempo. (NBR 5461 – definição 3.7.56)

ofuscamento pode ter dois efeitos: prejudicar a visão (**ofuscamento de desabilitação**), ou causar desconforto (**ofuscamento de desconforto**).

O **ofuscamento de desabilitação** ocorre quando há uma área na linha visão com brilho bem maior que as outras. O espalhamento de luz nos olhos e mudanças na adaptação local do olho pode causar redução de **contraste**¹⁹. Essa redução de contraste pode ser suficiente para tornar pequenos detalhes invisíveis e conseqüentemente haver perda da performance visual. Casos comuns de ofuscamento de desabilitação são: o sol e o céu vistos através da janela, e lâmpadas elétricas vistas diretamente ou por reflexão especular.

O **ofuscamento de desconforto** ocorre quando elementos no ambiente têm brilho muito maior que os outros. O desconforto pode ser imediato ou sentido após períodos prolongados de exposição. O grau de desconforto depende do brilho e do tamanho da fonte de ofuscamento.

¹⁹ Sensação subjetiva da diferença na aparência de duas partes do campo visual, vistas simultaneamente ou sucessivamente. (NBR 5461 – definição 3.7.51)

2.3. Ciclo Circadiano

Os **ciclos circadianos** (do latim *circa* – cerca – e *dies* – dia) são ritmos biológicos com duração de aproximadamente um dia. Durante o ciclo, o corpo humano, de forma ritmada, desempenha funções essenciais à vida (Figura 9). É um relógio interno, localizado no hipotálamo humano, o responsável pela geração e controle de cada ciclo: o que permite que o ciclo funcione mesmo na ausência de pistas que indiquem o tempo ou a duração do dia. No entanto, há um sincronismo entre o ritmo circadiano e os ciclos diários que ocorrem no ambiente. São pistas de agentes externos, como a quantidade de luz no ambiente, que permitem que o relógio interno seja sincronizado diariamente com o período de rotação da Terra.

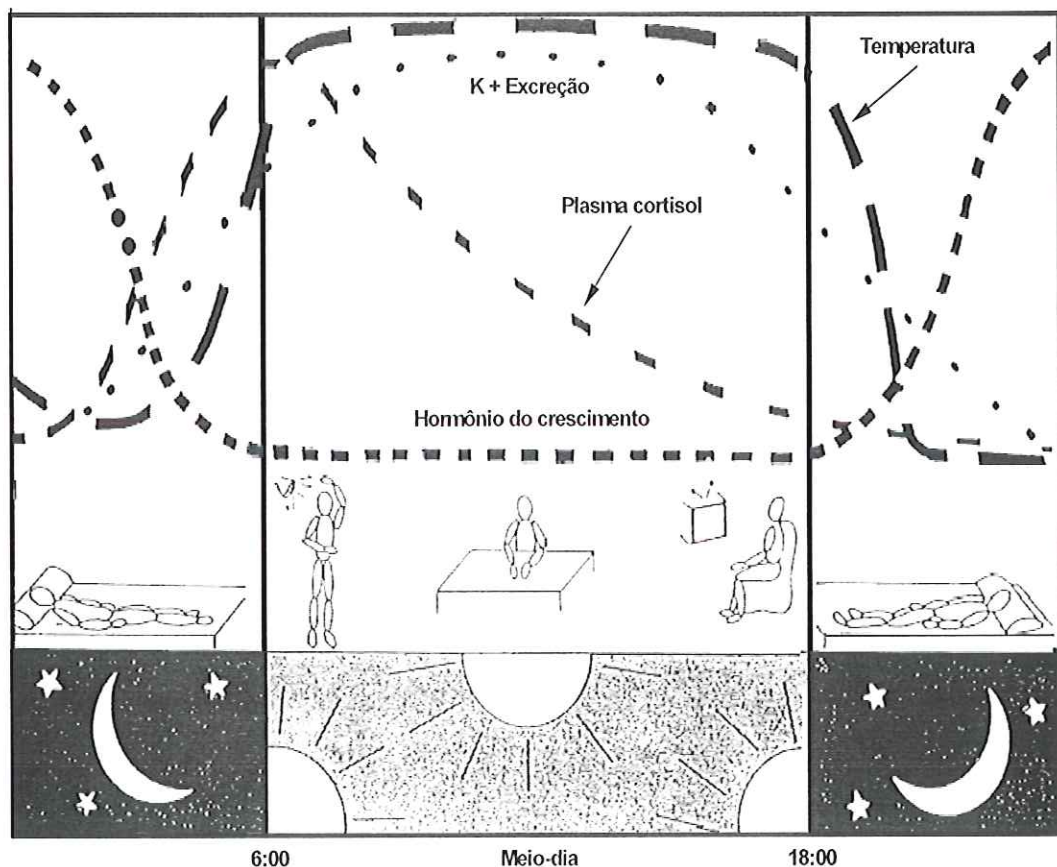


Figura 9 - Variações circadianas de algumas funções no corpo humano – adaptado de (UNITED STATES CONGRESS, 1992).

Os agentes externos responsáveis pela sincronização dos ciclos podem zerar, adiantar ou atrasar o ritmo circadiano (UNITED STATES CONGRESS, 1992). É através da quantidade de melatonina no sangue (urina ou saliva) que são obtidos dados sobre em qual fase o ciclo está (REA, 2002). A melatonina é produzida durante a noite,

e suprimida durante o dia ou em grandes exposições de luz (SACK e LEWY, 2001). Esta última é o principal agente sincronizador do ciclo circadiano. A Figura 10 mostra a ação da luz sobre o deslocamento de fase no ciclo circadiano.

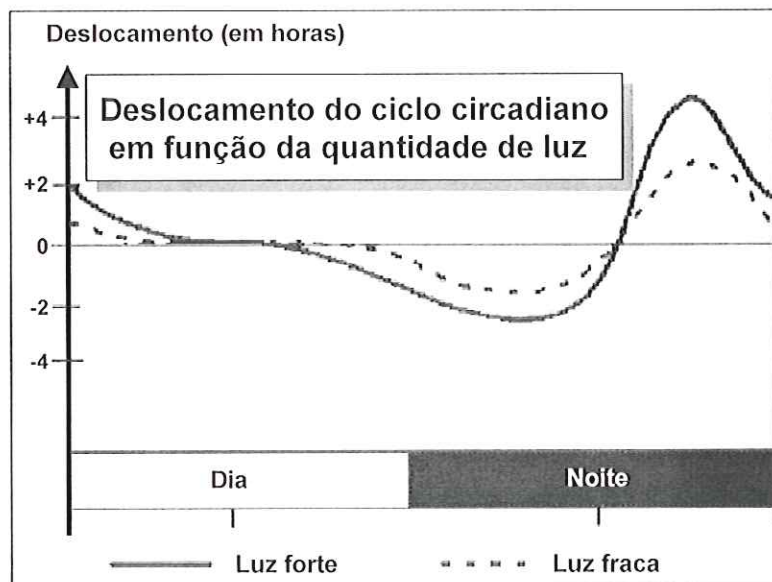


Figura 10 - Deslocamento do ciclo circadiano em função da quantidade de luz e do horário de aplicação desta – adaptado de (REA, 2002).

Há anos já se sabe que variações na exposição de luz são importantes na regulação do ciclo circadiano de mamíferos não-humanos, mas era amplamente aceito que o homem não era sensível a essas variações. No entanto, nos últimos 30 anos, ficou clara a influência dos ciclos dia/noite (claro/escuro) no ritmo circadiano humano e na conseqüente regulação de muitos comportamentos humanos como: a depressão sazonal (devido ao encurtamento do dia em certas épocas do ano em regiões de grande latitude); os padrões de dormir/acordar; a temperatura do corpo; a atividade cerebral; o estado de alerta; e, a performance (REA, 2002). Além disso, alterações no sistema endócrino humano e modificações dos hábitos de trabalho e descanso têm sido observadas e relacionadas ao uso extensivo de iluminação artificial. Há indícios de que a iluminação recebida pelas pessoas nos países ocidentais pode ser insuficiente para a saúde humana (ASSAF e PEREIRA, 2003).

Pesquisas recentes têm demonstrado a importância da luz no ciclo circadiano e conseqüentemente no comportamento e na saúde humana. Rea (2002) destaca as seguintes relações entre a luz e a saúde humana:

- A luz pode aliviar a depressão sazonal.
- A luz pode melhorar a quantidade e qualidade do sono.

- A luz pode consolidar os padrões de sono/atividade em pacientes com o Mal de Alzheimer.
- A luz pode aumentar o desempenho de trabalhadores noturnos.
- A luz pode melhorar o ganho de peso em bebês prematuros.
- A luz regula a melatonina, que por sua vez tem demonstrado reduzir o crescimento do câncer de mama.
- A luz tem impacto direto sobre a atividade cerebral.

O caminho que a luz que sensibiliza a retina percorre até o hipotálamo, onde essa informação é usada para sincronização do ritmo circadiano, é diferente do caminho que a mesma faz até o córtex visual, onde é processado o sentido da visão. É importante ressaltar que o canal da retina até o hipotálamo, por onde trafegam os sinais que afetam o ritmo circadiano, não é uma ramificação do canal visual que leva informações visuais da retina até o córtex visual. Ele é um canal independente e muito mais antigo em termos de evolução que o canal visual (LIGHT RESEARCH CENTER, 2004c). O que justifica o fato de parte das pessoas totalmente cegas terem seus ciclos circadianos sensíveis à luz: algumas pessoas cegas têm o canal visual danificado, mas continuam com o canal que leva informação da retina ao hipotálamo intacto (SACK e LEWIS, 2001).

2.3.1. Fotometria para o ciclo circadiano

“As técnicas de projeto de iluminação, tal como concebidas atualmente, baseiam-se unicamente nos efeitos visuais da luz processada no córtex visual, sem considerar sua influência como reguladora neurobiológica” (ASSAF e PEREIRA, 2003). As características da luz (quantidade, espectro, distribuição, duração, etc.) importantes ao ciclo circadiano humano continuam indefinidas, já que não há ainda um direcionamento de esforços para desenvolver um sistema de fotometria para o ciclo circadiano (REA, 2002). No entanto, Rea (2002) destaca alguns dados sobre a relação entre luz e ciclo circadiano obtidos de pesquisas recentes que serão descritos a seguir.

A **quantidade de luz** necessária para suprimir a produção de melatonina (interferir no ciclo circadiano) é muito maior que a necessária para a leitura de um texto alfanumérico de grande contraste (Figura 11). Os níveis típicos de iluminância

recomendados para tarefas visuais são, em geral, ineficientes na regulação do ritmo circadiano humano.

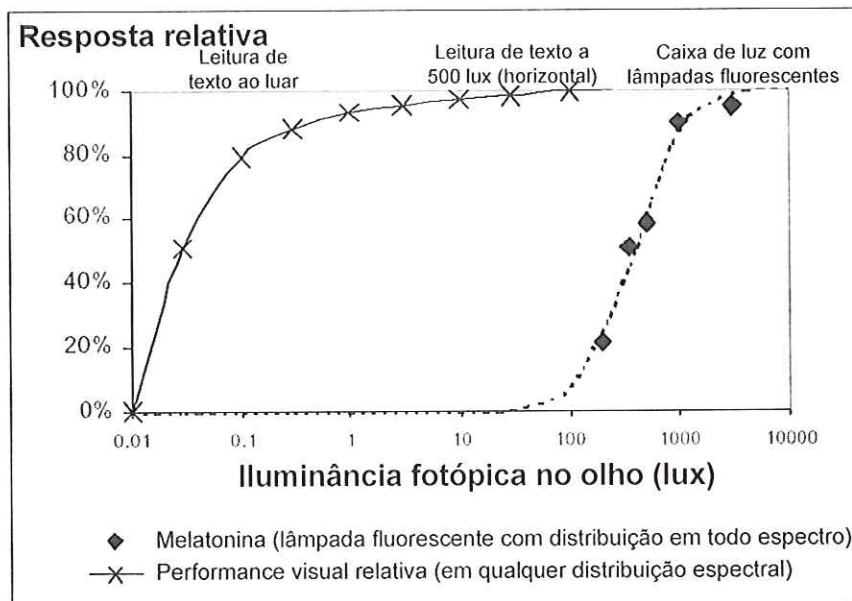


Figura 11 - Performance visual relativa para a leitura de um material de alto contraste, e a supressão relativa de melatonina pela luz em função da iluminância no olho – adaptado de (REA, 2002).

Pesquisas recentes têm demonstrado que a **sensibilidade espectral do ciclo circadiano** é muito diferente da sensibilidade espectral fotópica (Figura 12). Fontes de luz ricas em comprimentos de ondas curtas têm influência grande no ciclo circadiano e afetam pouco o sentido da visão; o inverso ocorre para fontes de luz ricas em ondas mais longas.

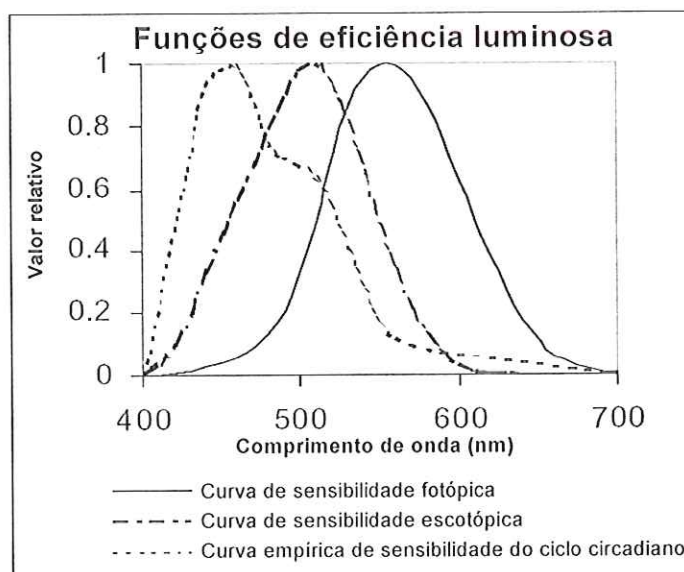


Figura 12 - Sensibilidade espectral fotópica, escotópica e do ciclo circadiano (empírica) – adaptado de (REA, 2002).

A distribuição espacial da luz e a distribuição de objetos no ambiente é de grande relevância ao sentido da visão. No entanto, a distribuição espacial da luz parece ser de pouca relevância para o ciclo circadiano. O mesmo ocorre ao se comparar o horário no qual a luz é observada: para a visão, o horário é irrelevante; já para o ciclo circadiano, os efeitos da luz são diferenciados por horário (Figura 10). A duração do tempo de aplicação da luz também é notada de forma diferente pela visão e pelo ciclo circadiano: na visão, a resposta ao estímulo luminoso é imediata; no ciclo circadiano a resposta é bem mais lenta, podendo ultrapassar uma hora dependendo da quantidade de luz (Figura 13).

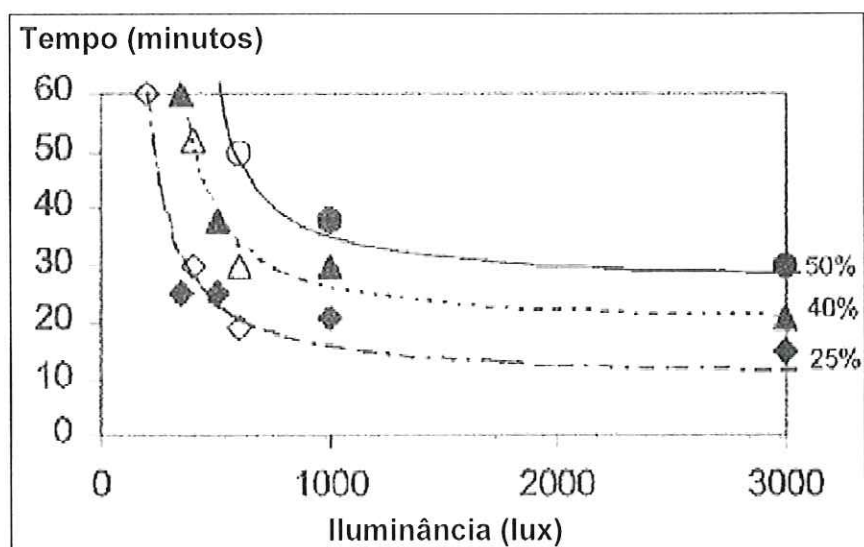


Figura 13 - Quantidade de tempo necessário para medir a supressão de melatonina pela luz durante a noite, como uma função da iluminância observada no olho – adaptado de (REA, 2002).

3. Componentes de um Sistema de Iluminação Automático

Um Sistema de Iluminação Automático (SIA), como qualquer outro sistema de controle, é composto por três tipos de componentes básicos: sensores, atuadores e controladores (Figura 14). Os sensores são os elementos responsáveis por captar as informações do meio, necessárias ao algoritmo de controle; são exemplos: os sensores de luz, os sensores de ocupação, os interruptores (captam a “vontade” do usuário de ligar/desligar a iluminação), etc. Os atuadores são os elementos que atuam diretamente no meio com o objetivo de satisfazer os requisitos de qualidade do algoritmo de controle; são exemplos as lâmpadas, as cortinas motorizadas, os vidros eletrocromicos, etc. Os algoritmos de controle, por sua vez, são implementados nos controladores; os controladores captam informações do meio através dos sinais enviados pelos sensores e comandam os atuadores, segundo o algoritmo implementado, objetivando satisfazer os requisitos de qualidade programados.

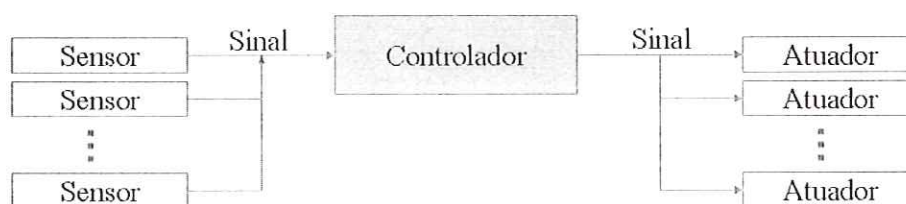


Figura 14 – Desenho esquemático da relação entre os elementos de um sistema de controle.

Este capítulo descreve os principais sensores, atuadores e algoritmos de controle envolvidos com os SIA, e a integração do SIA com outros sistemas prediais.

3.1. Sensores

Os sensores possuem um papel essencial em qualquer sistema de controle. É a partir das informações recebidas destes que os controladores avaliam as condições do meio, e decidem que ações deverão ser executadas pelos atuadores para que os critérios de qualidade programados possam ser atingidos.



Figura 15 – Esquema: sensores e os sistemas de controle.

Nos SIA, destacam-se os seguintes sensores: de luz, de movimento, interruptores, horário, de posicionamento solar, de consumo energético, de posicionamento de cortinas/janelas e de transmitância de vidro.

3.1.1. Sensores de luz

Os **sensores de luz** ou **fotorreceptores** ou **fotossensores** desempenham um papel fundamental nos SIA que fazem aproveitamento de luz natural e/ou dimerização de lâmpadas. O cerne da tecnologia usada na fabricação de um fotorreceptor consiste em uma **fotocélula** (chip de silício ou selênio) que converte energia radiante incidente em corrente elétrica, e em um filtro colocado antes da fotocélula que aproxima a resposta espectral desta à da **curva de sensibilidade fotópica** (LIGHT RESEARCH CENTER, 1998). Há também um circuito eletrônico de interface que traduz a corrente gerada na fotocélula para um padrão de corrente (ex. 4-20 mA) ou de tensão (ex. 0-10 V), ou para um protocolo de comunicação digital. A grandeza medida é expressa em unidades de iluminância (lux ou lm.m^{-2} , no SI).

O **posicionamento** e o lugar de montagem do fotossensor são essenciais para o funcionamento correto do SIA. Em geral, os sensores de luz são montados: 1) fora da edificação, posicionados em direção ao céu; 2) dentro do ambiente, no teto, voltado para a janela; 3) dentro do ambiente, no plano de trabalho; 4) ou dentro do ambiente, no teto, voltado para a parede. Normalmente não há uma posição ideal, a melhor posição

depende dos requisitos de iluminação e do arranjo físico do ambiente (LIGHT RESEARCH CENTER, 2004d). No entanto, o posicionamento do sensor no plano de trabalho (item 3) fica sujeito a erros como sombreamento do sensor por objetos ou a incidência de radiação direta no sensor (GUILLEMIN e MOREL, 2001). Nas outras três posições, é necessário conhecer a relação entre a iluminância no plano de trabalho e no plano do sensor, já que, em geral, o propósito do sensor é medir a iluminância no plano de trabalho e os sensores não ficam posicionados nesta posição.

Os sensores de luz, em geral, possuem um ângulo sólido preferencial de medida, o que difere a grandeza medida da definição de iluminância que é o fluxo luminoso incidente numa superfície provido de todas as direções. No entanto, esse fator não acarreta problemas no SIA, e muitas vezes é proposital. Restringir as direções de leitura pode conduzir a sistemas de controle mais estáveis e com uma relação melhor entre a iluminância no plano de trabalho e no plano do sensor.

A relação entre a iluminância no plano de trabalho e no plano do sensor, essencial para o dimensionamento de um SIA que utilize sensores de luz posicionados fora do plano de trabalho, não é constante no tempo e é dependente de diversos fatores: refletâncias das superfícies do ambiente, posição das fontes de luz, arranjo do mobiliário, direção da luz solar incidente, posição dos ocupantes, condição do céu e a própria posição do sensor. Valores típicos obtidos para essa relação por (LIGHT RESEARCH CENTER, 2004d) para ambientes do tipo escritório variam entre 3:1 e 10:1. Dificuldades no correto posicionamento e instalação do fotossensor têm sido reportadas por usuários, e muitas vezes é um fator limitante para o uso desses sensores nos SIA (LIGHT RESEARCH CENTER, 1998). Choi e Mistrick (1999) apontam que a escolha do horário para calibração do sensor, da posição de instalação e da configuração de montagem são fatores críticos no funcionamento de sistemas que utilizem sensores de luz.

3.1.2. Sensores de movimento

Os **sensores de movimento** têm um potencial significativo na redução do consumo energético em sistemas de controle que utilizam o desligamento de cargas elétricas em áreas desocupadas pelos usuários. O uso de sensores de presença em escritórios com um ou dois usuários promove uma economia de energia estimada entre 25% e 50% (GARG e BANSAL, 2000). São três as tecnologias utilizadas na fabricação dos sensores: infravermelha passiva, ultra-sônica e microfônica.

Os sensores que utilizam a **tecnologia infravermelha passiva** respondem ao movimento de fontes de infravermelho que emitem ondas com comprimento próximos aos emitidos pelo corpo humano (em torno de $9,4 \mu\text{m}$). O movimento é detectado através de um **detector piroelétrico** posicionado atrás das lentes do sensor de ocupação. Nas lentes há um padrão ótico que divide o campo de visão do sensor em cunhas. Quando há movimento de fontes de calor entre as cunhas (com pico de emissão próximo ao do homem), o sensor interpreta que o ambiente está ocupado. Para o correto funcionamento desse tipo de sensor, é necessário que o seu campo de visão esteja desobstruído. (LIGHT RESEARCH CENTER, 1997; PINTO, 2000)

A **tecnologia ultra-sônica** para sensores de presença é baseada na variação, devido ao movimento de corpos, das frequências das ondas de pressão (25 – 40 kilohertz) emitidas e recebidas pelo sensor (Figura 16). Diferentemente da tecnologia anterior, a ultra-sônica é sensível ao movimento de objetos inanimados. No entanto esta tecnologia não necessita de um campo de visão totalmente desobstruído para seu correto funcionamento. (LIGHT RESEARCH CENTER, 1997; PINTO, 2000)

A terceira tecnologia utilizada em sensores de presença é a **microfônica**. Ela só é utilizada em sensores híbridos, em conjunto com uma das tecnologias citadas anteriormente. Seu princípio de funcionamento é baseado nos sons capturados nos ambientes. O sensor é sensibilizado por sons emitidos no ambiente, como o som do digitar de textos no computador. (LIGHT RESEARCH CENTER, 1997)

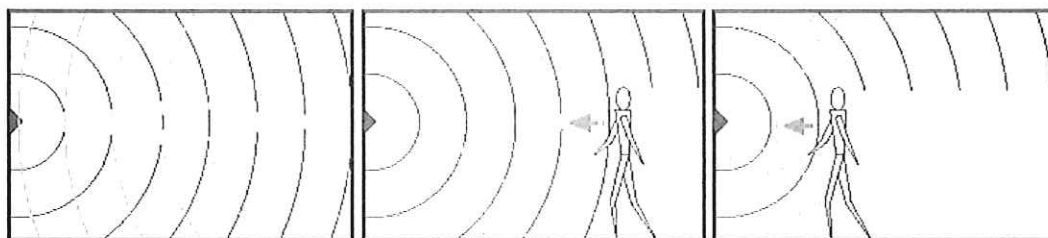


Figura 16 - Esquema do funcionamento dos sensores de ocupação ultra-sônicos: quando algum corpo se movimenta dentro da área de atuação do sensor há uma variação na frequência das ondas recebidas – retirado de LIGHT RESEARCH CENTER (1997).

A maioria dos sensores de ocupação comercializados atualmente utiliza a tecnologia do infravermelho passivo ou a do ultra-som. Em menor escala, são comercializados também sensores **híbridos** ou **duais** – utilizam simultaneamente as tecnologias ultra-sônica e infravermelho passivo, ou as tecnologias microfônica e infravermelho passivo. Quanto ao quesito posicionamento de montagem, os sensores comercializados são, de acordo com o local onde devem ser montados, de dois tipos: teto ou parede (LIGHT RESEARCH CENTER, 1997).

Segue abaixo a descrição de algumas características comumente encontradas nos catálogos dos fabricantes e que são importantes na escolha de sensores de movimento para SIA:

- **Sensibilidade** é a medida do quão sensível a pequenos movimentos cada sensor é. Na maioria dos sensores essa característica é fixa, mas em alguns casos é possível ajustar a sensibilidade através de um potenciômetro.
- **Área de cobertura** é a área projetada num plano paralelo e posterior ao plano do sensor, de tal modo que este seja capaz de detectar movimento, se instalado na posição indicada pelo fabricante (altura no caso de sensores de teto) e, em geral, na sua maior sensibilidade.
- **Padrão de cobertura** é a forma da área projetada num plano paralelo e posterior ao plano do sensor, de tal modo que este seja capaz de detectar movimento. Dentre as formas mais comumente encontradas se destacam a circular, a retangular e a elíptica.
- **Campo de visão** é o ângulo sólido no qual o sensor detecta movimento. Em geral essa característica é fornecida através de dois ângulos planos medidos em planos perpendiculares.
- **Retardo de tempo** é o tempo entre a detecção de desocupação de um ambiente e a resposta de desocupação propagada pelo sensor. Esse tempo é importante para

prevenir que seja detectada ausência em períodos onde os usuários estão presentes, mas com pouca movimentação. Na grande maioria dos sensores comercializados este tempo é ajustável.

3.1.3. Interruptores

Os interruptores são os componentes mais comuns dos SIA. Eles são uma das formas de interface entre o usuário e o SIA. Através dos interruptores, os usuários ativam/desativam a iluminação, mudam setpoints de iluminação, escolhem cenas de iluminação diferentes (Figura 17), entre outros. Dentre os interruptores mais utilizados estão os de duas posições (liga/desliga), os deslizantes, os rotativos (Figura 18) e os painéis de cena (Figura 17). Os interruptores de duas posições são análogos a uma chave elétrica, onde numa posição o circuito é aberto e na outra o circuito é fechado. Os deslizantes e os rotativos têm como elemento básico o potenciômetro: a diferença de potencial (tensão elétrica) medida na saída do interruptor é proporcional à posição deste.

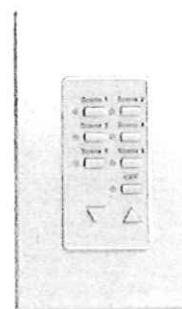


Figura 17 - Painel de cena

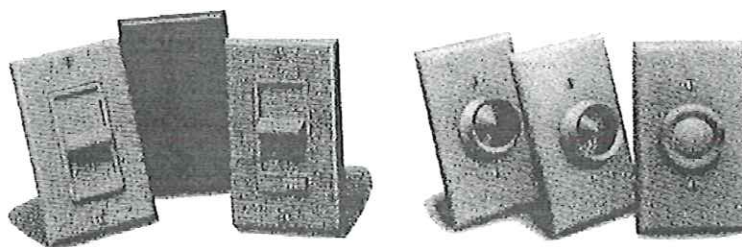


Figura 18 - Interruptores deslizantes e rotativos – retirado de (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION, 1992).

3.1.4. Sensores de posicionamento solar

Os sensores de posicionamento solar informam ao SIA a posição angular (altitude solar²⁰ e/ou azimute solar²¹) dos raios solares incidentes numa determinada parede. Em muitos sistemas esses sensores são implementados em forma de algoritmos computacionais que calculam a posição dos raios solares em relação a uma parede de acordo com a latitude, o horário e o dia do ano. Menos comuns, mas já encontrados na bibliografia (DIBARTOLOMEO *et al.*, 1996; LEE *et al.*, 1998), há também os sensores

²⁰ É o ângulo que um raio direto do sol faz com a horizontal num determinado lugar da superfície terrestre 0.

²¹ É o ângulo que a componente horizontal do raio direto do sol faz com o norte verdadeiro para o hemisfério sul 0.

externos, que informam a posição solar baseados na direção e na intensidade da luz solar incidente no sensor.

3.1.5. Sensores horários

Sensores horários são responsáveis por colocar a variável tempo nos SIA. Eles informam ao SIA hora e dia, ou os momentos onde o SIA deve ser ativado ou desativado de acordo com sua implementação. Esses sensores podem ser eletromecânicos, eletrônicos ou serem parte de um sistema microprocessado.

3.1.6. Sensores de consumo energético

Os sensores de consumo energético ou medidores de energia elétrica informam ao SIA a energia consumida num determinado período de tempo ou a potência instantânea do SIA. Esse tipo de informação permite que o SIA remaneje cargas ou desative componentes visando a controlar a demanda ou a economizar energia.

3.1.7. Sensores de posicionamento de cortinas/janelas

A posição das cortinas ou janelas é uma informação útil para inferência da distribuição de luz natural no ambiente pelo SIA. Os **sensores de posicionamento de cortinas/janelas** transmitem um sinal contendo o estado de abertura de cortinas/janelas. Eles podem ser do tipo aberto/fechado – uma chave (reed switch) – ou informar o ângulo ou a posição (potenciômetro ou encoder).

3.1.8. Sensores de transmitância de vidro

O uso de vidros com transmitância regulável vem crescendo nos últimos anos e tem sido foco de estudos em diversos centros de pesquisas (LAMPERT, 1998). A transmitância de vidros é um dado importante para que o SIA avalie a distribuição de luz no ambiente. Os **sensores de transmitância de vidro** podem trabalhar em malha aberta – retornam a transmitância do vidro em função do sinal de atuação – ou em malha fechada com uso de fotodiodos ou transdutores equivalentes instalados na parte interna do vidro (KRC, 2002).

3.2. Atuadores

É através dos atuadores que um sistema de controle interage com o meio para o qual foi projetado para controlar. Essa interação permite que o meio seja modificado, possibilitando que os critérios de qualidade programados possam ser atingidos.



Figura 19 – Esquema: os atuadores e os sistemas de controle.

Nos SIA, destacam-se os seguintes atuadores: lâmpadas (e seus aparatos), cortinas/venezianas automáticas e vidros eletrocromáticos.

3.2.1. Lâmpadas

As lâmpadas são os principais atuadores nos SIA. São elementos capazes de transformar energia elétrica em energia luminosa. Desde a invenção da lâmpada elétrica por Thomas Edison, em 1879, as lâmpadas sofreram grandes avanços tecnológicos tanto na forma de funcionamento como na sua fabricação e aplicação. Hoje são inúmeros os tipos e as formas de lâmpadas existentes comercialmente. No entanto, são apenas dois os fenômenos físicos utilizados nas lâmpadas para transformação de energia elétrica em luz: incandescência e fluorescência (luminescência)²². Esses dois fenômenos físicos permitem dividir as lâmpadas em dois grandes grupos: as **lâmpadas incandescentes**, e as **lâmpadas fluorescentes** ou de descarga.

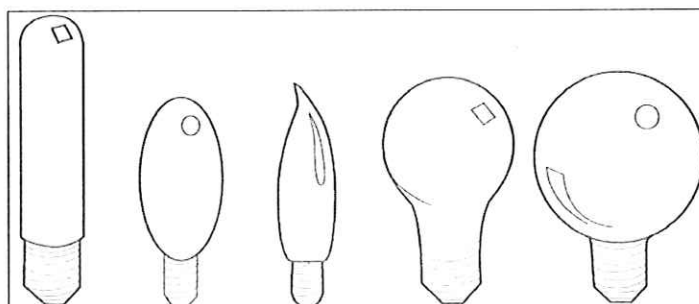


Figura 20 - Formatos comuns de lâmpadas incandescentes – retirado de (LIGHT RESEARCH CENTER, 2000).

²² Estes dois fenômenos físicos estão descritos no capítulo 2, página 12.

O princípio de funcionamento das **lâmpadas incandescentes** é baseado no aquecimento de um filamento pela passagem de uma corrente elétrica (efeito Joule). Quando aquecido à elevada temperatura, o filamento emite luz visível e radiações não visíveis (efeito Stefan-Boltzmann e distribuição de Planck). A intensidade de luz emitida é função da tensão aplicada ao filamento – este nada mais é do que uma resistência elétrica apropriada – o que torna fácil a dimerização dessas lâmpadas. Atualmente as lâmpadas incandescentes são vantajosas em relação às fluorescentes nos seguintes quesitos: custo inicial baixo, operação simples, facilidade de dimerização, boa reprodução de cores e constância da luminosidade. Suas desvantagens são a baixa eficiência energética e a vida útil relativamente pequena (THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERING, 1997). Na iluminação de interiores essas lâmpadas vêm sendo substituídas gradualmente pelas fluorescentes.

Nas **lâmpadas fluorescentes**, a luz é produzida pela ação de descargas elétricas em um meio fechado preenchido com gás ou vapor ionizado e revestido por uma película de material luminescente. A descarga elétrica provocada no gás/vapor emite radiação não visível que é absorvida pela película luminescente. Após receber energia através da absorção de radiação não visível, a película emite comprimentos de radiação visível transformando a energia inicialmente elétrica em energia luminosa. A distribuição espectral da luz emitida pela lâmpada depende da composição química do material luminescente. São vantagens das lâmpadas fluorescentes em relação as incandescentes: a eficiência energética alta, a vida útil longa e o custo relativo baixo. Entretanto a eficiência das lâmpadas é afetada pela temperatura ambiente (THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERING, 1997).

Diferentemente das lâmpadas incandescentes, as fluorescentes necessitam de circuitos auxiliares (reatores e *starters*) para funcionar, isto é, elas não podem ser ligadas diretamente na rede elétrica. A frequência da tensão aplicada à lâmpada tem papel fundamental na sua operação: baixas frequências (50-60 Hz) causam o fenômeno do *flicker* (piscamento) e não permitem dimerização; altas frequências (25-30 kHz) eliminam o problema do *flicker* e permitem a dimerização. É importante ressaltar que as curvas “*porcentagem da potência consumida vs porcentagem fluxo luminoso*” de dimerização para as lâmpadas fluorescentes (com reatores eletrônicos) são lineares e mostram que a potência consumida é percentualmente maior do que o fluxo luminoso proporcionado. Para 10% do fluxo luminoso máximo, Choi e Mistrick (1999) apuraram

que a potência consumida era 31% da potência máxima para um reator eletrônico utilizado no experimento conduzido por ele.

A seguir apresentam-se algumas características importantes a serem observadas na escolha de lâmpadas para SIA, que em geral constam nos catálogos técnicos de lâmpadas:

- **Fluxo luminoso** é quantidade de energia luminosa emitida pela lâmpada em funcionamento normal.
- **Potência de consumo** é a potência elétrica consumida pela lâmpada em funcionamento normal.
- **Eficiência luminosa** é a razão entre o fluxo luminoso emitido, para a potência consumida. A Figura 21 mostra a eficiência energética para diferentes tipos de lâmpadas.
- **Vida nominal** é a quantidade de horas, segundo os ensaios do fabricante, que em média a lâmpada funcionará até que ela seja considerada inapta ou ineficiente para uso.
- **Depreciação dos lumens** é a curva que relaciona o fluxo luminoso da lâmpada com a sua vida (horas em funcionamento).
- **Propriedades relacionadas à cor.** A distribuição espectral da radiação visível influencia as cores observadas no ambiente. Há vários índices que relacionam a distribuição espectral da lâmpada com as cores observadas: IRC, temperatura de cor, entre outros. Não é do escopo deste trabalho o estudo sobre cores devido a sua amplitude; no entanto, este fator deve ser observado de acordo com o ambiente onde o SIA será instalado e as expectativas do cliente.

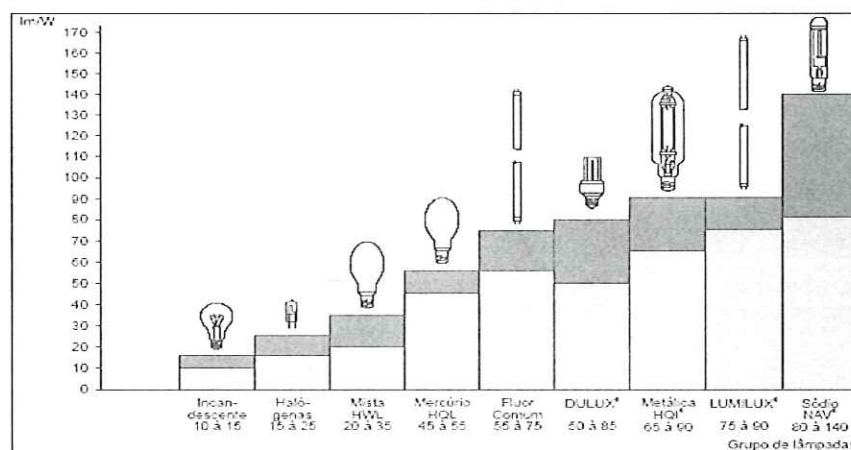


Figura 21 - Eficiência luminosa de diferentes tipos de lâmpadas (Dulux, Metálica HQI, Lumilux e Sódio NAV são modelos da Osram) – retirado de (OSRAM).

3.2.1.1. Luminárias

“Luminária é todo aparelho capaz de distribuir, filtrar e controlar a luz gerada por uma ou mais lâmpadas, que contenha todos os equipamentos e acessórios necessários para fixar, proteger e alimentar estas lâmpadas” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO, 1992).

As **luminárias** possuem um papel fundamental na distribuição espacial da luz emitida pelas lâmpadas. Uma escolha correta da luminária permite distribuir a luz de forma eficiente no ambiente. O leiaute e as características lumínicas do material que compõe a luminária determinam a sua **Curva de Distribuição Luminosa (CDL)** desta (Figura 22). A CDL apresenta o espalhamento da intensidade luminosa em um dado plano em função do ângulo, para lâmpadas de determinada potência (ou fluxo luminoso). Em geral, na CDL são encontradas duas curvas de distribuição luminosa: uma no plano que contém a direção do eixo principal da luminária (curva longitudinal) e é perpendicular ao plano do teto, e outra em um plano perpendicular ao anterior e ao plano do teto (curva transversal).

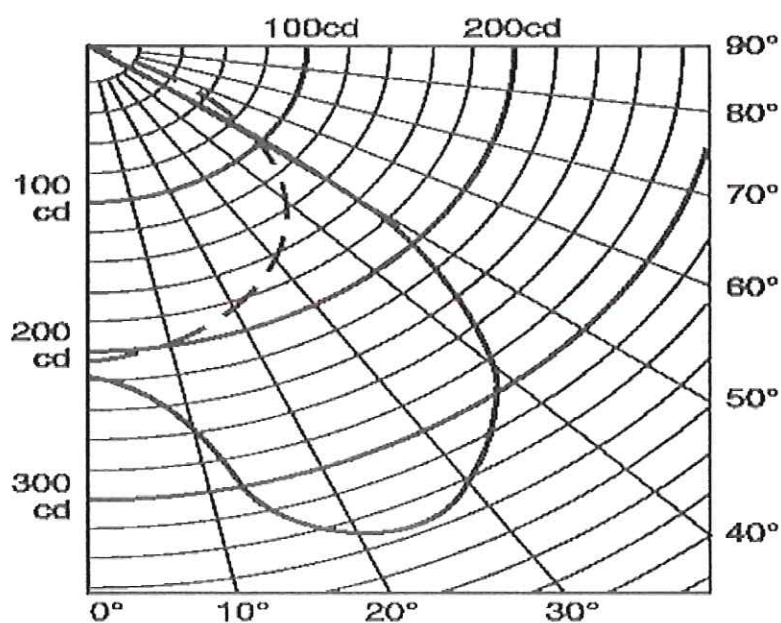


Figura 22 - Exemplo de uma CDL. (tracejada – longitudinal / cheia – transversal) – retirado de (OSRAM).

Outro fator que deve ser observado na escolha da luminária é o seu rendimento. O **rendimento de uma luminária** é a razão entre o fluxo luminoso fornecido pela luminária e o fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas contidas na mesma.

3.2.2. Cortinas/Venezianas Automáticas

As cortinas e as venezianas automáticas, assim como anteparos para aproveitamento da luz solar, vêm ganhando espaço dentro do SIA (DIBARTOLOMEO *et al.*, 1996; GUILLEMIN e MOLTENI, 2002; VINE *et al.*, 1998). Estes atuadores permitem regular a entrada de luz natural pelas janelas. A quantidade de luz no ambiente é regulada em função da abertura controlada da cortina/veneziana: um motor elétrico (motor de passo ou motor DC) posiciona as paletas destes dispositivos. A cor e a refletância das paletas são fatores determinantes para um bom funcionamento destes atuadores.

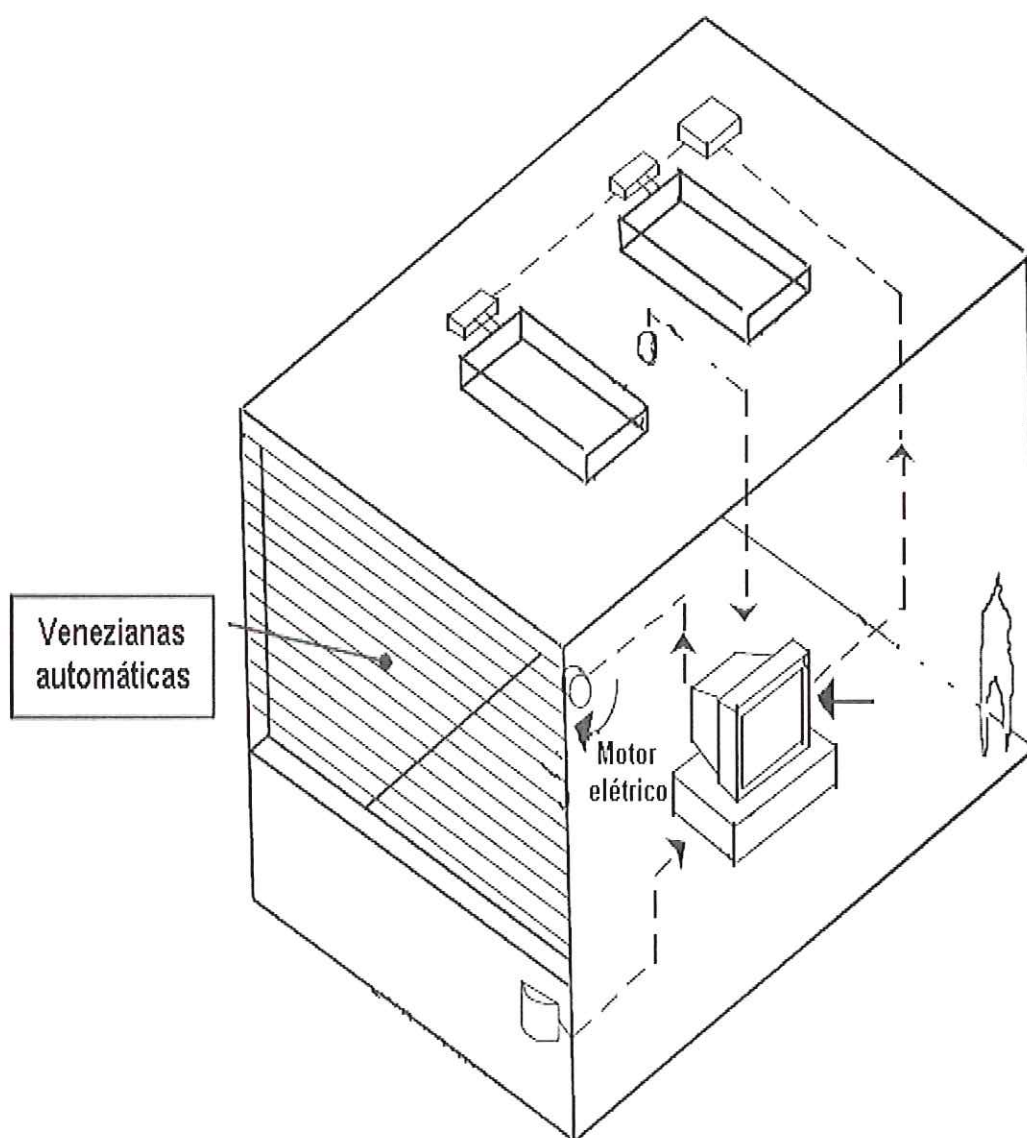


Figura 23 – Esquema: utilização de venezianas automáticas em um SIA – adaptado de (LEE, DIBARTOLOMEO e SELKOWITZ, 1998).

3.2.3. Vidros Eletrocrômicos

Os vidros eletrocrômicos vêm ganhando destaque nos SIA, “prometem ser o maior avanço tecnológico em vidros eficientes energeticamente” (LAMPERT, 1998). Esses vidros podem ter sua transmitância variada de acordo com uma diferença de potencial aplicada em seus pólos (KRC, 2002; LAMPERT, 1998). A Figura 24 ilustra um vidro eletrocrômico em estados com diferentes transmitâncias.



Figura 24 - Vidro eletrocrômico com transmitância total e transmitância parcial – retirado de (LEE, DIBARTOLOMEO e SELKOWITZ, 2004).

3.3. Controladores e algoritmos de controle

Os controladores são os elementos responsáveis por processar, segundo uma lógica, os sinais captados pelos sensores e comandar a(s) ação(ões) dos atuadores. Controladores em forma de circuitos elétricos, eletrônicos e lógicos são ainda largamente encontrados. No entanto, os controladores implementados em microprocessadores são os mais interessantes para sistemas de controle e automação, pois podem ser programados facilmente, o que os torna mais flexíveis e expansíveis que os anteriores.

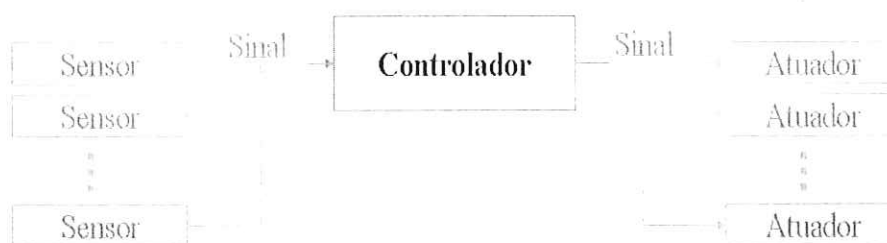


Figura 25 – Esquema: os controladores e os sistemas de controle.

O objetivo de um controlador é, através de uma lógica ou um algoritmo, determinar a relação de controle entre os sinais captados dos sensores e os sinais enviados aos atuadores. O algoritmo, independentemente da forma do controlador, são as regras que relacionam os sinais captados pelos sensores com os sinais enviados aos atuadores. Pode-se dividir os algoritmos mais utilizados em SIA nos seguintes grupos, em função dos sensores disponíveis:

- Programação por horário;
- Programação por ocupação;
- Programação por consumo energético;
- Programação por nível de iluminância;
- Programação pelo posicionamento solar;
- Programação por eventos; e
- Programação para satisfação do usuário.

Os algoritmos implementados nos SIA englobam características de um ou mais grupos acima.

3.3.1. Programação por horário

Algoritmos baseados em **programação por horário** comandam os atuadores de acordo com a hora do dia e/ou o dia da semana/mês/ano, informados por um **sensor horário** (NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION, 1992; NATIONAL LIGHTING BUREAU, 1988). O ligamento/desligamento de luminárias ocorre de acordo com horários pré-determinados, como horários de expediente, feriados e finais de semana. Quando os atuadores são passíveis de dimerização, diferentes níveis de dimerização podem ser escolhidos para diferentes horários. O posicionamento de cortinas/venezianas e a transparência de vidros eletrocromicos também podem ser controlados em função do horário.

3.3.2. Programação por ocupação

Os algoritmos baseados em ocupação comandam os atuadores de acordo com a ocupação dos ambientes, detectada por **sensores de ocupação**. São utilizados principalmente para desligamento de luminárias quando é detectada a ausência de usuários. O uso para acionamento de luminárias, principalmente em halls e corredores de prédios, vem se tornando comum também. A economia energética proporcionada com o uso deste tipo de algoritmo em SIA é apontada por diferentes autores (GARG e BANSAL, 2000; MANACCIA *et al.*; 2000; NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURES ASSOCIATION, 2001; VONNEIDA, MANACCIA e TWEED, 2000), variando entre 10% e 90% de acordo com o tipo e o padrão de uso do ambiente onde é feita a implementação. Uma variação na implementação deste algoritmo é a detecção de presença com sensores de abertura de porta (NATIONAL LIGHTING BUREAU, 1988). O posicionamento de cortinas/venezianas e a transparência de vidros eletrocromicos também podem ser alterados de acordo com a ocupação do ambiente.

3.3.3. Programação por consumo energético

A programação por consumo energético tem papel importante em edificações que contratam serviço de fornecimento de energia elétrica com tarifação por consumo e por demanda. Nesses casos o controle do consumo instantâneo (demanda), medido por **sensores de consumo energético**, é vital para manter a demanda sempre abaixo do nível contratado. Quando a demanda ultrapassa o valor contratado, luminárias são

desligadas ou dimerizadas para uma potência mais baixa pelo SIA, diminuindo a demanda total e evitando o pagamento de multas ou de tarifas mais elevadas.

3.3.4. Programação por nível de iluminância

Os algoritmos de controle por nível de iluminância utilizam **sensores de luz** para medir a iluminância e ajustar o fluxo luminoso das luminárias objetivando manter o nível de iluminância do ambiente dentro de uma faixa de valores em torno do *setpoint* desejado. A precisão no controle da intensidade do fluxo luminoso só é possível com o uso de sistemas de iluminação dimerizáveis.

Ajustar automaticamente o fluxo luminoso das lâmpadas, baseando-se no nível de iluminância permite o uso mais eficiente da iluminação artificial, que é corrigida para uma intensidade complementar à da iluminação natural incidente. Atif e Galasiu (2003), utilizando sistemas com programação por nível de iluminância, conseguiram reduzir o consumo de energia elétrica em 46% e previram que o mesmo sistema, com alguns melhoramentos poderá economizar até 73%. Bodart e Herde (2002), pesquisando diferentes autores, identificaram reduções no consumo energético entre 20% e 77%, propiciadas pelo uso de algoritmos com dimerização de lâmpadas em função da disponibilidade de luz natural.

Variações da programação, por nível de iluminância, incluem: 1) ligamento/desligamento de luminárias a partir de uma determinada iluminância (ATIF e GALASIU, 2003); 2) ligamento/desligamento de grupos de luminárias em função da iluminância; 3) movimentação de cortinas/venezianas em função da iluminância (VINE, 1998); e, 4) ajuste da transmitância de vidros eletrocromicos (KRC, 2002) em função da iluminância.

3.3.5. Programação por posicionamento solar

Na programação por posicionamento solar, os **sensores de posicionamento solar** informam ao SIA informações sobre a posição relativa entre os raios solares diretos e as aberturas de entrada de luz. A partir desse dado, o ângulo de abertura de cortinas/venezianas e/ou a transmitância de vidros eletrocromicos podem ser ajustados

para otimizar a direção e/ou a quantidade de luz natural que ingressa no ambiente (DIBARTOLOMEO, 1996; GUILLEMIN e MOLTENI, 2002; VINE, 1998).

3.3.6. Programação por eventos

A programação por eventos engloba um conjunto de algoritmos que possibilitam que o SIA responda diferentemente a eventos que ocorrem na edificação, inclusive aqueles que envolvem outros sistemas como segurança, incêndio, entre outros. A informação utilizada por essa classe de algoritmos provém de sensores e/ou controladores de outros sistemas. São exemplos: a ativação de grupo de luminárias quando ocorre incêndio, o desligamento de lâmpadas em caso de invasão, etc.

Uma vertente dessa classe de algoritmos são os sistemas baseados em comportamentos. Nesses sistemas, os atuadores possuem pontos característicos de operação – comportamentos – para cada conjunto de entradas (sinais dos sensores) que caracterizem um evento diferente. Hagrais *et al.* (2003), por exemplo, implementaram um sistema que, de acordo com o conjunto de dados lidos no meio (através de sensores), ativa um dos três comportamentos seguintes: Comportamento de Segurança, Comportamento de Economia ou Comportamento de Conforto. Cada um desses comportamentos desloca o ponto de operação dos atuadores visando a aumentar a segurança, a economia e o conforto, respectivamente.

3.3.7. Programação para satisfação do usuário

Os SIA têm como objetivo principal satisfazer o usuário do sistema. Guillemín e Molteni (2002) afirmam que para um SIA automático ter sucesso, o usuário deve ter controle total do sistema, isto é, ele pode alterar os parâmetros e o modo de funcionar do sistema de modo a satisfazê-lo. O resultado de SIA que não são passíveis a correções ou a mudanças propostas pelo usuário em tempo real, é a sua desativação e abandono.

A programação para satisfação do usuário deve, por meio de sensores que capturem a vontade do usuário, ajustar o sistema – incluindo parâmetros dos algoritmos citados anteriormente – de modo a corrigir o ponto de operação do sistema para um que promova satisfação do usuário. Entre os sensores que captam informações do usuário

pode-se destacar: interruptores, painéis de cena, softwares de interface homem-máquina, painéis de cristal líquido com “*touch screen*”, etc.

3.4. Integração do Sistema de Iluminação Automático com outros sistemas prediais

O Sistema de Iluminação Automático (SIA) é um dos vários sistemas de controle existentes em uma edificação. Seu funcionamento pode ser isolado, isto é, sem interação com os outros sistemas prediais; ou integrado, com diferentes níveis de interação com os outros sistemas prediais. A integração entre os sistemas prediais vem sendo debatida há mais de uma década e é consenso que sistemas integrados aumentam a sinergia do todo (JAGUSZTYN, 1995). Arkin e Paciuk (1997) afirmam que “a integração ou a interconexão de sistemas aumenta a segurança dos usuários e a confiança dos sistemas de controles, ao mesmo tempo que reduz os custos de operação”.

Há duas grandes classes de integração:

- **Integração dos sistemas de controle prediais e a estrutura predial.** Nessa classe há a integração entre sistemas de controle e elementos estruturais da edificação como janelas, portas, etc. São exemplos o aproveitamento de luz natural (SIA / janelas e clarabóias), as rotas de fuga em ambientes imunes ao fogo (sistema de detecção e combate a incêndios / portas, escadas e janelas), entre outros. Nesse tipo de integração o projeto arquitetônico tem um papel fundamental.
- **Integração entre os sistemas de controle prediais.** Essa classe contempla as interações entre os sistemas de controle. São exemplos: o controle da intensidade das lâmpadas objetivando a diminuir a carga térmica para o sistema de refrigeração, o desligamento de luminárias em caso de intrusão, entre outros.

O nível de integração entre os sistemas pode variar de um simples compartilhamento de sensor até algoritmos que coordenem mais de um sistema predial simultaneamente. Assim, um sensor de ocupação conectado ao sistema de automação predial poderá servir para controlar luminárias, para desligar o sistema de condicionamento de ar, para alertar a intrusão em uma área de segurança, para colaborar na busca de pessoas numa situação de emergência, ou até mesmo para determinar em qual andar o elevador vazio deve esperar por passageiros (LIGHT RESEARCH CENTER, 2004a).

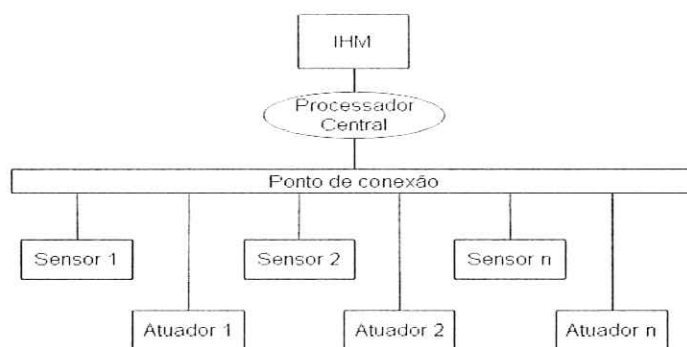
Guillemín e Morel (2001) ressaltam que uma grande quantidade de energia pode ser poupada ao serem usadas estratégias de controle integradas, ao invés de estratégias

individuais, o que traduz em 10 a 30% a menos no consumo total de energia, considerando-se apenas controladores de iluminação e HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*). Decisões dessa natureza repercutem na melhoria das condições de conforto e de trabalho e, conseqüentemente, resultam em maior bem-estar e produtividade.

A integração harmônica dos diversos sistemas prediais é tão importante quanto as próprias soluções tecnológicas individuais que têm sido encontradas para cada um dos sistemas prediais que coexistem numa edificação. Nos tempos atuais, essa integração é um desafio: o mercado de componentes para automação predial ainda é bastante fragmentado e, freqüentemente, os fabricantes produzem produtos que não trabalham bem em conjunto. Sensores, controladores e atuadores dos diversos sistemas prediais utilizam diferentes padrões para comunicação, o que dificulta bastante a integração de sistemas. Sharples, Callaghan e Clarke (1997) ressaltam que “para uma edificação funcionar como um sistema integrado, o ingrediente tecnológico final necessário é um **Sistema de Controle Distribuído (SCD)**”.

4. Sistemas de Controle Distribuído

Os sistemas de controle podem ser divididos em duas grandes categorias: **Sistemas de Controle Centralizado (SCC)** e **Sistemas de Controle Distribuído (SCD)**. No primeiro grupo todo o processamento ocorre num processador (controlador) central onde todos os sensores e atuadores devem estar conectados (Figura 26). Este tipo de sistema requer um ponto de comunicação entre o processador central e cada sensor/atuador. Para sistemas grandes, o número de sensores/atuadores pode ser superior a mil, o que torna árdua a instalação e a manutenção desses sistemas, já que todos os pontos devem ser conectados a um único processador ou ponto de processamento²³. O processamento centralizado de todo o sistema de automação muitas vezes está além da capacidade dos processadores comumente utilizados o que torna impraticável o uso destes em sistemas de grande porte. O cabeamento para interconexão do grande número de dispositivos ao processador central torna difícil a instalação e manutenção de um sistema centralizado. Outra desvantagem é que estes sistemas não são flexíveis: mudanças na forma de funcionamento ou no tipo/quantidade de sensores e atuadores são árduas. Além disso, o sistema pode ficar paralisado em caso de falha na central (MAHALIK e LEE, 2003).



IHM – Interface Homem-Máquina

Figura 26 – Sistema de Controle Centralizado

²³ A expressão *ponto de processamento* é utilizada aqui para destacar centrais compostas por mais de um processador.

Nos Sistemas de Controle Distribuído (SCD), cada sensor ou atuador possui um microprocessador responsável por todo o processamento local, isto é, cada sensor ou atuador é uma unidade básica de processamento ou **nó** do sistema (Figura 27). Os controladores nesses sistemas são encapsulados nos sensores e atuadores (nós). A funcionalidade do sistema é resultado do trabalho em conjunto dos nós que passam a ser unidades de processamento autônomas. Com esse método, divide-se uma tarefa grande em pequenas tarefas, cada uma residindo em um nó. O sistema de controle fica distribuído entre os vários nós que cooperam entre si, o que torna remota a possibilidade de falha total, já que a falha em um nó não paralisa o funcionamento dos demais (MAHALIK e LEE, 2003). Segundo Pereira *et al.* (2001), nesses sistemas, múltiplos e diferentes sensores cooperam para aumentar a percepção do meio, e os atuadores coordenam ações para incrementar a velocidade, a potência e a qualidade de atuação formando, conseqüentemente, redes virtuais de sensores e atuadores. Tian, Zhao e Baines (2000) ressaltam que a simplificação no cabeamento e na manutenção são benefícios imediatos na utilização de um SCD, mas o potencial em criar valor agregado através da integração de sistemas é muito mais significativo. Lee *et al.* (2001) ainda destaca que o uso de SCD fornece oportunidades para implementação de leis de controle mais sofisticadas.

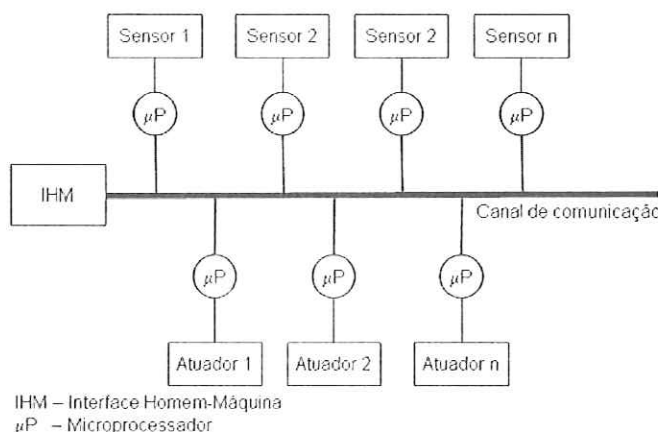


Figura 27 – Sistema de Controle Distribuído

Em um SCD, cada nó, instruído pelo aplicativo nele programado, publica informações na rede. Como os aplicativos programados nos diversos nós não são sincronizados e existe a possibilidade dos aplicativos tentarem enviar dados à rede ao mesmo tempo, é necessário especificar procedimentos e regras que possibilitem a conversação entre os diversos nós de uma rede. O conjunto de regras e procedimentos essenciais ao funcionamento de um SCD é chamado de **protocolo de comunicação**, e

engloba definições que vão desde o tipo do meio físico (par-trançado, cabo coaxial, radiofrequência, etc.) até a maneira como os dados transmitidos entre os nós devem ser interpretados.

No mercado há vários protocolos de comunicação (padrões) que permitem a implementação de SCD para a área de automação predial. O uso de padrões de comunicação abertos²⁴ permite que fabricantes diferentes possam desenvolver produtos que se comuniquem dando ao consumidor mais opção de compra e facilitando a integração entre produtos de diferentes sistemas prediais (ex.: iluminação, HVAC, controle de acesso, incêndio, etc.). Entre os protocolos de comunicação abertos com maior destaque em aplicações gerais de automação predial estão: LonTalk, EIB e Bacnet. Há também protocolos específicos para a área de iluminação, como o DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*) (HELVAR MERCA LIMITED, 2000). No entanto, deve ser observado que o uso de protocolos específicos, como o DALI, dificulta a integração entre diferentes sistemas prediais.

São encontrados também sistemas mistos que possuem características das duas categorias supracitadas (SCC e SCD). Esses sistemas são, em geral, compostos por várias centrais de controle que podem ser interligadas entre si ou a um equipamento supervisor.

²⁴ Os padrões abertos são aqueles que possuem sua especificação disponível e podem ser implementados por qualquer um. Em contraposição há os padrões fechados ou proprietários, cujas especificações são propriedades privadas. Estes últimos só podem ser implementados mediante autorização.

4.1. O modelo de referência ISO OSI

O modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) da ISO (*International Organization for Standardization*) é um modelo de referência que permite a análise ou o desenvolvimento coordenado de sistemas de comunicação. Um dos princípios fundamentais do modelo é a estruturação do protocolo de comunicação em camadas hierárquicas. Em cada camada são programados tipos específicos de serviços da rede de comunicação. “Cada nível deve ser pensado como um programa ou processo, implementado por hardware ou software, que se comunica com o processo correspondente em outro nó. As regras que governam a conversação de um nível N qualquer são chamadas de protocolo de nível N ” (SOARES, LEMOS e COLCHER, 1995) (Figura 28). O protocolo de comunicação é o conjunto dos protocolos de todos os níveis. A proposta do modelo OSI é ser uma referência conceitual, pois não são descritos padrões específicos para as camadas (ou níveis) propostas pelo modelo. O uso de um modelo de referência é de vital importância no estudo e na análise dos protocolos de comunicação dos SCD.

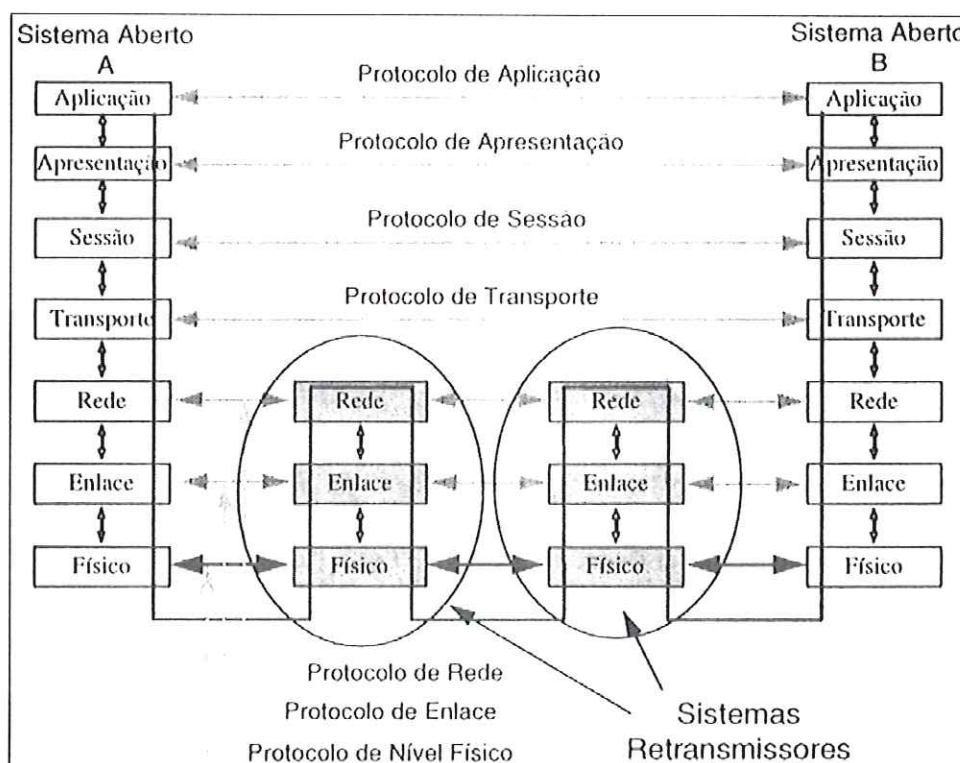


Figura 28 – Níveis do modelo OSI – retirado de (SOARES, LEMOS e COLCHER, 1995).

A figura acima mostra os sete níveis (Físico, Enlace, Rede, Transporte, Sessão, Apresentação e Aplicação) definidos no modelo OSI e a comunicação entre dois nós (A

e B). Na figura há dois nós intermediários que servem somente como retransmissores ou roteadores de mensagens. A seguir apresenta-se a descrição sucinta dos serviços definidos para cada uma das camadas do modelo OSI (SOARES, LEMOS e COLCHER, 1995; YOMURA, 1998):

- **Física:** fornece características mecânicas, elétricas, funcionais e de procedimentos de transmissão dos bits pelo meio físico. A função deste nível é permitir o envio de uma cadeia de bits sem se preocupar com seu significado ou com a forma como esses bits são agrupados. Inclui-se a escolha do meio físico, a taxa de transmissão, a representação do bit, etc.
- **Enlace:** controla a transferência do pacote de informação através do meio físico. O objetivo deste nível é detectar erros que por ventura o corram no nível físico. Inclui-se o protocolo de acesso ao meio, o algoritmo de detecção de erros, a delimitação de quadros, etc.
- **Rede:** controla o chaveamento e estabelece a rota para conexão e a troca de informação entre dois nós.
- **Transporte:** responsável pela integridade dos dados trocados entre dois nós. Esse nível isola os próximos níveis da parte de transmissão de rede.
- **Sessão:** organiza e sincroniza a comunicação, e gerencia as trocas de dados.
- **Apresentação:** transforma os dados, convertendo-os em formatos ou códigos adequados. Entre as possíveis transformações estão a compressão de texto, a criptografia, a conversão de padrões, etc.
- **Aplicação:** fornece serviços ao aplicativo do usuário. É a interface entre o protocolo de comunicação e a aplicação.

Os protocolos de comunicação para um SCD, no entanto, não necessitam da implementação de todas as camadas. São comumente programados os níveis físico, de enlace e de aplicação. O estudo desenvolvido por Araújo (2002) sobre os protocolos de comunicação mais utilizados para automação predial mostrou que a camada de aplicação desses protocolos se utiliza do paradigma da orientação objeto para sua especificação (ARAÚJO, 2003). É no nível de aplicação do nó que estão definidas a funcionalidade e a interface de comunicação dos nós (os dados que serão enviados por ou recebidos de outros nós).

4.2. Orientação Objeto

Sistemas de Controle Distribuído apresentam vantagens como uma estrutura formada por componentes (nós) autônomos e cooperativos. Mesmo assim esses sistemas devem ser complementados com métodos de projeto que explorem essa estrutura distribuída. “*O projeto orientado a objetos tem provado ser a chave tecnológica para o desenvolvimento de sistemas grandes e complexos*” (PEREIRA, 2001). Os Sistemas de Controle Distribuído (SCD) que se utilizam do paradigma da orientação objeto para o projeto e a implementação são conhecidos por Sistemas de Controle Distribuído Orientados a Objetos (SCDOO).

As técnicas de projeto orientadas a objetos vêm mudando a visão do projeto e da implementação dos sistemas de informação tradicional. O enfoque deixa de ser nos processos e sua decomposição, e passa a ser nos objetos e seus comportamentos. Os objetos são os átomos de um sistema orientado a objetos. É o conjunto dos objetos e a comunicação entre eles que conformam todo o sistema e permitem que um sistema de controle possa ser dividido em componentes menores e independentes: os objetos. “*O projeto orientado a objeto é a chave para a computação maciçamente distribuída*” (MARTIN e ODELL, 1995).

A maioria dos sistemas de automação industrial e predial são complexos, isto é, envolvem um grande número de processos e variáveis, que interagem entre si e devem ser controlados simultaneamente. Mahalik e Lee (2003) elucidam que o uso de uma estrutura modular – orientada a objetos, dividindo as tarefas entre unidades menores (objetos) e cooperativas entre si, apresenta diversas vantagens em relação ao uso de uma única estrutura complexa desempenhando todas as tarefas. Entre as vantagens, os autores citam:

- fácil modificação e melhoramento do sistema, assim que mudanças são requeridas;
- facilidade de manutenção;
- melhora na funcionalidade e desempenho;
- aumento da escalabilidade, extensibilidade e reusabilidade; e
- customização mais rápida.

4.2.1. Conceitos

Um objeto é uma estrutura, real ou abstrata, a respeito da qual se armazenam dados e os métodos que os manipulam. Os dados ou atributos são as estruturas internas do objeto que representam seu estado. As manipulações dos dados são feitas mediante o uso de métodos, que são operações que expressam o comportamento do objeto. É através dos métodos que os objetos trocam mensagens entre si. A única forma de se obter ou alterar o estado de um objeto é pelo envio de mensagens. A Figura 29 ilustra a troca de mensagens possibilitada pelo uso dos métodos (retângulos menores) entre quatro objetos (retângulos maiores) de um sistema orientado a objetos. As elipses representam os estados ou atributos dos objetos.

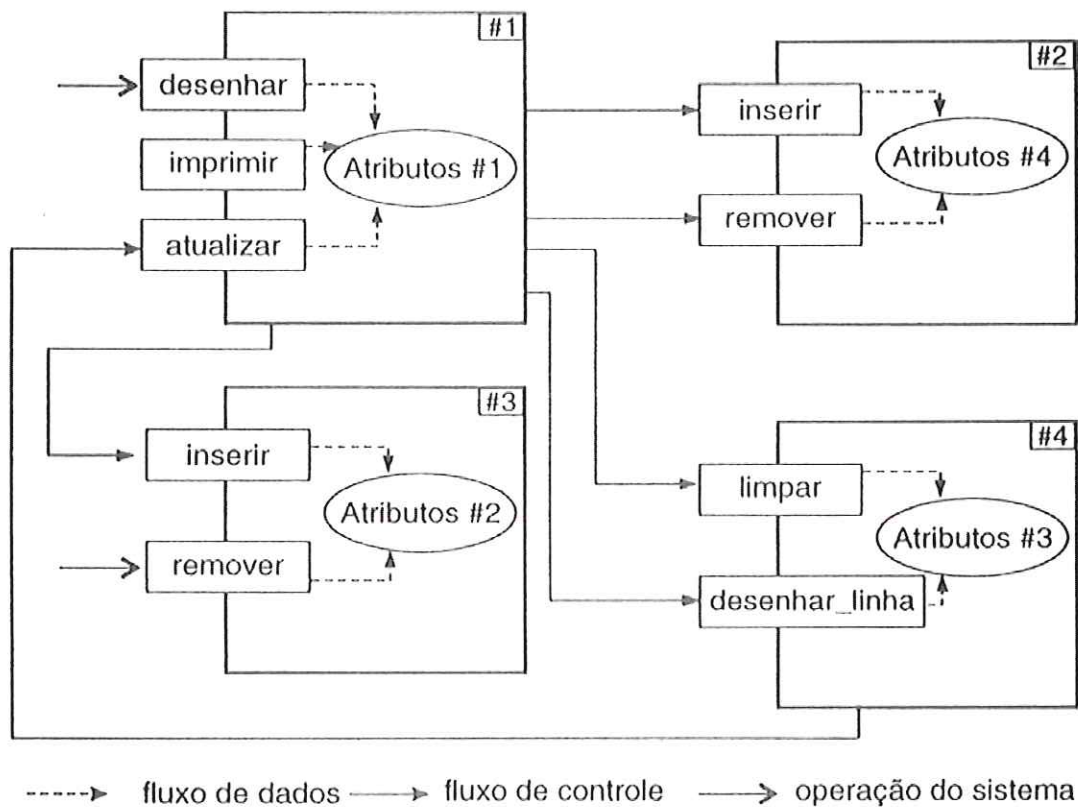


Figura 29 – Modelo de um sistema orientado a objetos – retirado de (COLLEMAN *et al*, 1996).

Objetos que possuem a mesma funcionalidade, os mesmos comportamentos e os mesmos métodos pertencem à mesma classe. A **classe** é um modelo que descreve quais são os métodos, qual é a funcionalidade e quais são os comportamentos de um conjunto de objetos do mesmo tipo. Cada objeto criado a partir de uma determinada classe é uma **instância** desta (Figura 30).

Na Figura 29, que representa uma estrutura orientada a objetos tipicamente utilizada nas linguagens de programação orientadas a objetos como C++, a troca de mensagens acontece pela invocação de um método de outro objeto. Esse método de comunicação (Método da Invocação Remota) requer que a conexão entre os objetos seja feita na etapa de desenvolvimento dos nós, com o prévio conhecimento dos métodos acessíveis no objeto com o qual se quer comunicar. Isto é, há uma forte dependência entre os objetos, já que para a comunicação entre eles é necessário o conhecimento dos métodos dos objetos que participarão da comunicação.

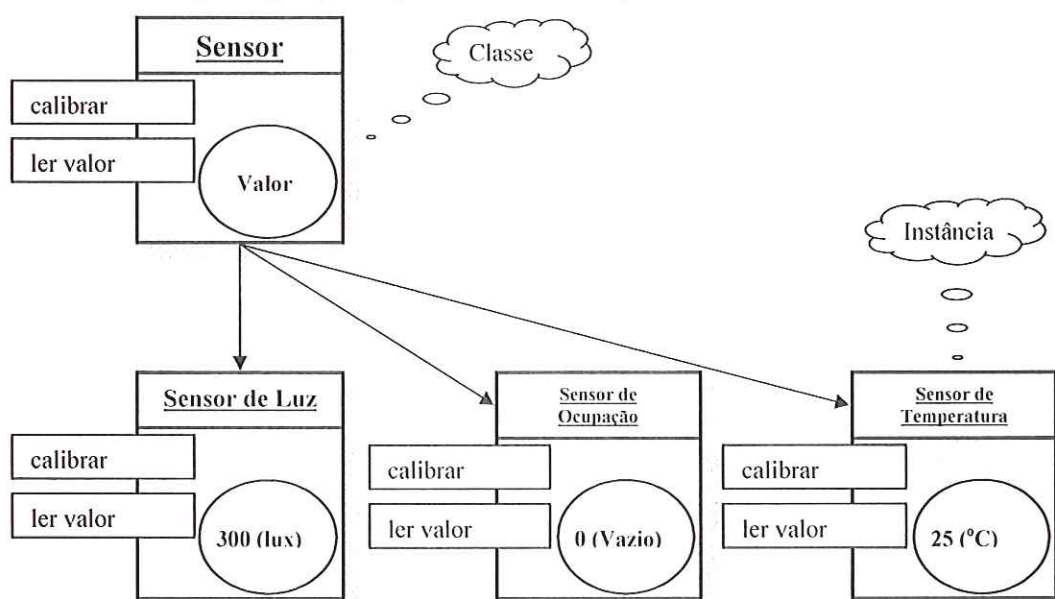


Figura 30 – Esquema de uma classe e suas instâncias.

A grande dependência entre os objetos existentes que utilizam métodos de comunicação, como o da Invocação Remota, não é interessante em um SCD. Nesses sistemas, é desejável que as conexões entre os objetos, desenvolvidos por diferentes fabricantes, sejam feitas durante a instalação. Não é necessário, assim, que o fabricante de determinado nó tenha necessidade de conhecer nós desenvolvidos por terceiros, o que aumenta a flexibilidade de configuração do sistema. Todo mecanismo de comunicação entre objetos que permita maior flexibilidade na instalação e dê maior independência aos desenvolvedores de nós é preferível; dentre os métodos comumente utilizados destaca-se o da Comunicação baseada em Portas.

No Método de Comunicação baseado em Portas, os objetos se comunicam por meio de portas – pontos de comunicação (ou acesso) da interface externa de cada objeto. No momento da instalação e configuração do sistema, os objetos com portas

conjugadas são interligados por intermédio de suas portas. Dessa maneira um objeto transmite informações por uma porta de saída às portas de entrada de outros objetos (Figura 31). Os métodos de cada objeto estão encapsulados nas mensagens (informações) que estes recebem de outros objetos através das suas portas de entrada.

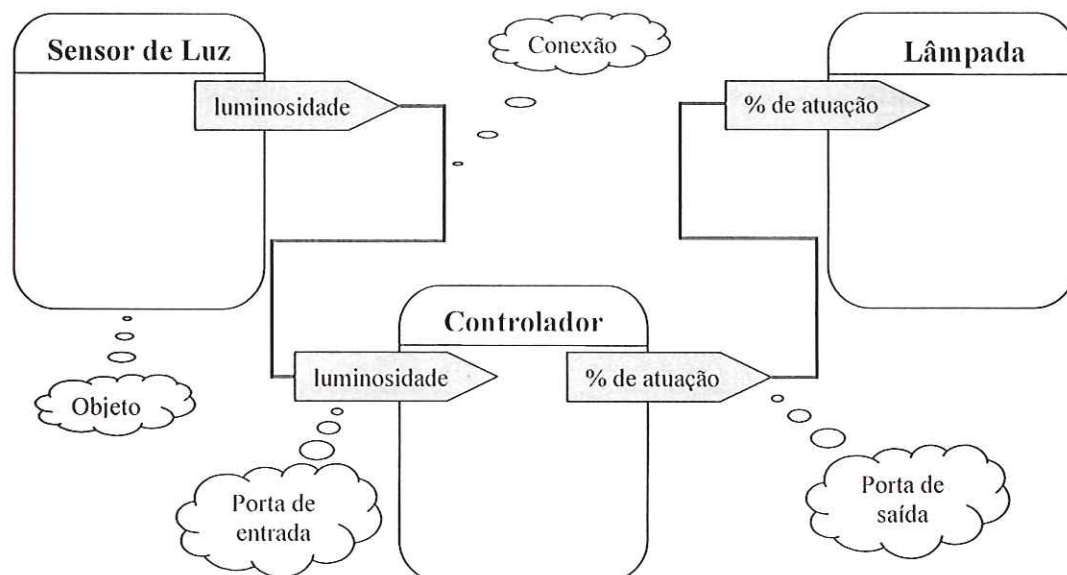


Figura 31 – SCDOO utilizando o Método de Comunicação por Portas

4.3. A tecnologia Lonworks

A tecnologia Lonworks foi concebida pela Echelon, empresa americana, no final da década de 1980. A história da Echelon e da tecnologia Lonworks se confundem. A empresa foi criada no final da década de 1980 visando desenvolver uma tecnologia de comunicação que preenchesse uma lacuna de mercado: possibilitar que aparelhos de uso diário pudessem se comunicar e cooperar entre si. No início a empresa não oferecia nada além de uma promessa. As primeiras parcerias foram com a Toshiba e a Motorola que começaram a produzir os primeiros Neuron Chips – microprocessadores especialmente desenvolvidos para a tecnologia Lonworks com o protocolo de comunicação Lontalk implementado como *firmware*. Em seguida, a Echelon desenvolveu os primeiros transceptores, ferramentas de configuração e ferramentas de desenvolvimento de nós para a tecnologia Lonworks.

Um diferencial entre a tecnologia Lonworks e outras similares é o conjunto de ferramentas e dispositivos disponíveis no mercado que facilitam a incorporação da tecnologia em dispositivos de qualquer fabricante, além de um microprocessador com o protocolo de comunicação implementado. Entre as áreas de aplicação da tecnologia estão a aeroespacial, a da agricultura, a de transportes, utilidades, automação predial e automação residencial. As duas últimas se destacam e são os carros chefes da tecnologia. Já há mais de 27 milhões de dispositivos Lonworks instalados em todo o mundo²⁵.

4.3.1. Lontalk – o protocolo de comunicação

O protocolo Lontalk foi desenvolvido visando suportar requisitos de comunicação em diversas áreas de aplicação. Para atingir esse objetivo, o protocolo foi elaborado como um conjunto de serviços que podem ser opcionalmente invocados de acordo com as especificidades da aplicação. Até 1999, o protocolo Lontalk era um padrão fechado quando então se tornou o padrão aberto ANSI/EIA 709.1-A-1999. Atualmente o protocolo Lontalk é um padrão reconhecido por vários organismos de padronização ao redor do mundo: AAR (*American Association of Railroads*), ANSI (*American National Standards Institute*), ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigeration and Air*

²⁵ Dados retirados do site da Echelon (www.echelon.com) em 20/07/2004.

Conditioning), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), IFSF (*International Forecourt Standards Forum*) e SEMI (*Semiconductor Equipment and Materials Incorporated*).

Diferentemente de outros protocolos de comunicação para SCD que implementam apenas três das sete camadas do modelo OSI, o protocolo LonTalk possui serviços nas sete camadas. O Quadro 1 resume os serviços de cada uma das camadas.

Quadro 1 – Camadas do protocolo LonTalk.

Camada OSI	Finalidade	Serviços oferecidos
7 Aplicação	Compatibilidade de aplicações	Tipos de variáveis padrões de rede; perfis funcionais; e objetos.
6 Apresentação	Interpretação de dados	Variáveis de rede; transmissão de arquivos.
5 Sessão	Ações remotas	Solicitação-resposta (<i>request-response</i>); autenticação; gerenciamento de rede; e interface de rede.
4 Transporte	Confiabilidade ponto-a-ponto	Mensagens com/sem reconhecimento; ordenação de pacotes; autenticação <i>unicast & multicast</i> ; e detecção de duplicação.
3 Rede	Endereçamento de destino	Roteamento; e endereçamento <i>unicast & multicast</i> .
2 Enlace	Acesso ao meio e delimitação de quadros	Delimitação de quadro; codificação de dados; verificação de erros (CRC); acesso ao meio (<i>predictive p-persistent CSMA</i>); prioridade; e detecção de colisão.
1 Física	Interconexão elétrica	Interface com meio físico; esquemas de modulação.

Fonte: ECHELON, 1993

São seis os meios físicos originalmente especificados pelo protocolo: par-trançado, rede elétrica, cabo coaxial, infravermelho, rádio frequência e fibra ótica. O meio físico pelo qual trafegam os dados é chamado de **canal**. Recentemente foi incluída a possibilidade de comunicação Lonworks via o padrão TCP/IP. O formato do bit e a taxa de transmissão dependem do tipo de canal utilizado. O Quadro 2 descreve características dos canais mais usados na tecnologia Lonworks.

Quadro 2 – Canais Lonworks mais utilizados

Canal	Meio físico	Taxa de transmissão	Transeceptores compatíveis	Nº máximo de dispositivos	Distância máxima
TP/FT-10	Par-trançado	78 kbps	FTT-10A, LPT-10	64-128	500 m
TP/XF-1250	Par-trançado	1,25 Mbps	TPT/XF-1250	64	125 m
PL-20	Rede elétrica	5,4 kbps	PLT-20, PLT-21	Depende*	Depende*
IP-10	Internet	Depende ⁺	Depende ⁺	Depende ⁺	Depende ⁺

* Dependente das características da rede elétrica

⁺ Determinado pela rede IP

A variedade de canais facilita a instalação de redes Lonworks nos mais diversos ambientes. Pode-se utilizar os vários tipos de canais numa mesma instalação com o uso de roteadores que podem ser configurados como simples repetidores, como uma ponte entre dois canais, ou como gerenciador de tráfego (Figura 32).

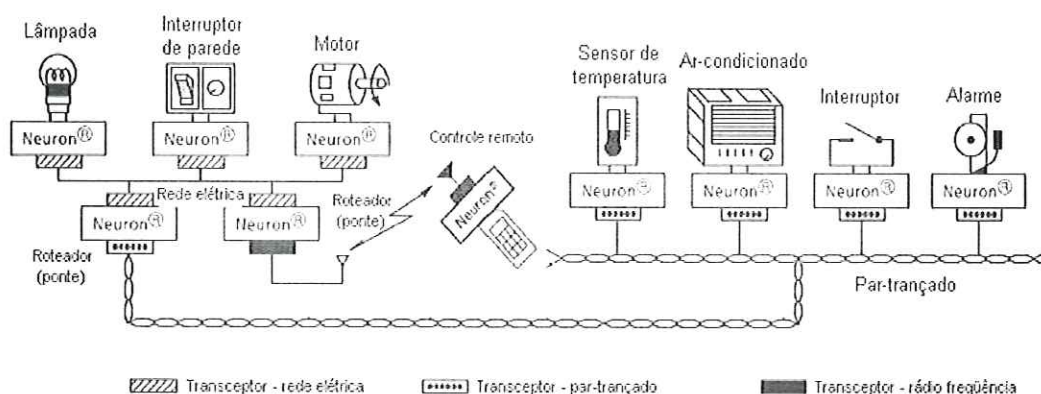


Figura 32 – Esquema de configuração de uma rede Lonworks – retirado de (TOSHIBA).

O algoritmo de acesso ao meio é o *predictive p-persistent CSMA*, desenvolvido visando garantir que ao protocolo Lontalk suportasse redes com múltiplos canais, mantivesse a performance durante períodos de comunicação intensa e comportasse redes com grande número de nós. Assim que o meio de comunicação é disponibilizado para comunicação, repetem-se ciclos com 16 *slots* de tempo. Cada nó escolhe aleatoriamente um dos 16 *slots* de tempo para transmissão de seus dados, e dentro desse *slot* de tempo ele pode transmitir um dado com a probabilidade p . A probabilidade p diminui com o aumento do tráfego, enquanto que o número de *slots* de tempo por ciclo aumenta por um fator n com o aumento do tráfego. A variação dinâmica da probabilidade p e do número de *slots* por ciclo n é feita baseada nos reconhecimentos esperados após o envio de uma mensagem de reconhecimento. *Slots* de prioridade podem ser inseridos no início de cada ciclo dando preferência a mensagens com grau de prioridade maior, como um alarme de incêndio (ECHELON, 1995).

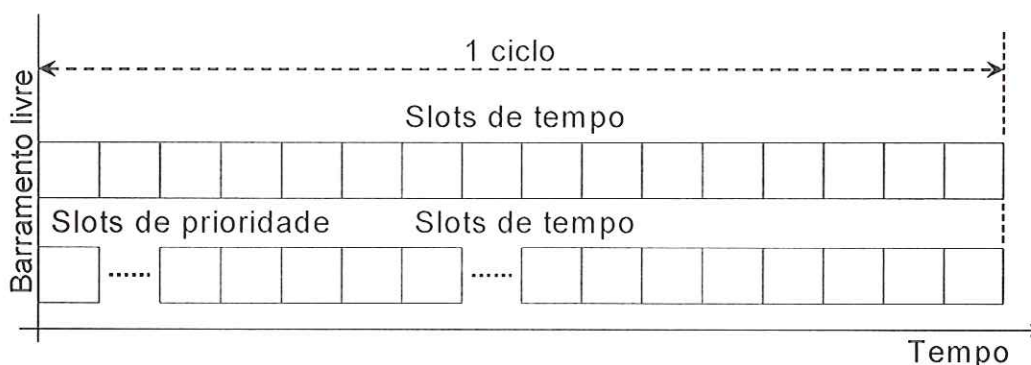


Figura 33 – Funcionamento dos *slots* de tempo e prioridade no protocolo Lontalk.

Há três modos de endereçamento especificados pelo protocolo: pelo número de série; lógico por nó, lógico por grupo. No primeiro tipo, usado principalmente durante a configuração do sistema, a identificação do nó é feita pelo número de série de 48 bits do Neuron Chip. O endereçamento lógico por nó ocorre após a configuração da rede onde cada nó ganha um endereço lógico de 15 bits – totalizando 32.385 endereços²⁶ – que será utilizado para comunicação durante o funcionamento da rede. Além do endereço lógico, o nó pode receber um identificador de grupo – endereço lógico por grupo. Esse último tipo de endereçamento permite que uma mensagem possa ser enviada simultaneamente a um grupo de nós que possuem o mesmo identificador de grupo (ECHELON, 1993).

As mensagens que trafegam pela rede podem ser com confirmação (uma mensagem de reconhecimento é enviada por cada nó destino), sem confirmação (não há mensagens de reconhecimento), com repetição (a mesma mensagem é enviada diversas vezes e não é esperado reconhecimento) e com resposta (o nó remetente fica aguardando um dado como resposta). O serviço de autenticação entre nós pode ser configurado na instalação, evitando que nós não autorizados enviem determinadas mensagens (ECHELON, 1993).

O protocolo Lontalk utiliza um protocolo de aplicação orientado a dados, isto é, a troca de informação é feita através de dados como temperaturas, pressões, estados, etc. Comandos executados nos nós ficam encapsulados nos dados que trafegam pela rede. Cada tipo de dado que trafega pela rede é chamado de **variável de rede** (ou *network variable* em inglês). Durante a configuração, pares de variáveis de rede pertencentes a nós comunicantes são conectados, permitindo ao nó que publica determinado dado na rede saber exatamente para qual endereço ele deverá destinar uma mensagem (Figura 34) (ECHELON, 1993).

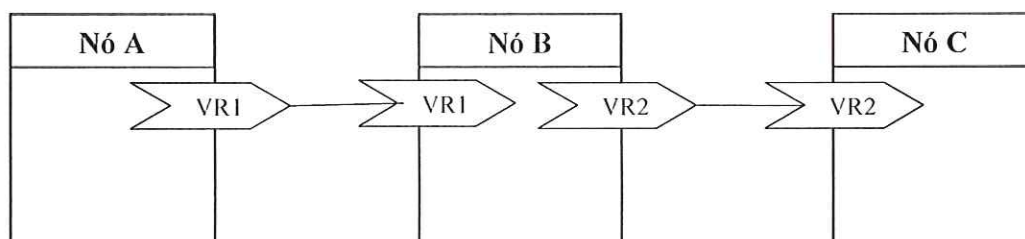


Figura 34 – Conexão das variáveis de redes entre três nós.

²⁶ Algumas das combinações dos 15 bits de endereçamento são reservadas às ferramentas de configuração de rede, por isso o total de endereços é 32.385 e não 32.768 como esperado.

4.3.2. O nó Lonworks

Um nó Lonworks é formado basicamente por três componentes: um transceptor, um Neuron Chip e dispositivos de sensoriamento e/ou atuação. Eventualmente, um outro microprocessador é acoplado ao Neuron Chip em aplicações que requerem maior poder de processamento e/ou maior espaço de armazenamento. A Figura 35 mostra um esquema com os componentes básicos dos nós Lonworks.

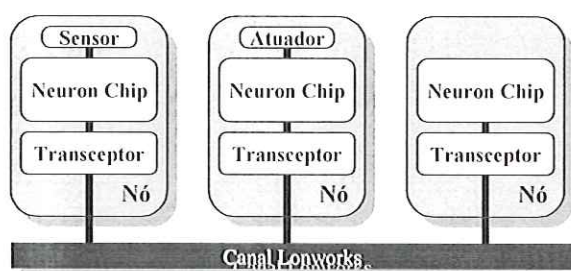


Figura 35 – Esquema dos nós Lonworks

Um **transceptor** é um dispositivo eletrônico de interface entre o canal de comunicação e o Neuron Chip, que preserva esse último de danos contra possíveis alterações no meio de comunicação.

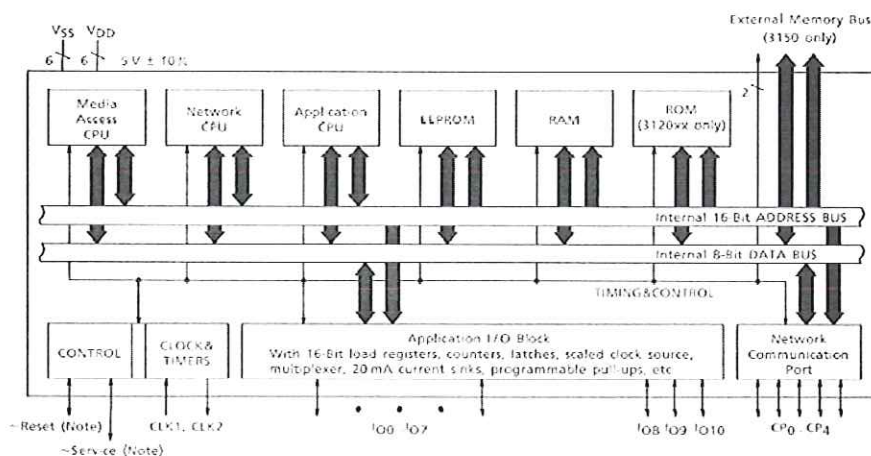


Figura 36 – Diagrama de blocos do Neuron Chip – retirado de (TOSHIBA).

O **Neuron Chip** é o cerne de um nó Lonworks. É nele que estão programados o protocolo de comunicação e o aplicativo do nó. O protocolo Lontalk é um *firmware* do Neuron Chip e o aplicativo pode ser programado com ferramentas de desenvolvimento. A Figura 36 ilustra o diagrama de blocos do Neuron Chip. Em um Neuron Chip há três processadores de 8 bits: dois responsáveis pelo processamento do protocolo de comunicação e um para o processamento da aplicação do usuário. A capacidade de endereçamento total do Neuron Chip é de 64 kbytes. São 11 as portas de comunicação

entre o Neuron Chip e os dispositivos de sensoriamento e/ou atuação, o que permite a conexão de até 11 dispositivos simples (de dois estados – tipo bit) (TOSHIBA).

4.3.3. Lonmark, a interoperabilidade e os objetos

O protocolo Lontalk organiza a comunicação entre nós Lonworks, possibilitando que mensagens enviadas por um nó cheguem ao(s) destinatário(s) usando inclusive diferentes meios físicos e invocando diferentes serviços de comunicação de acordo com a aplicação. Essas características o tornam um protocolo flexível, mas também criam a necessidade da padronização de regras complementares que garantam a interoperabilidade entre produtos Lonworks de diferentes fabricantes. Características elétricas dos transceptores para cada tipo de meio físico, por exemplo, devem ser casadas para que o sinal enviado por um transceptor não danifique os demais ou cause distúrbio na rede. A maneira de interpretar os dados que trafegam na rede também necessita ser padronizada. Um nó pode, por exemplo, publicar na rede o valor de uma temperatura em graus Celsius e o destinatário poderá interpretar o dado lido como uma temperatura em kelvins.

Para padronizar a forma como produtos Lonworks devem ser implementados de forma a se tornarem interoperáveis, foi criada, em 1994, pela Echelon e um grupo de usuários de Lonworks, a **Lonmark**, que é uma associação de padronização e certificação de produtos Lonworks. O surgimento da Lonmark veio com a necessidade da garantia de interoperabilidade entre os produtos Lonworks que vinham sendo fabricados em todo o mundo por diferentes fabricantes. Há dois guias de referência que são publicados pela Lonmark e visam auxiliar o desenvolvimento de nós Lonworks:

- *Lonmark layer 1-6 interoperability guidelines* (LONMARK, 2002b). Padronização dos transceptores, canais de comunicação e algumas características de configuração das camadas de 1 a 6 do protocolo Lontalk; e
- *Lonmark application-layer interoperability guidelines* (LONMARK, 2002a). Padronização da interface de comunicação, da interpretação dos dados e da documentação dos nós.

A forma física de um canal depende do meio físico em questão: um canal de par trançado é um par de fios trançados, um canal de rádio frequência é uma frequência específica de rádio, etc. Da mesma maneira a taxa de transmissão de um canal depende

dos limites do meio físico e das limitações do transceptor usado. O protocolo Lonmark possibilita o uso de diferentes meios físicos, e a Lonmark padroniza os canais e define as características que os transceptores de produtos certificados devem apresentar. O Quadro 3 apresenta os canais padronizados e recomendados pela Lonmark.

Quadro 3 – Canais padronizados e recomendados pela Lonmark.

Canal	Meio-físico	Taxa de transmissão	Características
TP/XF-1250	Par-trançado	1.250 kbps	Topologia em barra
TP/XF-78	Par-trançado	78 kbps	Topologia em barra
TP/RS485-39	Par-trançado	39 kbps	Topologia em barra
TP/FT-10	Par-trançado	78 kbps	Topologia livre; Alimentação opcional pela própria rede
PL-20(L-N)	Rede elétrica	5 kbps	125 kHz – 140 kHz Acoplamento linha-neutro
PL-20(L-E)	Rede elétrica	5 kbps	125 kHz – 140 kHz Acoplamento linha-terra
PL-20A(L-N)	Rede elétrica	3,6 kbps	70 kHz – 95 kHz Acoplamento linha-neutro
FO-20S	Fibra ótica	1.250 kbps	Bi-direcional 64 nós por segmento
FO-20L	Fibra ótica	1.250 kbps	Bi-direcional 512 nós por segmento
IP-852	Internet	Varia	Dependentes da rede TCP/IP usada.

Fonte: LONMARK, 2002b

Além dos canais e das características elétricas dos transceptores, são padronizados também alguns parâmetros de configuração dos serviços das camadas de 2 a 6 do protocolo Lonmark de forma a assegurar que o envio e a recepção de mensagens ocorram dentro de um padrão que garanta a interoperabilidade.

Quadro 4 – Exemplos de variáveis de rede padrão (SNVTs) definidas pela Lonmark.

Nome	Grandeza	Unidade	Faixa	Resolução
SNVT_lenght	comprimento	m	0 a 6.553,5	0,1 m
SNVT_lenght_kilo	comprimento	km	0 a 6.553,5	0,1 km
SNVT_temp	temperatura	°C	-274 a 6.279,5	0,1 °C

Para a camada de aplicação, a Lonmark padroniza os tipos de variáveis de rede – *Standard Network Variable Types (SNVTs)* – para as diferentes áreas de aplicação. A última versão²⁷ publicada pela Lonmark conta com 177 tipos diferentes (LONMARK, 2003). São exemplos de variáveis padronizadas pela Lonmark: temperatura em graus

²⁷ Versão 12 de junho de 2003.

Celsius, temperatura em kelvins, velocidade angular em radianos por segundos, etc. O Quadro 4 exemplifica algumas das variáveis padronizadas pela Lonmark.

A Lonmark estrutura os aplicativos nos nós em unidades funcionais chamadas **blocos funcionais**. O bloco funcional realiza tarefas específicas recebendo dados de entrada, processando-os, e enviando dados de saída. Os dados de entrada podem ser recebidos da rede ou de dispositivos, como sensores acoplados ao nó. Os dados de saída podem ser enviados para a rede ou para algum dispositivo, como atuadores acoplados ao nó. Um nó pode conter um ou mais blocos funcionais que são análogos aos objetos descritos na seção 4.2 com comunicação baseada em portas. As portas são as variáveis de rede de entrada e de saída. A Figura 37 ilustra a representação gráfica recomendada pela Lonmark para representar um bloco funcional.

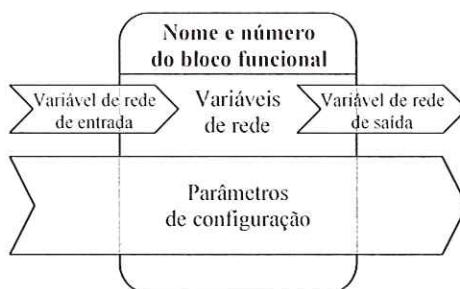


Figura 37 – Representação gráfica de um bloco funcional (interface)

As variáveis de rede de entrada e de saída são as portas de comunicação dos blocos com os outros blocos funcionais. Os parâmetros de configuração são as portas pelas quais, na instalação, parâmetros de funcionamento do bloco são configurados de acordo com as especificidades do sistema. Ao instalador e ao usuário só interessa a interface mostrada na Figura 37. A implementação do algoritmo contido em cada bloco funcional é responsabilidade do fabricante. Este último deve apenas garantir que seu bloco desempenhe as tarefas esperadas e que a interface externa siga os padrões recomendados pela Lonmark.

Há perfis de blocos funcionais (classes) padronizados em diferentes áreas: acesso/intrusão/monitoramento, incêndio/fumaça, HVAC (*Heating, Ventilation and Air-Conditioning*), industrial, dispositivos de entrada/saída, iluminação, gerenciamento, controle de motores, refrigeração, sensores e transporte vertical. A configuração de um sistema é feita conectando-se as variáveis de rede de saída (VRS) às variáveis de rede de entrada (VRE) dos blocos funcionais (Figura 38).

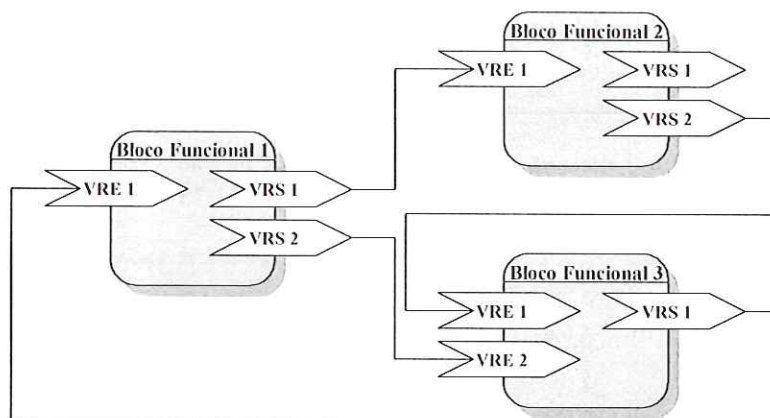


Figura 38 – Esquema das conexões entre blocos funcionais.

A Figura 39 ilustra um sistema iluminação com três nós e com os blocos funcionais que os compõem. Os blocos utilizados na figura são padronizados pela Lonmark. O sistema é composto por um sensor de ocupação, um sensor de luz, um interruptor, dois controladores e uma lâmpada dimerizável. O bloco *Occupancy Controller* é responsável por desligar a iluminação na ausência de usuários, e o bloco *Constant Light Controller* regula o fluxo luminoso da lâmpada visando manter constante a iluminância no ambiente.

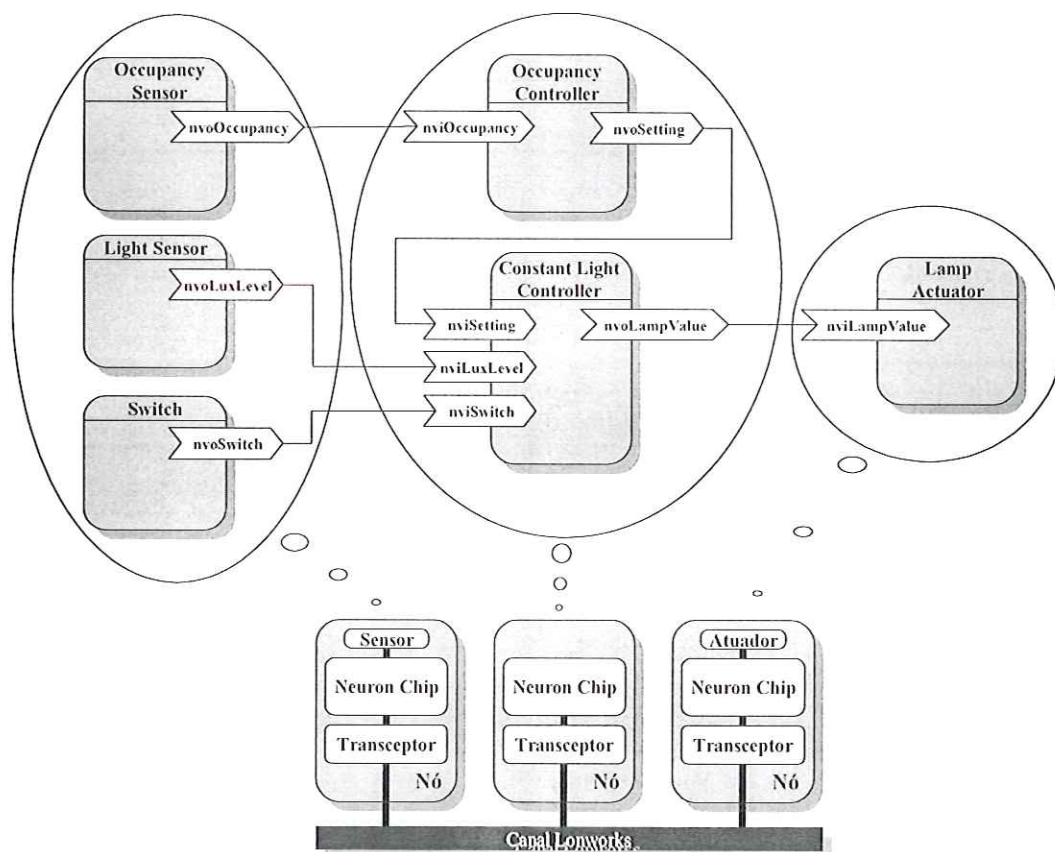


Figura 39 – Esquema de um sistema de iluminação Lonworks.

5. Um estudo de caso de um sistema de iluminação automático Lonworks

O potencial dos Sistemas de Iluminação Automáticos (SIA) em gerenciar de forma eficiente o uso da iluminação e em promover condições de conforto aos usuários é apontado por diversos autores (ATIF e GALASIU, 2003; CHOI e MISTRICK, 1999; GUILLEMIN e MOREL, 2001; LEE *et al.*, 1998; LIGHT RESEARCH CENTER, 1998; NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION, 1992; RUBINSTEIN, JENNINGS e PETTLER, 2002). No entanto, o uso desses sistemas é ainda insignificante quando comparado ao número de edificações existentes no País. É ainda raríssimo encontrar ambientes que já fazem uso dos SIA disponíveis no mercado. Mais raro ainda é encontrar SIA que utilizam um SCD (Sistema de Controle Distribuído) como plataforma tecnológica e que estão integrados aos outros sistemas prediais.

Este capítulo descreve a experiência obtida pelo Grupo de Automação Predial do Laboratório de Eletrônica Embarcada (LEE) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, na instalação, na configuração e no uso de um SIA que utiliza a tecnologia Lonworks como plataforma tecnológica. Não há um índice reconhecido que permita classificar um SIA de acordo com seu grau de automação ou de acordo com a eficiência dos seus algoritmos de controle. O SIA instalado no LEE é considerado “*top* de linha” quando comparado aos padrões oferecidos no mercado brasileiro ou encontrados nas edificações espalhadas pelo País²⁸. São descritos neste capítulo os componentes, a configuração utilizada e o funcionamento do SIA em estudo.

²⁸ Em setembro de 2004.

5.1. O SIA e seus componentes

O SIA em estudo foi instalado em uma sala de pesquisa do LEE (área aproximada de 20 m²), no início do ano de 2002. A sala, em questão, é utilizada para leitura, trabalhos em computadores, montagem de circuitos eletrônicos, reuniões e apresentações de seminários. Há seis bancadas com um computador cada e com espaço para o desenvolvimento de atividades como leitura e montagem de circuitos eletrônicos. Há também uma mesa central para reuniões, leitura e montagem de circuitos. A Figura 40 ilustra a sala que possui duas janelas voltadas para oeste que recebem sol direto durante a tarde e luz natural difusa durante as outras horas do dia. Os números (1 a 6) e a letra G colocados na figura representam os nomes dados às bancadas, também chamadas de áreas de trabalho.

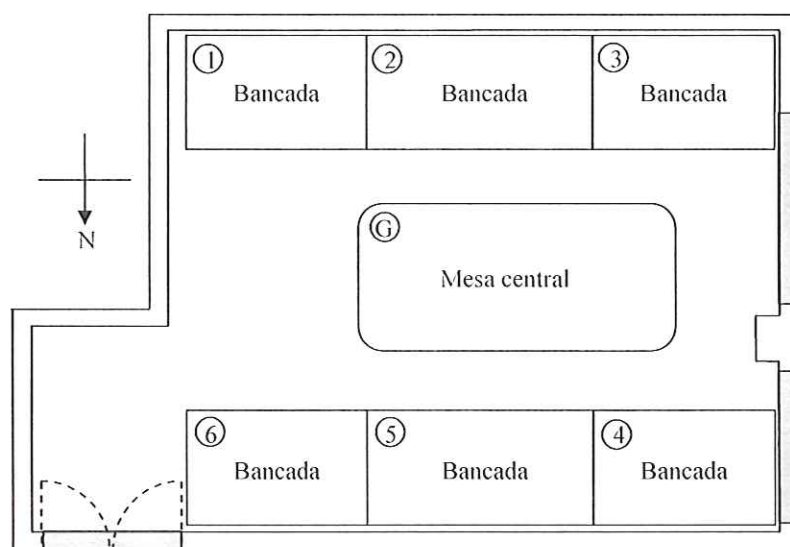


Figura 40 – Esquema da sala no LEE onde está instalado o SIA.

Como a sala é de múltiplo uso e as bancadas são utilizadas individualmente, foi decidido que a iluminação das bancadas seria individualizada e separada da iluminação geral da sala, o que totaliza sete SIA independentes. Cada SIA deveria controlar a intensidade de suas luminárias de modo a manter constante a iluminância nos planos de trabalho, assim como ser capaz de desligar as lâmpadas na ausência de usuários.

Cada SIA adquirido é composto por:

- um sensor de luz e ocupação Lonworks – Philips LRI 5133/10 (Figura 41);
- um interruptor Lonworks – desenvolvido no LEE²⁹;
- um controlador Lonworks com programação por nível de iluminação e por ocupação para cada bancada e, dois controladores do mesmo tipo para a iluminação geral. Os controladores fazem parte do dispositivo Philips LRC 5042/00 (Figura 42) que contém dois controladores de lâmpadas independentes;
- um reator eletrônico dimerizável para duas lâmpadas fluorescentes de 16 W para cada bancada e, dois reatores eletrônicos dimerizáveis para duas lâmpadas fluorescentes de 32 W para iluminação geral;
- uma luminária para duas lâmpadas fluorescentes de 16 W para cada bancada e, duas luminárias para duas lâmpadas de 32 W para iluminação geral. As luminárias são do modelo Philips TCS 312 (Figura 43); e

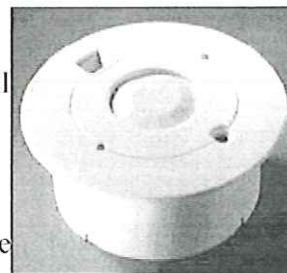


Figura 41 – LRI 5133/10

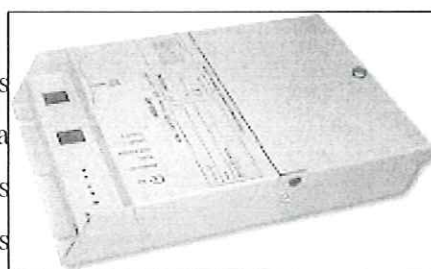
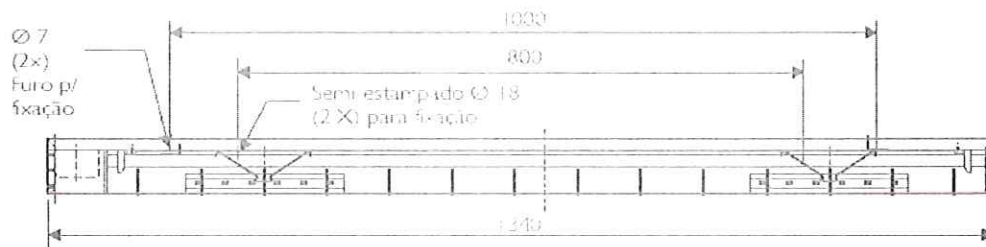


Figura 42 – LRC 5042/00



Medidas em mm

Figura 43 – Luminária Philips TCS 312 para lâmpadas de 32 W.

Dimensões da luminária para lâmpada de 32 W ou 40 W

- duas lâmpadas fluorescentes de 16 W para cada bancada e quatro lâmpadas fluorescentes de 32 W para iluminação geral.

²⁹ No Apêndice A encontra-se documentação sobre o interruptor desenvolvido no LEE.

A Figura 44 mostra a disposição na sala dos componentes citados anteriormente.

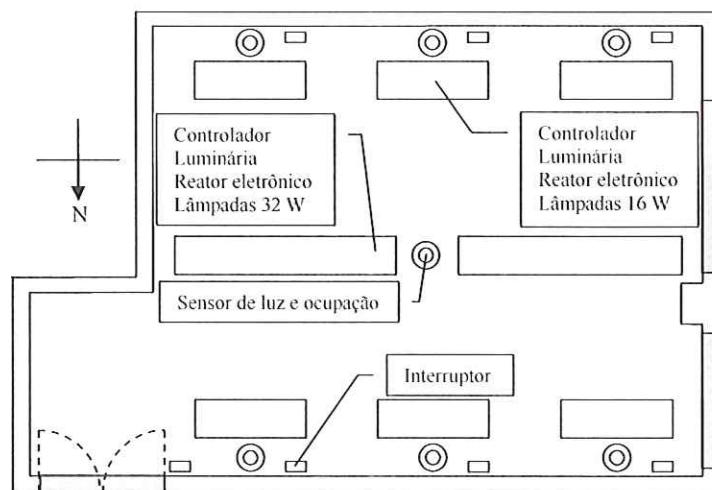


Figura 44 – Esquema da disposição dos componentes do SIA na sala

A Figura 45 ilustra a ligação entre o controlador, o reator e as lâmpadas, e entre o controlador e os outros dois componentes Lonworks do SIA. O controlador é responsável pela alimentação do reator e por enviar o sinal de dimerização que varia de 1 a 10 V (tensão contínua), correspondendo aos níveis de 10% a 100% de dimerização. Cada controlador (LRC 5042/00) controla um conjunto de dois reatores de forma independente. Cada reator é ligado a duas lâmpadas fluorescentes.

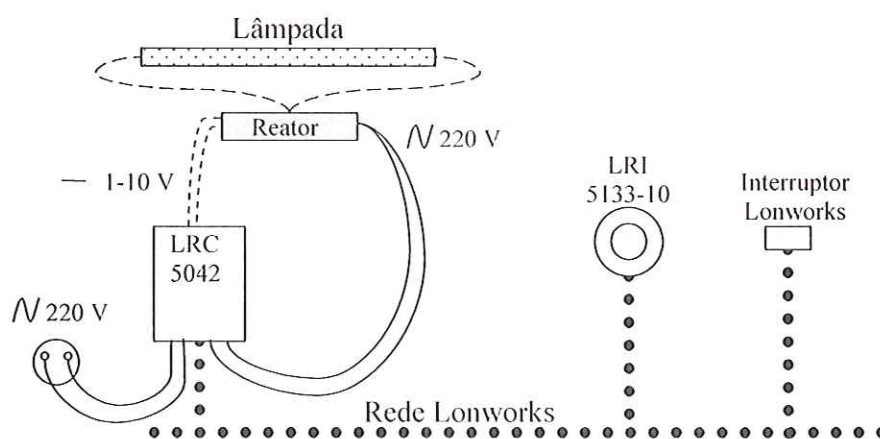


Figura 45 – Conexão física dos componentes de um SIA

Os sensores de luz e ocupação (LRI 5133/10) são alimentados pela própria rede Lonworks e instalados no teto em posição próxima à área de trabalho a qual o sensor pertence. O interruptor é alimentado por uma rede de alimentação de 5 V (tensão contínua) instalada na sala. Há somente dois nós do tipo interruptor na sala; em um deles há quatro interruptores de parede ligados e no outro há três.

5.2. Os blocos funcionais do SIA

Cada SIA é composto por três nós Lonworks: controlador de luz (Philips LRC 5042), sensor de luz e ocupação (Philips LRI 5133/10), e interruptor. Cada um desses nós possui um ou mais blocos funcionais. Os dispositivos da Philips são certificados pela Lonmark. As figuras abaixo ilustram alguns dos blocos funcionais contidos nos três nós do SIA.

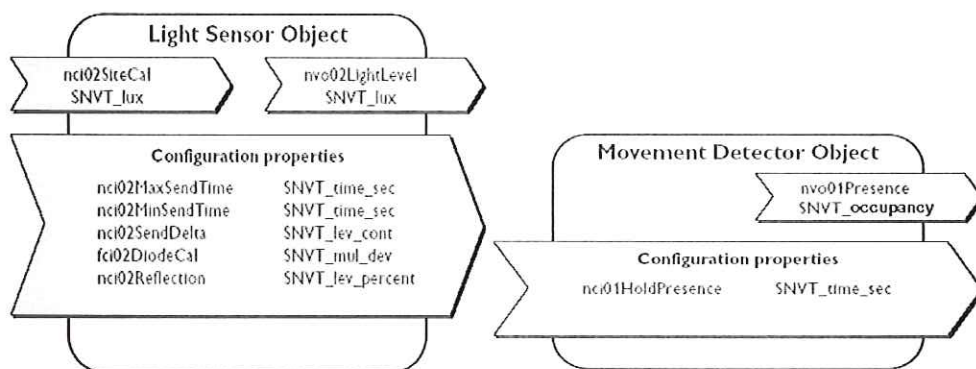


Figura 46 – Blocos funcionais do sensor de luz e ocupação (LRI 5133/10).

Na configuração dos SIA (Figura 46), são utilizados, dois blocos funcionais do sensor de luz/ocupação (Philips LRI 5133/10): *Movement Detector Object* (equivalente ao bloco funcional *Occupancy Sensor* da Lonmark) e *Light Sensor Object* (equivalente ao bloco funcional *Light Sensor* da Lonmark). O primeiro transmite à rede Lonworks, através de uma variável de rede de saída tipo *SNVT_lux*, a iluminância detectada pelo sensor. Há uma variável de rede de entrada do tipo *SNVT_lux* que permite a calibração do sensor através de um outro sensor Lonworks. O segundo transmite o estado de ocupação do ambiente (ocupado/desocupado) através da variável de rede do tipo *SNVT_occupancy*.

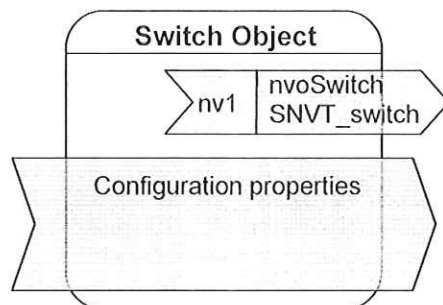


Figura 47 – Bloco funcional Switch do interruptor.

O interruptor de cada SIA é representado pelo bloco funcional *Switch Object* (equivalente ao bloco funcional *Switch* da Lonmark). Os dois módulos que contêm os

objetos tipo *Switch* foram desenvolvidos no LEE para integrarem os SIA. O Apêndice A contém a documentação destes nós. O estado do interruptor (ligado/desligado) é transmitido à rede Lonworks por uma variável de rede de saída do tipo *SNVT_switch*.

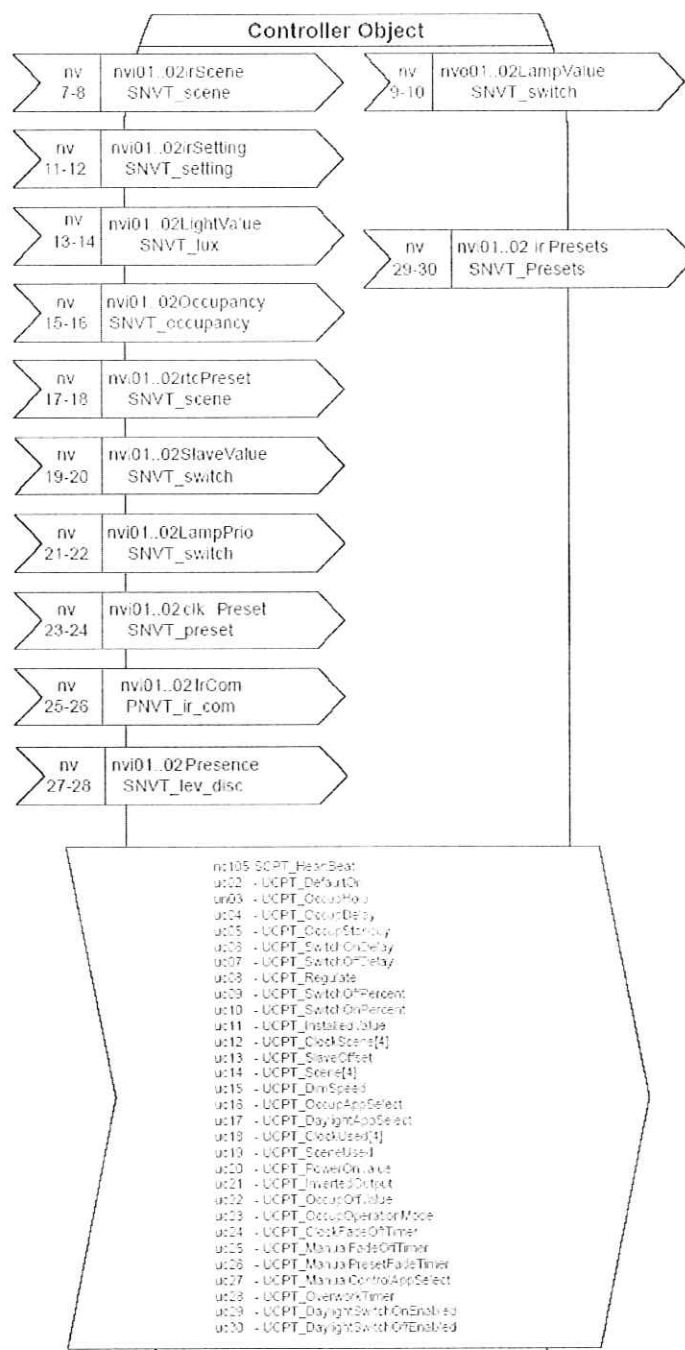


Figura 48 – Bloco funcional de controle da iluminação do controlador (LRC 5042/00).

O controle do estado (ligado/desligado) e do fluxo luminoso das lâmpadas é feito pelos blocos funcionais *Controller Object* (pertencentes ao dispositivo LRC 5042/00), que conjugam funções dos blocos funcionais *Constant Light Controller*, *Occupancy*

Controller, *Scene Controller* e *Lamp Actuator* da Lonmark. Nos SIA instalados são utilizadas apenas funções equivalentes aos blocos funcionais *Constant Light Controller*, *Occupancy Controller* e *Lamp Actuator*³⁰. O controlador permite o acionamento das lâmpadas quando recebe da rede uma variável de rede do tipo *SNVT_switch* contendo o dado “ligado” (*on*), e as desliga caso o dado enviado seja “desligado” (*off*). Após acionadas as lâmpadas, o controlador controla o fluxo luminoso das lâmpadas garantindo que a iluminância do ambiente (dado recebido através de uma variável do tipo *SNVT_lux*) permaneça igual ao setpoint configurado no controlador. Dados contendo o estado de ocupação do ambiente (ocupado/desocupado) são recebidos por uma variável de rede do tipo *SNVT_occupancy*. Quando é recebido um dado “desocupado” e as lâmpadas estão acionadas, o controlador as desliga até que seja recebido um dado “ocupado”.

³⁰ A documentação completa de cada bloco funcional Lonmark pode ser encontrada no endereço www.lonmark.org no item *Functional Profiles*.

5.3. A configuração dos blocos funcionais

A configuração da rede Lonworks foi feita através do software Lonmaker da Echelon. Os blocos funcionais citados na seção 5.2 foram interligados como indicado na Figura 49 e na Figura 50. A rede física (blocos verdes) contém os dispositivos físicos – os nós – interligados ao mesmo canal (*Channel 1*); a rede lógica contém os subsistemas (blocos com canto arredondado e cor cinza) que formam o sistema de automação predial implantado, os blocos funcionais (blocos com canto arredondado e cor cinza) existentes em cada nó e as conexões entre as variáveis de rede (blocos arredondados de cor azul correspondentes – com mesmo nome) de cada bloco funcional.

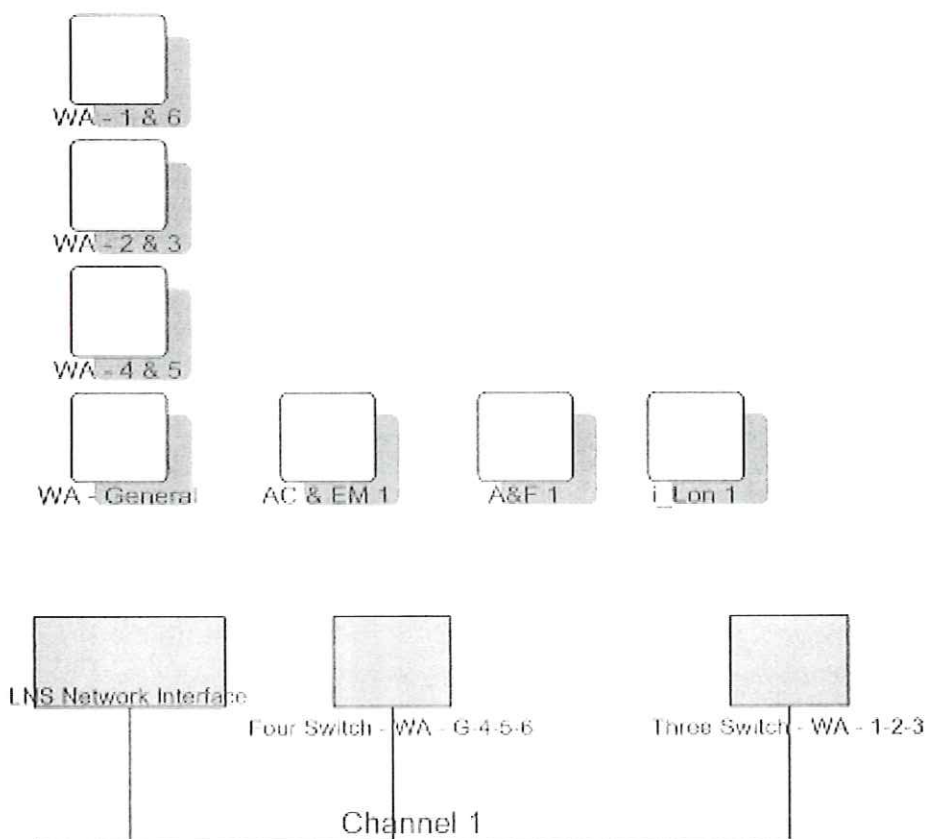


Figura 49 – Tela principal do Lonmaker contendo os subsistemas implementados no LEE e os dispositivos de interface com o computador e de uso geral (interruptores).

Na Figura 49 há três dispositivos físicos (blocos verdes) que correspondem: à interface (*LNS Network Interface*) entre a rede Lonworks e o computador onde residem os programas de instalação e configuração de redes Lonworks; e aos dois nós interruptores (*Four Switch – WA – G-4-5-6* e *Three Switch – WA – 1-2-3*) interligados aos sete interruptores de luz instalados na sala – iluminação geral (G) e das seis

bancadas (1-6), e que contêm os blocos funcionais de cada interruptor. Há também sete blocos de subsistemas (blocos com canto arredondado e cor cinza):

- *WA - 1 & 6* – subsistema de iluminação das áreas de trabalho 1 e 6, que contém os dispositivos físicos e lógicos mostrados na Figura 50;
- *WA - 2 & 3* – subsistema de iluminação das áreas de trabalho 2 e 3;
- *WA - 4 & 5* – subsistema de iluminação das áreas de trabalho 4 e 5;
- *WA - General* – subsistema de iluminação geral;
- *AC & EM 1* – subsistema de condicionamento de ar e gerenciamento de energia;
- *A & F 1* – subsistema de controle de acesso e incêndio;
- *i_Lon 1* – subsistema de acesso e monitoramento remoto via internet.

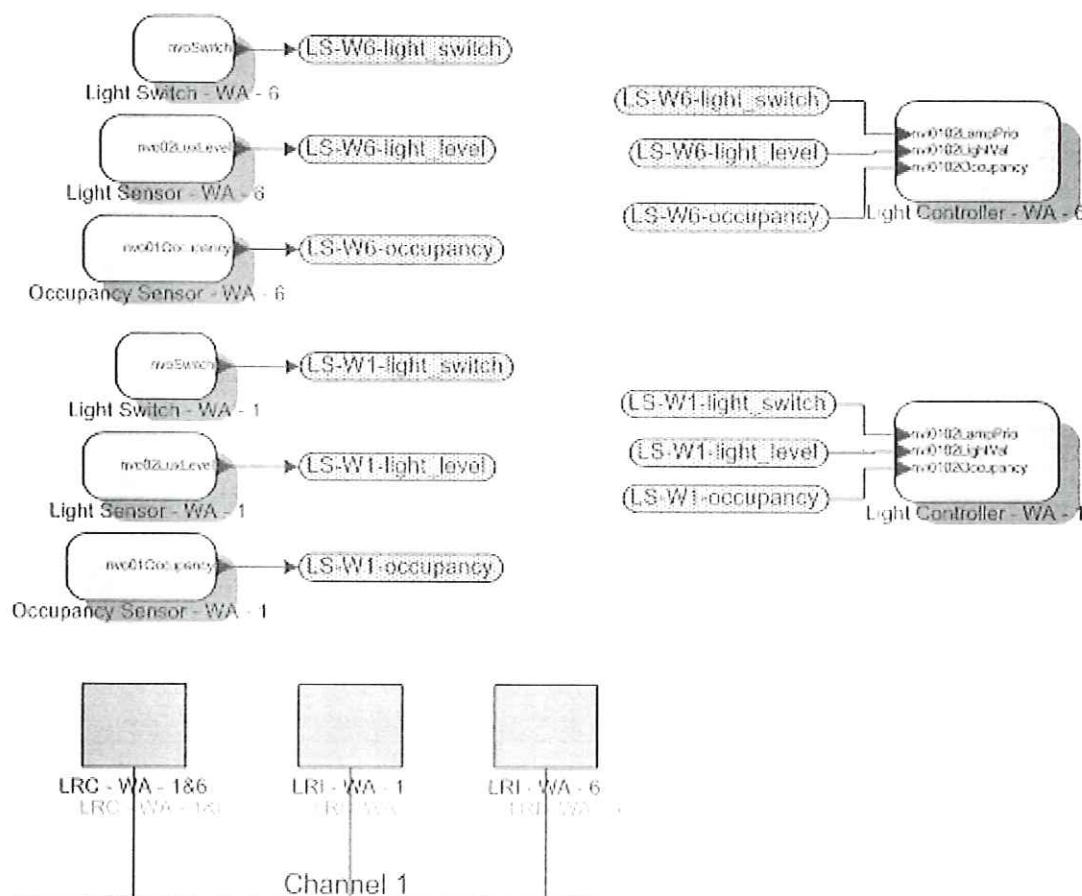


Figura 50 - *WA - 1 & 6* – subsistema de iluminação das áreas de trabalho 1 e 6.

Cada SIA ou área de trabalho (*WA - Work Área*) é composto por quatro blocos funcionais: *Light Switch*, *Light Sensor*, *Occupancy Sensor* e *Light Controller*. Estes blocos correspondem, respectivamente, aos blocos funcionais *Light Sensor Object* (LRI 5133/10), *Movement Detector Object* (LRI-5133/10), *Switch Object* (nó tipo interruptor) e *Controller Object* (Philips LRC 5042/00), citado na seção 5.2. Os blocos *Light Switch*,

Light Sensor e *Occupancy Sensor* enviam ao bloco *Light Controller* dados contendo, respectivamente, o estado do interruptor (ligado/desligado), o estado de ocupação do ambiente (ocupado/desocupado) e a iluminância do ambiente. A comunicação descrita é configurada através das conexões ilustradas na Figura 50 (blocos arredondados correspondentes de cor azul – com mesmo nome).

5.4. Funcionamento do sistema de iluminação automático

O funcionamento do sistema em estudo foi observado por dois anos (agosto/2002 a julho/2004). Foram encontrados problemas, também encontrados em bibliografia que relata o funcionamento de SIA equivalentes ao estudado (CHOI e MISTRICK, 1999; GUILLEMIN e MOREL, 2001; LIGHT RESEARCH CENTER, 1997, 1998; RUBINSTEIN, JENNINGS e PETTLER, 2002), foram encontrados:

- posicionamento correto do fotossensor. Como o sensor de luz foi instalado no teto, a relação entre a iluminância lida pelo sensor e a iluminância do plano de trabalho foi influenciada pela hora do dia e por diferentes configurações de pessoas e mobiliário na sala. Observou-se algumas vezes instabilidade (oscilações) do SIA no por do sol, horário em que entrava luz solar direta na sala. Parâmetros de configuração do SIA foram ajustados procurando contornar este problema, mas limitações nos parâmetros disponíveis para ajuste não permitiram sua eliminação. A documentação dos produtos não apresentava informações sobre a solução deste tipo de problema;
- desligamento de lâmpadas por desocupação. O sensor de ocupação é baseado na tecnologia do infravermelho passivo, quando usuários da sala se mantinham em posições quase sem movimentar-se era detectada “desocupação”. A sensibilidade do sensor usado era fixa. Foi aumentado o tempo de retardo buscando diminuir a incidência deste problema. No entanto, o aumento do tempo de retardo também retarda o desligamento das lâmpadas quando há ausência de usuários provando consumo de energia desnecessário; e
- oscilação da intensidade no acionamento das lâmpadas: verificou-se que o controlador (Philips LRC 5042/00) variava a intensidade das lâmpadas oscilatoriamente no acionamento das lâmpadas por um período de até dois minutos. Foram modificados alguns parâmetros de configuração do controlador, mas o problema não foi resolvido. Uma das hipóteses levantadas para a ocorrência deste problema foi o super dimensionamento da potência das lâmpadas para o nível de iluminância utilizado (em torno de 350 lux). As lâmpadas são ligadas inicialmente na potência máxima, como neste estado a iluminância fica muito superior ao setpoint utilizado, o erro inicial é grande e a correção também é grande, o que diminui a intensidade das lâmpadas para um nível muito menor que a desejada, e

acarreta correções altas que provocam a oscilação do sistema. Há também um retardo de resposta do sensor que colabora para que esta oscilação ocorra por um tempo maior. Variações bruscas na iluminância do ambiente provocavam o mesmo problema.

Excetuadas as situações acima relatadas, os usuários se referiram de maneira positiva quanto ao funcionamento e comportamento do sistema instalado. Foi observado também um melhor uso da iluminação com a instalação dos SIA:

- a iluminação concentrou-se nos locais onde era necessária (iluminação individualizada por área de trabalho);
- o fluxo luminoso das lâmpadas foi mantido em níveis menores sempre mantendo constante o nível de iluminância, o que diminui o consumo com energia elétrica;
- a iluminação era desligada sempre quando a sala ficava desocupada, reduzindo o consumo de energia elétrica. Era comum se observar, antes da instalação do sistema, lâmpadas deixadas acesas durante o horário de almoço, em saídas de rotina durante o expediente, etc.; e
- cada usuário passou a controlar grupos de luminárias individualmente, o que aumentou o controle do usuário sobre o sistema.

Foram levantados dados sobre o funcionamento do sistema instalado, como a distribuição de iluminâncias na sala e a relação entre a porcentagem de dimerização comandada e a porcentagem de iluminância/potência consumida. Estes dados se encontram no Apêndice B.

6. Análise dos blocos funcionais da tecnologia Lonworks para sistemas de iluminação automáticos e aplicações em automação predial

O surgimento dos **Sistemas de Controle Distribuído (SCD)** abertos permitiu a integração, de maneira simples, de dispositivos de automação predial de diferentes fabricantes e entre diferentes sistemas prediais (iluminação, HVAC, controle de acesso, etc.). O grande potencial da integração de sistemas tem sido explorado em sistemas já baseados em tecnologias de SCD abertas. São indiscutíveis os avanços obtidos nos sistemas de automação predial após a utilização de tecnologias de SCD. No entanto, o nível de integração entre sistemas ainda é modesto perto da potencialidade de integração de sistemas que o uso de tecnologias de SCD permite.

A grande maioria das tecnologias de SCD utiliza estruturas lógicas baseadas em **blocos funcionais**, que desempenham papel fundamental na integração de sistemas. Os blocos funcionais são as estruturas lógicas básicas de um SCD. Cada bloco funcional desempenha determinada função e se comunica com os demais através da sua interface de comunicação. A tecnologia Lonworks, assim como diversas outras tecnologias de SCD, utiliza os blocos funcionais como unidade lógica básica³¹. Os blocos funcionais Lonworks têm suas interfaces externas definidas e padronizadas pela Lonmark.

A capacidade de comunicação de um bloco funcional com os outros blocos está intimamente relacionada com sua interface externa. Ela define quais tipos de dados um bloco pode trocar com outros, e qual função este dado desempenha no algoritmo do bloco funcional. A tarefa de definir a interface externa e a funcionalidade de uma classe de blocos funcionais é feita vislumbrando-se as possíveis aplicações do bloco. No entanto, não é possível prever todas as possibilidades de comunicação e de integração

³¹ A descrição dos blocos funcionais Lonworks foi feita na seção 4.3.3.

de um bloco funcional, principalmente quando este bloco desempenha papel de controle. Pesquisas na área de automação predial e de conforto em ambientes construídos vêm apontando, a cada dia, para novas possibilidades de controle e automação nas edificações. Para que novos algoritmos de controle possam ser integrados aos já existentes, é necessário que a interface de comunicação e o algoritmo de funcionamento dos blocos funcionais sejam projetados de modo a garantir a conexão deste com novos blocos funcionais.

No caso estudado, há integração entre sistemas. Um único sensor de ocupação foi utilizado no SIA estudado, no controle do condicionamento de ar, no sistema de incêndio e no sistema de controle de acesso. Este é o tipo mais comum de integração encontrada nos sistemas de automação predial atuais: o uso de um mesmo elemento de sensoriamento por diversos sistemas prediais.

Foram encontradas também algumas limitações no SIA estudado. O bloco funcional responsável pelo controle da iluminação (Figura 48 da seção 5.2), por exemplo, não possui uma porta de comunicação de entrada que permita que o setpoint de iluminância seja alterado por um outro bloco funcional. Este só pode ser configurado por uma ferramenta de instalação, o que restringe as possibilidades de integração e expansão do sistema que utiliza este bloco. O acesso a esse parâmetro de importância vital ao tipo controle desempenhado deveria estar disponível para alteração por outros blocos, o que possibilitaria que outros algoritmos de controle pudessem trabalhar em cascata com este bloco funcional. Um bloco funcional, por exemplo, onde o usuário ajusta, através do computador, o setpoint de iluminância não pôde ser conectado ao SIA.

A integração de blocos funcionais com funcionalidades novas é bastante restrita, principalmente os que desempenham funções de controle. Os blocos existentes no mercado e os padronizados pela Lonmark possuem portas de comunicação somente para aplicações/funções já consagradas. A inclusão de novas funções aos sistemas existentes no mercado ainda são bastante restritas. É necessário que a estrutura de blocos funcionais existentes seja remodelada para que seja possível a integração de novos blocos de forma simples, inclusive os com funções não previstas durante o projeto do bloco. A Figura 51 mostra um esquema de interconexão entre blocos funcionais da área de iluminação definidos pela Lonmark.

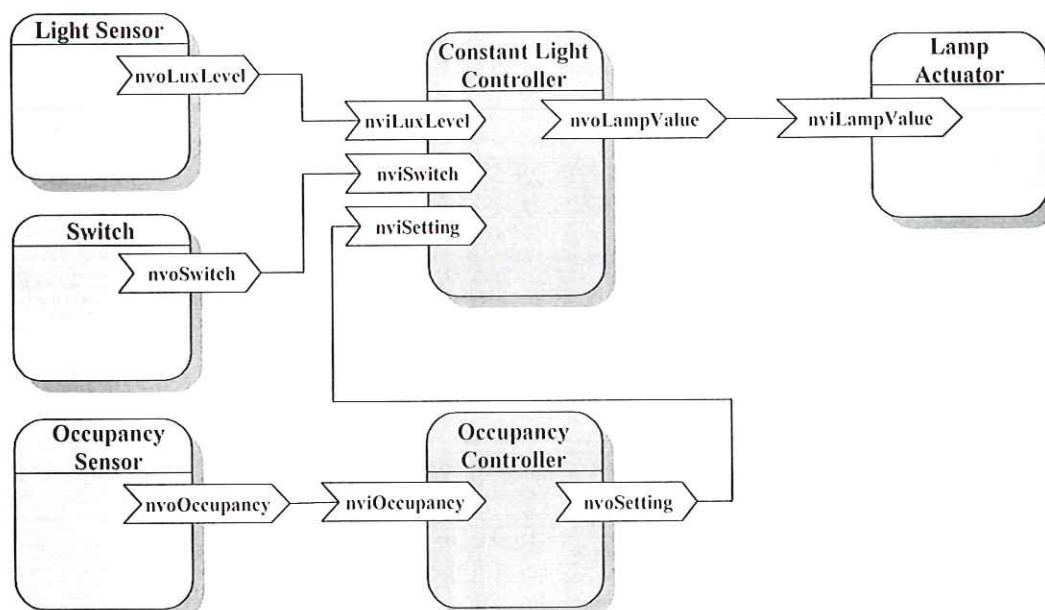


Figura 51 – Sugestão de interconexão entre blocos funcionais da Lonmark para a área de iluminação.

A conexão de novos blocos funcionais aos já existentes e padronizados é extremamente custosa: não há portas de entrada que permita a conexão de novos blocos funcionais aos já existentes, o que restringe a inclusão de novas funcionalidades ao sistema. O Quadro 5, exemplifica alguns algoritmos de controle (funcionalidades) que podem ser implementados em um SIA. Os três primeiros algoritmos do quadro já possuem blocos funcionais equivalentes, padronizados pela Lonmark e com uso consagrados em SIA. Os demais algoritmos não possuem blocos funcionais padronizados pela Lonmark, e a conexão destes com os blocos já padronizados da Lonmark não pode ser feita de maneira simples. No SIA estudado, o bloco funcional responsável pelo controle de iluminação englobava funções dos três primeiros algoritmos do quadro. No entanto, blocos que utilizem qualquer um dos demais algoritmos do quadro **não** podem ser acoplados ao SIA de forma simples.

Cabe ainda ressaltar as aplicações promissoras para SIA como algoritmos baseados na fotometria do ciclo circadiano, e o uso de atuadores tipo vidros electrocrômicos, cortinas/venezinas automáticas e aparatos de redirecionamento solar. A integração destes com os atuais SIA deve acontecer sem a necessidade de reformulação dos SIA já existentes. No entanto, é difícil imaginar o acoplamento de blocos funcionais que desempenhem os papéis descritos no início deste parágrafo com os blocos funcionais existentes, atualmente, nas tecnologias de SCD utilizadas em automação predial.

Quadro 5 – Exemplos de algoritmos de controle para SIA.

Algoritmo de controle	Finalidade
Iluminância Constante	Manter constante o nível de iluminância no ambiente.
Controle Manual da Iluminação	Permitir o controle manual do fluxo luminoso das lâmpadas.
Ocupação para Iluminação	Desligar iluminação na ausência de usuários.
Gerente Energético para Iluminação	Diminuir o fluxo luminoso das lâmpadas para poupar energia em momentos críticos.
Iluminação para Incêndio	Ajustar o fluxo luminoso das lâmpadas para auxiliar fugas em incêndios.
Iluminação para Segurança	Não permitir que a iluminação seja acionada por usuários não autorizados.
Programação Horária para Iluminação	Não permitir que a iluminação seja acionada em horários não autorizados.
Manutenção de Lâmpadas	Verificar o fluxo luminoso das lâmpadas, informar suas vidas úteis e a necessidade de troca.

Além de novas funcionalidades esperadas para os futuros SIA, novas abordagens para sistemas prediais têm sido estudadas por pesquisadores de todo o mundo. Entre elas se destaca o uso de sistemas multi-agentes e sistemas baseados em comportamentos (CAYCI, CALLAGHAN e CLARKE, 2001; COEN, 1997; DAVIDSSON e BOMAN, 1998; HAGRAS *et al.*, 2003; KULKARNI, 2002; SHARPLES, CALLAGHAN e CLARKE, 1999). Um agente é uma unidade lógica básica muito similar a um objeto³², mas que possui autonomia de decidir a forma como atuar de acordo com sua percepção do meio. Em um sistema multi-agentes, as unidades lógicas básicas são os agentes. Os sistemas baseados em comportamentos são projetados como um conjunto de comportamentos. A complexidade destes sistemas é obtida juntando-se os diversos comportamentos esperados para o sistema. Essa abordagem foi proposta originalmente por Brooks (1985, 1987), no final da década de 1980, para a área de robótica móvel. O autor obteve grande sucesso com o uso desta abordagem na área de robótica móvel.

A inclusão de novos paradigmas, como o de sistemas multi-agentes e sistemas baseados em comportamentos, às tecnologias de SCD aplicadas à automação predial e à estrutura de blocos funcionais, é de vital importância para a evolução dos SCD atualmente existentes. O grande sucesso obtido por Brooks em sistemas robóticos e os resultados positivos obtidos com o uso de sistemas multi-agentes em automação predial são indícios de que a reestruturação dos blocos funcionais deverá trazer grandes

³² Conceito descrito na seção 4.2.1.

benefícios à automação predial. Estes novos paradigmas que são colocados à automação predial, quando implementados através de um SCD conduzirão a sistemas mais modulares, mais flexíveis e mais interoperáveis que os atuais.

7. Conclusões

Pesquisas na área de automação predial têm demonstrado o enorme potencial desta área do conhecimento no aumento do conforto e da eficiência energética em ambientes construídos. Dentro do enorme campo que abrange a automação predial se inserem as pesquisas em sistemas de controle distribuídos (SCD) com aplicação em automação predial. Os SCD têm mudado a forma como os sistemas de automação predial funcionam e como são implantados nas edificações.

Tanto a automação predial como os SCD têm uma história relativamente nova. Há cinquenta anos atrás estas linhas de pesquisas eram incipientes. Há aproximadamente uma década começaram a surgir publicações em número considerável sobre estas áreas. No entanto, ainda são poucos os pesquisadores que pesquisam e publicam em temas relacionados a SCD e a automação predial.

Há ainda um longo percurso a ser percorrido até que os sistemas de controle e automação predial sejam mais difundidos e funcionem de maneira integrada e eficiente. Este longo percurso englobará desde a utilização de conceitos de eficiência energética (uso racional dos recursos naturais – luz natural, ventos, etc.) e de conforto ambiental nos projetos arquitetônicos; passará pelo uso de equipamentos mais eficientes (lâmpadas eficientes, máquinas para condicionamento de ar com alto rendimento, etc); e abordará pontos que hoje não são habituais para os profissionais envolvidos com o projeto e execução de edificações como, por exemplo, a estrutura de comunicação entre os diversos dispositivos que compõem uma edificação, as redes de sensoriamento que permitirão o monitoramento e retrofit contínuos de cada edificação, etc.

Dentro deste contexto os SCD e os SIA desempenham importante papel. A iluminação, intimamente relacionada com o sentido da visão (sentido que responde por cerca de 70% da percepção humana), é também um dos sistemas prediais que mais

consomem energia elétrica em uma edificação. A automação da iluminação conduz ao uso mais eficiente deste sistema, à melhoria do conforto visual e ao aumento do controle dos usuários sobre o sistema de iluminação. Um SCD é uma plataforma tecnológica que permite que os dispositivos de um mesmo ou de diferentes sistemas prediais se comuniquem, aumentando a sinergia da edificação e a funcionalidade do sistema como um todo.

Há uma enorme distância entre o que é publicado nos principais periódicos na área de automação predial e de sistemas de iluminação automáticos, e o que é implantado nas edificações no Brasil e no mundo. É raríssimo encontrar-se SIA como o estudado. Apesar de ser considerado “top de linha”, o SIA estudado ainda não incorpora a grande maioria dos avanços descritos em bibliografia relacionada a área de iluminação e de SCD.

Durante a etapa de revisão bibliográfica foi observada uma lacuna grande entre pesquisas desenvolvidas em diversos setores da automação predial. São desenvolvidas pesquisas que apontam a importância do ciclo circadiano na iluminação, pesquisas que apontam falhas na maneira como os sensores de iluminância são instalados nos SIA e o conseqüente erro de leitura dos sensores (relação iluminância no local de instalação do sensor e no plano de trabalho), pesquisas que demonstram o grande potencial no uso de vidros eletrocromicos e cortinas/venezinas automáticas nos SIA, pesquisas que utilizam abordagens orientadas a comportamentos e baseadas em sistemas multi-agentes, etc. No entanto o uso de todas estas abordagens, em conjunto, ainda é praticamente nulo. Parece que a interação entre os diversos profissionais que são responsáveis pelas inúmeras áreas que envolvem a automação predial é ainda incipiente.

É dentro deste contexto que se insere essa dissertação de mestrado. Nos capítulos 2, 3 e 4, buscou-se levantar o estado da arte em áreas de conhecimento relacionadas aos SIA. Foram constatadas inúmeras linhas de pesquisas em cada um dos assuntos abordados nestes três capítulos. O capítulo 5 fez uma descrição do SIA estudado. No capítulo 6, foi feita uma análise das restrições encontradas nas estruturas funcionais dos SCD que dificultam a inserção de novas funcionalidades nos SCD. Algumas dessas funcionalidades foram apontadas nos capítulos 2, 3 e 4.

Como fruto deste trabalho, da constatação de que a estrutura lógica dos SCD existentes não contribui para a inserção de novas funcionalidades no sistema e de que pesquisas em outras áreas de conhecimentos têm conseguido resolver este tipo de problema de maneira elegante, a seguinte tese para um trabalho de doutorado fica proposta:

“A decomposição por comportamentos simples (agentes de Minsky) somada a implementação em redes (sistemas) de controle distribuído conduz a uma arquitetura não tradicional para os sistemas de automação predial, com estratégias de projeto e de implementação diferentes, e com vantagens em relação a modularidade, a flexibilidade e a interoperabilidade”.

A tese proposta visa, num trabalho futuro, modificar a estrutura dos blocos funcionais utilizados nos SCD, tornando a inserção de novas funcionalidades em SCD predial mais simples.

Referências bibliográficas

- ARAÚJO, J. J. **Análise do estado da arte dos modelos objetos utilizados em sistemas de automação predial.** Trabalho individual II, Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre, 2003.
- ARAÚJO, J. J. **Protocolos de comunicação para sistemas de automação predial.** Trabalho individual I, Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre, 2002.
- ARKIN, H.; PACIUK, M. **Evaluating intelligent buildings according to level of service system integration.** Automation in Construction, v. 6, p. 471-479, 1997.
- ASSAF, L. O.; PEREIRA, F. O. R. **Perspectivas de la eficiencia energética em la iluminación: desafíos para el desarrollo.** ENCAC – COTEDI 2003, p. 26-42, Curitiba, PR, Brasil, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO (ABILUX). **Iluminação – Uso racional de energia elétrica em edificação.** Publicação da Abilux em parceria com o Procel e a Eletrobrás, São Paulo, 1992.
- ATIF, M. R.; GALASIU, A. D. **Energy performance of daylight-linked automatic lighting control systems in large atrium spaces: report on two field-monitored case studies.** Energy and Buildings, v. 35, p. 441-461, 2003.
- BODART, M.; DE HERDE, A. **Global energy savings in offices buildings by the use of daylight.** Energy and Buildings, v. 34, p. 421-429, 2002.
- BOMAN, M. *et al.* **Energy saving and added customer value in intelligent buildings.** Third International Conference on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM'98), p. 505-517, 1998.
- BRENTON, P. **Metaglug: A programming language for multi-agent systems.** M. Eng. Thesis for MIT, Cambridge, MA, EUA, 1999.

- BROOKS, R. A. **A robot that walks; emergent behaviors from a carefully evolved network.** MIT AI Lab Memo no. 1091, february, 1989.
- BROOKS, R. A. **A robust layered control system for mobile robot.** MIT AI Lab Memo no. 864, september, 1985.
- BROOKS, R. A. **Intelligence without representation.** Preprints of the Workshop in Foundations of Artificial Intelligence, Endicott House, Dedham, june, 1987.
- BROOKS, R. A. **The intelligent room project.** Proceedings of the Second International Cognitive Technology Conference (CT97), Aizu, Japan, august, 1997.
- CALLAGHAN, V.; *et al.* **Building as intelligent autonomous systems: a model for integrating personal and buildings agents.** IAS-6, The 6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems, july, 2000.
- CALLAGHAN, V.; *et al.* **The cognitive disappearance of computer: intelligent artefacts and embedded agents.** i3 2001, workshop WS4 on Cognitive Versus Physical Disappearance, Porto, Portugal, april, 2001.
- CAYCI, F.; CALLAGHAN, V.; CLARKE, G. **A Distributed Intelligent Building Agent Language (DIBAL).** 6th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis (ISAS 2000), Orlando, Florida, EUA, july, 2001.
- CHOI, A. S.; MISTRICK, R. G. **Analysis of daylight responsive dimming system performance.** Building and Environment, v. 34, p. 231-243, 1999.
- COEN, M. H. **Building brains for rooms: designing distributed software agents.** 9th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence (IAAI'99), Providence, RI, EUA, 1997.
- COEN, M. H. **Design principles for intelligent environments.** 15th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'98), Madison, WI, EUA, p. 547-554, 1998.
- COLEMAN, D.; *et al.* **Desenvolvimento orientado a objetos – o método Fusion.** Editora Campus, Rio de Janeiro, 1996.

- COLLEY; *et al.* **Intelligent inhabited environments: cooperative robotics & buildings.** 32nd International Symposium on Robotics (ISR 2001), Seoul, Korea, abril, 2001.
- COSTA, G. J. C. **Iluminação econômica: cálculo e avaliação.** 2. ed., Porto Alegre: EDIPUCRS, 503 p., 2000.
- DARSCHT, P.; FRIGERI, A. H.; PEREIRA, C. E. **Building up object-oriented industrial automation systems: experiences interfacing active objects with technical plants.** Proceedings of 1995 IEEE International Workshop on Factory Communications Systems, p. 53-61, october, 1995.
- DAVIDSSON, P.; BOMAN, M. **Energy saving and value added services: controlling intelligent buildings using a multi-agent systems approach.** DA/DSM Europe DistribuTECH, PennWell, 1998.
- DEREK, T.; CLEMENTS-CROOME, J. **What do you mean by intelligent buildings?** Automation in Construction, v. 6, p. 395-400, 1997.
- DIBARTOLOMEO, D. L.; *et al.* **Developing a dynamic envelope/lighting control system with field measurements.** Journal of Illuminating Engineering Society, v. 26, p. 146-164, 1996.
- DOUNIS, A. I.; MANOLAKIS, D. E. **Design of a fuzzy system for living space thermal-comfort regulation.** Applied Energy, v. 69, p. 119-144, 2001.
- DUTRA, L.; *et al.* **Eficiência energética na arquitetura.** Compact Disc, Trace Disc Multimídia Ltda, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- ECHELON. **Enhanced media access control with Lontalk protocol.** Lonworks Engineering Bulletin, january, 1995.
- ECHELON. **Introduction to the Lonworks system.** Version 1.0, 1999.
- ECHELON. **Lontalk protocol.** Lonworks Engineering Bulletin, april, 1993.
- FENTON, N. E.; PFLEEGER, S. L. **Software metrics – A rigorous and Practical Approach.** 2^a edição, PWS Publishing Company, Boston, 1997.
- FIGUEIRO, M. G.; *et al.* **Daylight and productivity – A possible link to circadian regulation.** Light and Human Health: EPRI/LRO 5th International. Lighting Research Symposium, p. 185-193, Palo Alto, CA, 2002.

- GARG, V.; BANSAL, N. K. **Smart occupancy sensors to reduce energy consumption.** *Energy and Buildings*, v. 32, p. 81-87, 2000.
- GRAHAM CONTROLS. **Lonworks – A short history and technological overview.** Disponível em <http://www.grahamcontrols.com/LWOverview.htm>, acesso em 20 jul. 2004.
- GUILLEMIN, A.; MOLTENI, S. **An energy-efficient controller for shading devices self-adapting to the user wishes.** *Building and Environment*, v. 37, p. 1091-1097, 2002.
- GUILLEMIN, A.; MOREL, N. **An innovative lighting controller integrated in self-adaptive building control system.** *Energy and Buildings*, v. 33, p. 477-487, 2001.
- GUILLEMIN, A.; MOREL, N. **Experimental results of self-adaptive integrated control system in buildings: a pilot study.** *Solar Energy*, v. 72, p. 397-403, 2002.
- HAGRAS, H.; *et al.* **A hierarchical fuzzy-genetic multi-agent architecture for intelligent buildings online learning, adaptation and control.** *The International Journal of Information Sciences*, v. 150, p. 33-57, 2003.
- HAGRAS, H; *et al.* **A fuzzy incremental synchronous learning technique for embedded agents learning and control in intelligent inhabited environments.** IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), maio, 2002.
- HELVAR MERCA LIMITED. **DIGIDIM lighting control system – System Manual.** Kent, United Kingdom, 2000.
- JAGUSZTYN, T. **Air conditioning systems in the context of intelligent buildings.** In *High Technology Buildings International Conference*. São Paulo, 1995.
- JDÁNOV, L. S.; JDÁNOV, G. L. **Física para o ensino técnico especializado.** Editora Mir Moscovo, 1985.
- JONES, W. P. **Engenharia de ar condicionado.** Editora Campus, Rio de Janeiro, 1983.
- KAMEAS, A. **An architecture that treats everyday objects as communicating tangible components.** *Proceedings of First International Conference on Pervasive and Communications (PerCom'03)*, 2003.

- KLASEEN, E. L.; SYDIR, J. J. **The definition of interoperability architectures for intelligent devices using abstract models.** Proceedings of 1995 IEEE International Workshop on Factory Communications Systems, p. 237-245, october, 1995.
- KOLOKOTSA, D.; *et al.* **Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings' occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction.** Energy and Buildings, v. 33, p. 531-543, 2001.
- KOLOKOTSA, D.; *et al.* **Genetic algorithms optimized fuzzy controller for the indoor environmental management in buildings implemented using PLC and local operating networks.** Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 15, p. 417-428, 2002.
- KOLOKOTSA, D.; *et al.* **Interconnecting smart card system with PLC controller in a local operating networking to form a distributed energy management system for buildings.** Energy Conversion and Management, v. 43, p. 119-134, 2002.
- KRC, J.; *et al.* **Three-state regulator for electrochromic windows.** Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 71, p. 387-395, 2002.
- KRZYSZTOF, G. **A knowledge based resource management system for the intelligent room.** M. Eng. Thesis for MIT, Cambridge, MA, EUA, 2000.
- KULKARNI, A. **A reactive behavioral system for the intelligent room.** M. Eng. Thesis for MIT, Cambridge, MA, EUA, 2002.
- LAMPERT, C. M. **Smart switchable glazing for solar energy and daylight control.** Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 52, p. 207-221, 1998.
- LEE, D.; *et al.* **PID control for a distributed system with smart actuator.** Control Engineering Practice, v. 9, p. 1235-1244, 2001.
- LEE, E. S.; DIBARTOLOMEO, D. L.; SELKOWITZ, S. E. **Electrochromic window tests in U.S. office show promise.** EETD Newsletter, Spring 2000, disponível em <http://eetd.lbl.gov/btp>, acesso em 15 jan. 2004.
- LEE, E. S.; DIBARTOLOMEO, D. L.; SELKOWITZ, S. E. **Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and light system in an full-scale private office.** Energy and buildings, v. 29, p. 47-63, 1998.

- LEE, E. S.; *et al.* **Integrated performance of automated venetian blind/electric lighting system in a full-scale private office.** Proceedings of the ASHRAE/DOE/BTECC Conference, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII, Clearwater Beach, Florida, December 7-11, 1998.
- LEWIS, R. **Design of distributed control systems in the next millennium.** Computing & Control Engineering Journal, v. 8, p. 148-152, august, 1997.
- LI, D. H. W.; LAM, J. C. **An investigation of daylighting performance and energy saving in daylight corridor.** Energy and Buildings, v. 35, p. 365-373, 2003.
- LIGHT RESEARCH CENTER. **Illumination Fundamentals.** Publicação didática do Light Research Center patrocinada pela Optical Research Associates, 2000.
- LIGHT RESEARCH CENTER. **Interoperable systems: The future of lighting control.** Disponível em: <http://www.lrc.edu/>, acesso em: 15 mar. 2004a.
- LIGHT RESEARCH CENTER. **Light answers: controlling lighting with building automation systems.** National Lighting Product Information Program, disponível em: <http://www.lrc.rpi.edu/>, acesso em: 15 mar. 2004b.
- LIGHT RESEARCH CENTER. **Light, Sight and Photobiology.** Disponível em <http://www.lrc.rpi.edu/programs/Futures/LF-Photobiology/index.asp>, acesso em 15 mar. 2004c.
- LIGHT RESEARCH CENTER. **Occupancy Sensors.** National Lighting Product Information Program – Specifier Reports, v. 5, n. 1, may, 1997.
- LIGHT RESEARCH CENTER. **Photosensors.** National Lighting Product Information Program – Specifier Reports, v. 6, n. 1, mar, 1998.
- LIGHT RESEARCH CENTER. **Self-Commissioning Photosensor – Tutorial.** Disponível em <http://www.lrc.rpi.edu/>, acesso em 15 mar. 2004d.
- LONMARK. **Lonmark application-layer interoperability guidelines.** Version 3.3, october, 2002a.
- LONMARK. **Lonmark layer 1-6 interoperability guidelines.** Version 3.3, october, 2002b.
- LONMARK. **Lonmark SNVT master list.** Version 12, june, 2003.

- MAES, P.; BROOKS, R. A. **Learning to coordinate behaviors**. AAAI, p. 796-802, Boston, MA, EUA, 1990.
- MAFFEZONI, C.; FERRARINI, L.; CARPANZANO, E. **Object-oriented models for advanced automation engineering**. Control Engineering Practice, v. 7, p. 957-968, 1999.
- MAHALIK, N. G. P. C.; LEE, S. K. **Design and development of system level software tool for DCS simulation**. Advances in Engineering Software, v. 34, p. 451-465, 2003.
- MANICCIA, D.; *et al.* **The effects of changing occupancy sensor timeout setting on energy savings, lamp cycling, and maintenance costs**. Light Research Center, IES Paper#42, USA, 2000.
- MARTE, C. L. **Estudo e análise das unidades funcionais remotas no controle distribuído em processos de automação predial**. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- MARTIN, J. L. **Sistema digital de controle distribuído, com arquitetura aberta para o controle e otimização dos sistemas de ar condicionado predial**. Revista Intech Brasil (ISA Show Brasil 99), São Paulo, setembro de 1999.
- MARTIN, J.; ODELL, J. J. **Análise e projeto orientados a objeto**. Editora Makron Books, São Paulo, 1995.
- MATHEWS, E. H.; *et al.* **HVAC control strategies to enhance comfort and minimise energy use**. Energy and Buildings, v. 33, p. 853-863, 2001.
- MINSKY, M. **The Society of Mind**. Simon & Schuster Inc., Nova Iorque, NY, 1988.
- MOZER, M. C. **The neural network house: an environment that adapts to its inhabitants**. Proceedings of the American Association for Artificial Intelligence Spring Symposium on Intelligent Environments, p. 110-114, Menlo Park, CA, EUA, 1998.
- NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Demand reduction and energy savings using occupancy sensors**. NEMA Lighting Systems Division Document, Rosslyn, VA, USA, 2001.

- NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. **NEMA Guide to Lighting Controls**. Rosslyn, VA, USA, 1992.
- NATIONAL LIGHTING BUREAU. **Office lighting productivity**. Rosslyn, VA, USA, 1988.
- NATIONAL LIGHTING BUREAU. **Performing a lighting system audit**. Rosslyn, VA, USA.
- NATIONAL LIGHTING BUREAU. **Profiting from lighting modernization**. Rosslyn, VA, USA, 1987.
- NEUFERT, E. **Arte de projetar em arquitetura**. Tradução da 21^a edição alemã, Editora Gustavo Gili do Brasil, 1965.
- OSRAM. **Manual Luminotécnico Prático**. Publicação eletrônica da Osram.
- PEREIRA, C. E.; *et al.* **On evaluating interaction and communication schemes for automation applications base don real-time distributed objects**. Proceedings of Fourth IEEE International Symposium on Object-oriented real-time distributed computing, p. 217-224, may, 2001.
- PINTO, J. R. **Utilização racional de energia elétrica em instalações elétricas comerciais empregando sistemas de automação**. Dissertação de mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- PRESSMAN, R. S. **Software engineering – A practitioner’s approach**. 5^a edição, McGraw-Hill, 2001.
- REA, M. S. **Light – Much more than vision. Light and Human Health**. EPRI/LRO 5th International Lighting Research Symposium, p. 1-15, Palo Alto, CA, 2002.
- REYES, A. **The integration of wireless, wired access and embedded agents in intelligent buildings**. SCI 2001, The 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Orlando, Florida, EUA, julho, 2001.
- RIEDL, M.; *et al.* **Examinations on a component based approach for distributed control systems**. 2003 International Symposium on Industrial Electronics, v. 2, p. 9-11, june, 2003.

- RUBINSTEIN, F.; JENNINGS, J.; PETTLER, P. **Dimming every light cheaply.** Proceedings of 2002 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, August, 2002.
- RUTISHAUSER, U.; *et al.* **Intelligent buildings – A multi-agent approach.** Workshop Embodied Artificial Intelligence 2002 - special issue on the design principles, Zurich, Switzerland, 2002.
- RUTISHAUSER, U; *et al.* **Adaptive building automation – A multi-agent approach.** Projeto de pesquisa, Departamento de Ciência da Computação da Universidade Ciências Aplicadas de Rapperswil e Instituto de Neuroinformática da Universidade de Zurique, 55 p., julho, 2002.
- SACK, R. L.; LEWY, A. J. **Circadian rhythm sleep disorders: lessons from the blind (Clinical Review).** Sleep Medicine Reviews, v. 5, n. 3, p. 189-206, 2001.
- SCHILER, M.; JAPEE, S. **Interior illuminance, daylight controls and occupant response.** Vital signs curriculum materials project, University of Southern California, Los Angeles.
- SCHICKHUBER, G.; MCCARTHY, O. **Distributed fieldbus and control networks systems.** Computing & Control Engineering Journal, fevereiro, 1997.
- SEUS OLHOS. Disponível em <http://atlas.ucpel.tche.br/~nicolau/anato.htm>, acesso em 7 set. 2004.
- SHARPLES, S.; CALLAGHAN, V.; CLARKE, G. **A multi-agent architecture for intelligent building sensing and control.** International Sensor Review Journal, v. 19. n. 2, may, 1999.
- SLEEPER, H. R. **Building Planning and Design Standards.** John Wiley & Sons, Estados Unidos, 1955.
- SOARES, L. F. G.; LEMOS, G.; COLCHER, S. **Redes de computadores: das LANs, MANs e WANs às Redes ATM.** 6ª edição revista e ampliada, Editora Campus, Rio de Janeiro, 1995.
- STEELS, L.; BROOKS, R. A. **The Artificial Life Route to Artificial Intelligence: Building Embodied Situated Agents.** Lawrence Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, 1995.

- THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERING (CIBSE). **CIBSE Code for interior lighting 1994 – Additions and corrections: 1997**. London, 1997.
- THOMESSE, J. P. **Fieldbuses and interoperability**. Control Engineering Practice, v. 7, p. 81-94, 1999.
- TIAN, G. Y.; ZHAO, Z. X.; BAINES, R. W. **A fieldbus-based intelligent sensor**. Mechatronics, v. 10, p. 835-849, 2000.
- TOSHIBA. Neuron chip data book.
- UNITED STATES CONGRESS, Office of Technology Assessment. **Biological Rhythms: Implications for the Worker**. OTA-BA-463, Government Printing Office, Washington, DC, U.S., september, 1991.
- VIANNA, N. S.; GONÇALVES, J. C. S. **Iluminação e arquitetura**. Virtus s/c Ltda, São Paulo, SP, 378 p., 2001.
- VINE, E.; *et al.* **Office worker response to an automated venetian blind and electric lighting system: a pilot study**. Energy and Buildings, v. 28, p. 205-218, 1998.
- VONNEIDA, B.; MANICCIA, D.; TWEED, A. **An analysis of energy and costs savings potential of occupancy sensors for commercial light systems**. Light Research Center, IES Paper#43, USA, 2000.
- WANG, G.; UNGAR, L.; KLAWITTER, D. **Component assembly for OO distributed systems**. Computer, v. 32, issue 7, p. 71-78, july, 1999.
- WONG, A. C. W.; SO, A. T. P. **Building automation in the 21st century**. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power Systems Control, Operation and Management. ASPCOM-97, Hong-Kong, november, 1997.
- YOMURA, M. C. **Automação predial e residencial: comparação de padrões e implementação de um sistema para estudo**. Dissertação de mestrado do CEFET-PR, Curitiba, 1998.

Apêndice A – Documentação do Switch

O nó Switch foi desenvolvido no Laboratório de Eletrônica Embarcada pelo candidato a título de mestre e autor desta dissertação. Em cada nó, podem ser conectados até 7 interruptores nas portas de IO0 a IO6 do Neuron Chip. Foram desenvolvidos sete blocos funcionais, um para cada interruptor, do mesmo tipo que o bloco funcional Switch da Lonmark.

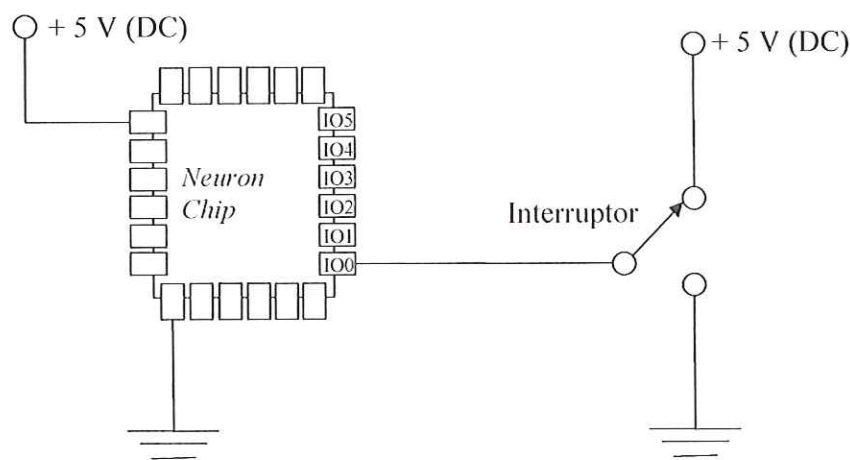


Figura 52 – Esquema da ligação do interruptor com o Neuron Chip.

Segue abaixo a listagem dos programas (Switch.h e Switch.nc) em Neuron C que geram o bloco funcional Swicth.

Listagem do programa Switch1.h

```

//{{NodeBuilder Code Wizard Start <CodeWizard Timestamp>
// Run on Mon Feb 03 09:42:25 2003, version 3.00.52
//
//}}NodeBuilder Code Wizard End
////////////////////////////////////////////////////////////////
// File: switch1.h
//
// Generated by NodeBuilder Code Wizard Version 3.00.52
// Copyright © 2001 Echelon Corporation. All rights reserved.
//
// ECHELON MAKES NO REPRESENTATION, WARRANTY, OR CONDITION OF
// ANY KIND, EXPRESS, IMPLIED, STATUTORY, OR OTHERWISE OR IN
// ANY COMMUNICATION WITH YOU, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO,
// ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, SATISFACTORY
// QUALITY, FITNESS FOR ANY PARTICULAR PURPOSE,
// NONINFRINGEMENT, AND THEIR EQUIVALENTS.
///
// Written By: Álvaro M. Bigonha Tibiriçá
//
//Description:
// Bloco funcional correspondente a um conjunto de
// sete perfis funcionais SWITCH da Lonmark
////////////////////////////////////////////////////////////////

#ifndef _switch1_H_
#define _switch1_H_

#include "common.h"

//{{NodeBuilder Code Wizard Start
// The NodeBuilder Code Wizard will add and remove code here.
// DO NOT EDIT the NodeBuilder Code Wizard generated code in these blocks
// between {NodeBuilder Code Wizard Start and }NodeBuilder Code Wizard End

<Include Enum Type Headers>
//
<Forward FBDirector>
extern void switch1Director(unsigned uFblockIndex, int nCommand);
//
<Forward NVProcessor>
//
<Fblock CP Family Declarations>
//
<Fblock Input NV Declarations>
//
<Fblock Output NV Declarations>
network output SNVT_switch nvoSwitch[switch1_FBLOCK_COUNT];
//
<Fblock Declaration>
fblock SFPTswitch {
    nvoSwitch[0] implements nvoSwitch;
    director switch1Director;
} switch1[switch1_FBLOCK_COUNT]
#ifdef USE_EXTERNAL_NAME
external_name("switch1")
#endif
;

```

```
    //}}NodeBuilder Code Wizard End

extern const SNVT_obj_status switch1ReportMask;

/** IO Declaration **

IO_0 input bit ioswitch0;
IO_1 input bit ioswitch1;
IO_2 input bit ioswitch2;
IO_3 input bit ioswitch3;
IO_4 input bit ioswitch4;
IO_5 input bit ioswitch5;
IO_6 input bit ioswitch6;

//*****

int auxcount;

#endif // _switch1_H_
```


Listagem do programa Switch1.nc

```

//{{NodeBuilder Code Wizard Start <CodeWizard Timestamp>
// Run on Mon Feb 03 09:42:25 2003, version 3.00.52
//
//}}NodeBuilder Code Wizard End

////////////////////////////////////
// File: switch1.nc
//
//
// Generated by NodeBuilder Code Wizard Version 3.00.52
// Copyright © 2001 Echelon Corporation. All rights reserved.
//
// ECHELON MAKES NO REPRESENTATION, WARRANTY, OR CONDITION OF
// ANY KIND, EXPRESS, IMPLIED, STATUTORY, OR OTHERWISE OR IN
// ANY COMMUNICATION WITH YOU, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO,
// ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, SATISFACTORY
// QUALITY, FITNESS FOR ANY PARTICULAR PURPOSE,
// NONINFRINGEMENT, AND THEIR EQUIVALENTS.
////
// Written By: Álvaro M. Bigonha Tibiriçá
//
//Description:
// Bloco funcional correspondente a um conjunto de
// sete perfis funcionais SWITCH da Lonmark
////////////////////////////////////

#ifdef _switch1_NC_
#define _switch1_NC_

#include "common.h"
#include "switch1.h"

//{{NodeBuilder Code Wizard Start
// The NodeBuilder Code Wizard will add and remove code here.
// DO NOT EDIT the NodeBuilder Code Wizard generated code in these blocks
// between {{NodeBuilder Code Wizard Start and }}NodeBuilder Code Wizard End

//<Input NV>
//
//<Input NV Define>
#ifdef _HAS_INP_NV_1
//
//<Fblock NV When>
//
//}}NodeBuilder Code Wizard End
{
    if (fblockNormalNotLockedOut(fblock_index_map[nv_in_index])) {
        updateDeviceState(nv_in_index, nv_array_index, fblock_index_map[nv_in_index]);
        switch1processNV();
    }
}

```

```

void switchIprocessNV(void)
{
    // TODO: Add code to handle input network variable processing
    // Use the TDeviceState structure to find out which NV was updated.
}

#endif    // _HAS_INPUT_NV_

void switchIDirector(unsigned uFblockIndex, int iCommand)
{
    SNVT_obj_status *pStatus;
    pStatus = getObjStatus(uFblockIndex); // point to current status

    pStatus->invalid_id = FALSE;
    pStatus->invalid_request = FALSE;

    if((TFblock_command)iCommand == FBC_INITIALIZE_FB) {
        // TODO: Add code for supported commands.
    } else if((TFblock_command)iCommand == FBC_WHEN_OFFLINE) {
        // TODO: Add code for supported commands.
    } else if((TFblock_command)iCommand == FBC_WHEN_ONLINE) {
        // TODO: Add code for supported commands.
    } else if((TFblock_command)iCommand == FBC_UPDATE_STATUS) {
        // TODO: Add code for supported commands.
    } else if((TFblock_command)iCommand == FBC_WHEN_RESET) {
        setLockedOutBit(uFblockIndex, FALSE);
    } else if((TFblock_command)iCommand == FBC_DISABLED) {
        setFblockDisable(uFblockIndex, TRUE);
    } else if((TFblock_command)iCommand == FBC_ENABLE) {
        setFblockDisable(uFblockIndex, FALSE);
    } else if((TFblock_command)iCommand == FBC_OVERRIDE) {
        setFblockOverride(uFblockIndex, TRUE);
    } else if((TFblock_command)iCommand == FBC_RMV_OVERRIDE) {
        setFblockOverride(uFblockIndex, FALSE);
    } else if((TFblock_command)iCommand == RQ_REPORT_MASK) {
        NBCW_NODE_STATUS = switchIReportMask;
    } else if((TFblock_command)iCommand == FBC_SEND_HEARTBEAT_TIMER) {
        // TODO: Add code for supported commands.
    } else {
        // unsupported requests must still be replied to:
        pStatus->invalid_request = TRUE;
    }
}

```

```

const SNVT_obj_status switch1ReportMask = {
    0,      // Object ID
    0,      // invalid_id
    0,      // invalid_request
    1,      // disabled
    0,      // out_of_limits
    0,      // open_circuit
    0,      // out_of_service
    0,      // mechanical_fault
    0,      // feedback_failure
    0,      // over_range
    0,      // under_range
    0,      // electrical_fault
    0,      // unable_to_measure
    1,      // comm_failure
    0,      // fail_self_test
    0,      // self_test_in_progress
    1,      // locked_out
    0,      // manual_control
    0,      // in_alarm
    1,      // in_override
    1,      // report_mask
    0,      // reserved1
    0,      // reserved2
};

/** WHEN Clauses **

when (io_changes(ioswitch0))
{
    auxcount=0;

    switch1[auxcount]::nvoSwitch.state= (!input_value);
}

when (io_changes(ioswitch1))
{
    auxcount=1;

    switch1[auxcount]::nvoSwitch.state= (!input_value);
}

when (io_changes(ioswitch2))
{
    auxcount=2;

    switch1[auxcount]::nvoSwitch.state= (!input_value);
}

when (io_changes(ioswitch3))
{
    auxcount=3;

    switch1[auxcount]::nvoSwitch.state= (!input_value);
}

```

```
when (io_changes(ioswitch4))
{
    auxcount=4;

    switch1[auxcount]::nvoSwitch.state= (!input_value);
}

when (io_changes(ioswitch5))
{
    auxcount=5;

    switch1[auxcount]::nvoSwitch.state= (!input_value);
}

when (io_changes(ioswitch6))
{
    auxcount=6;

    switch1[auxcount]::nvoSwitch.state= (!input_value);
}

//*****

#endif// _switch1_NC_
```


Apêndice B – Dados levantados

Durante o trabalho, foram levantados dados sobre o sistema de iluminação automático (SIA) estudado.

Distribuição de iluminâncias na sala

Foi levantada a curva de iluminâncias de cada grupo de luminárias da sala. As medições foram feitas durante a noite, sem a interferência de nenhuma fonte de luz externa, a 75 ± 10 cm do chão, espaçadas em 20 ± 2 cm de acordo com a malha quadriculada nas curvas apresentadas abaixo (Figura 54 a Figura 57). As luminárias da sala estão representadas nas curvas por retângulos semitransparentes. Os retângulos mais escuros correspondem, em cada curva, à luminária para qual o levantamento foi feito.

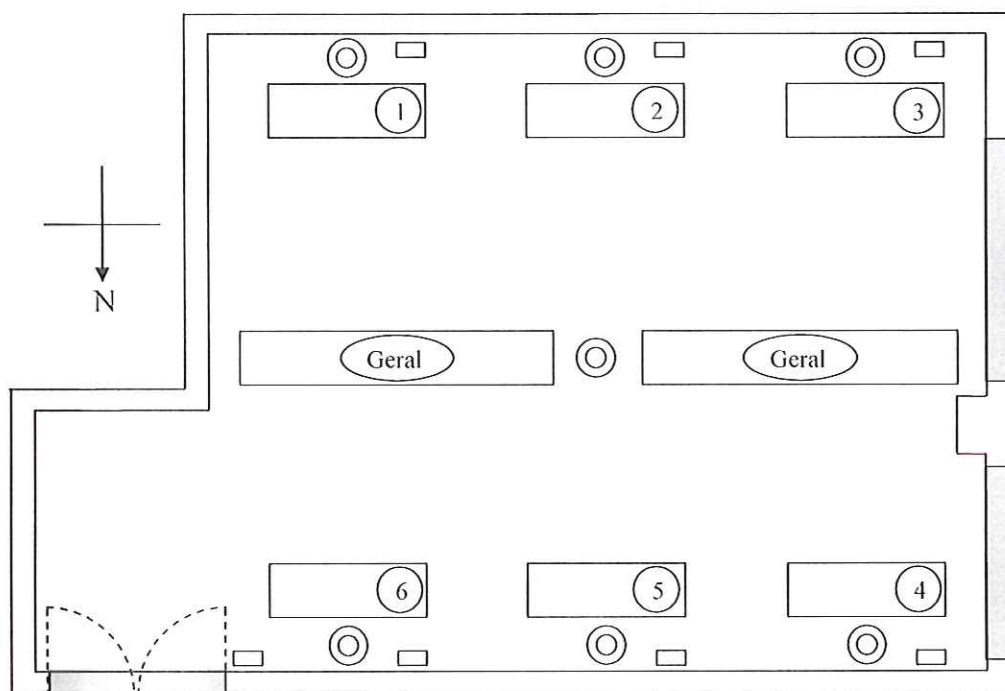


Figura 53 – Localização e nome das luminárias.

A Figura 53 mostra a localização das luminárias na sala. Foram levantadas somente as curvas de iluminância das luminárias Geral, 1, 2 e 3. A distribuição de iluminâncias da luminária 6 (simétrica à luminária 1) é similar à apresentada na Figura 55. O mesmo ocorre com as luminárias 5 e 4 (similares respectivamente às luminárias 2 e 3) na Figura 56 e na Figura 57.



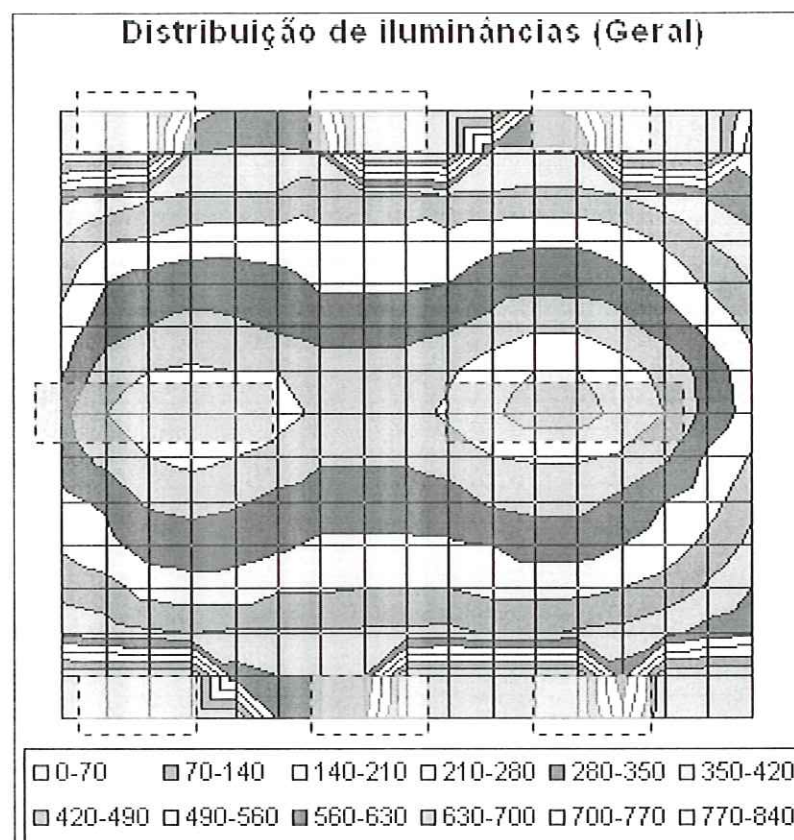


Figura 54 – Distribuição de iluminâncias das luminárias da iluminação geral (em lux).

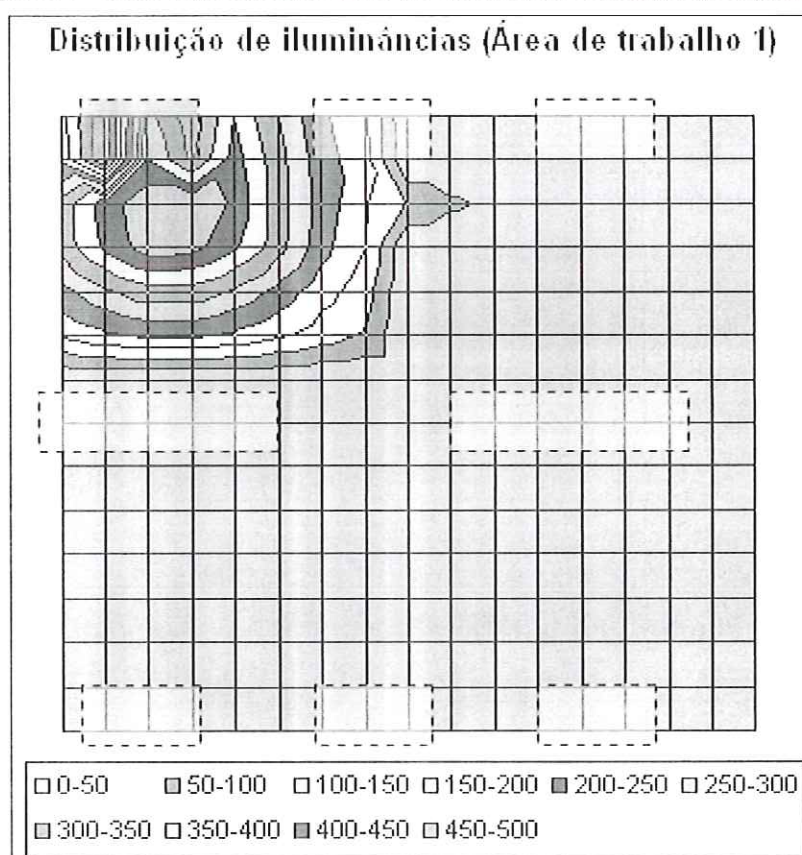


Figura 55 – Distribuição de iluminâncias das luminárias da área de trabalho I (em lux).

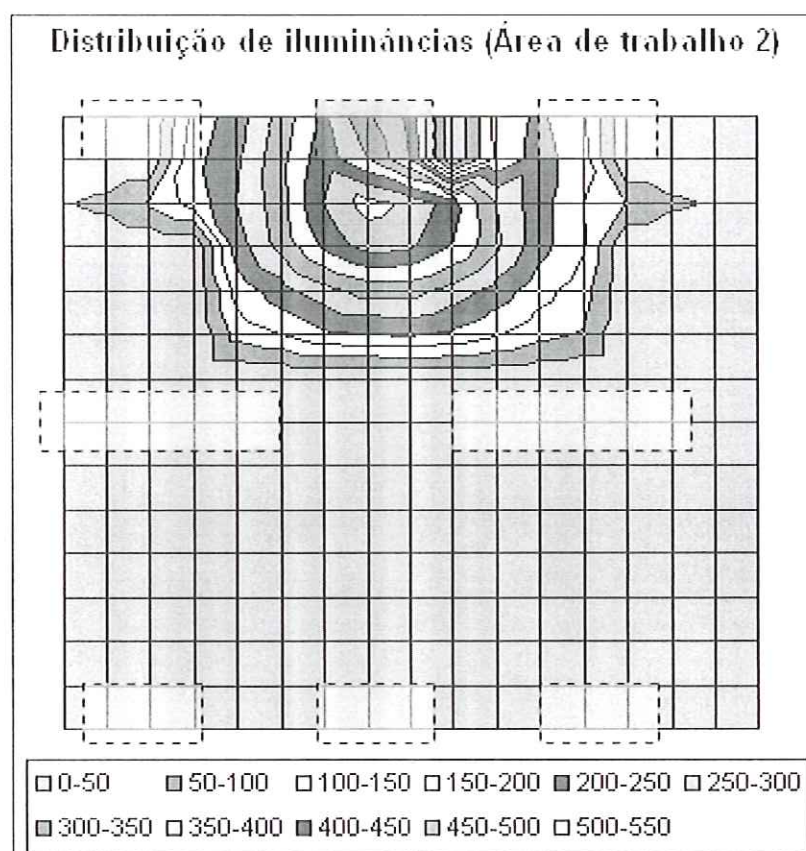


Figura 56 – Distribuição de iluminâncias das luminárias da área de trabalho 2 (em lux).

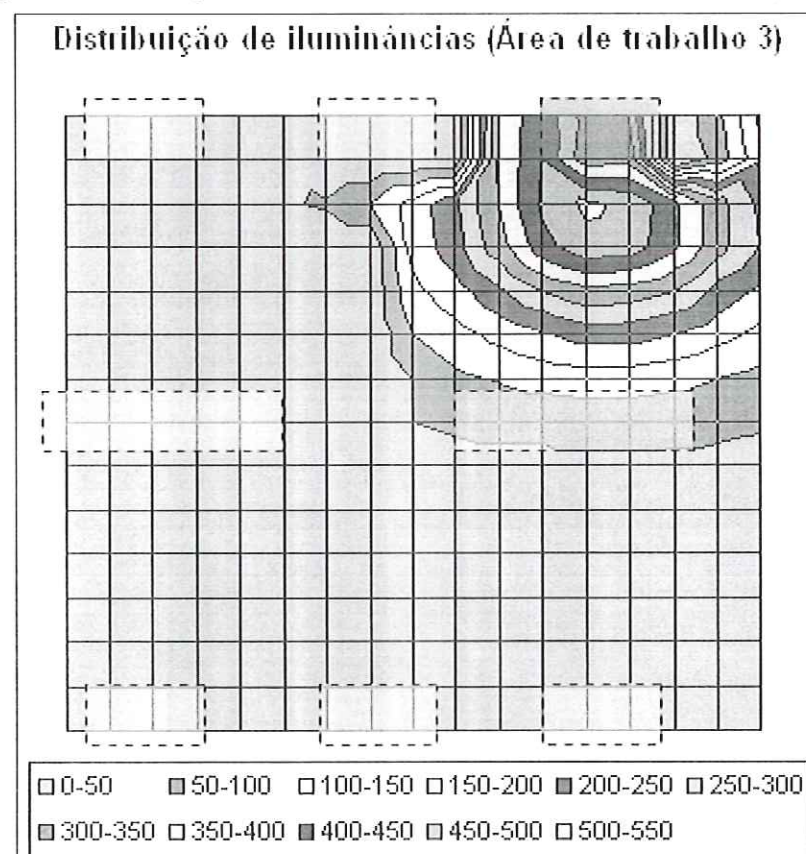


Figura 57 – Distribuição de iluminâncias das luminárias da área de trabalho 3 (em lux).

Relação entre comando e atuação

Foi verificado que a relação entre o comando de dimerização das lâmpadas, e a iluminância/potência das lâmpadas não tem relação 1:1. Resultado já esperado e relatado em bibliografia afim (CHOI, 1999). As curvas abaixo mostram a relação entre o comando de dimerização dado (em porcentagem), e a resposta das lâmpadas em porcentagem de iluminância medida e em porcentagem de potência consumida. Para cada conjunto de dados há duas regressões lineares, uma delas passa pelo obrigatoriamente pelo ponto (0,0).

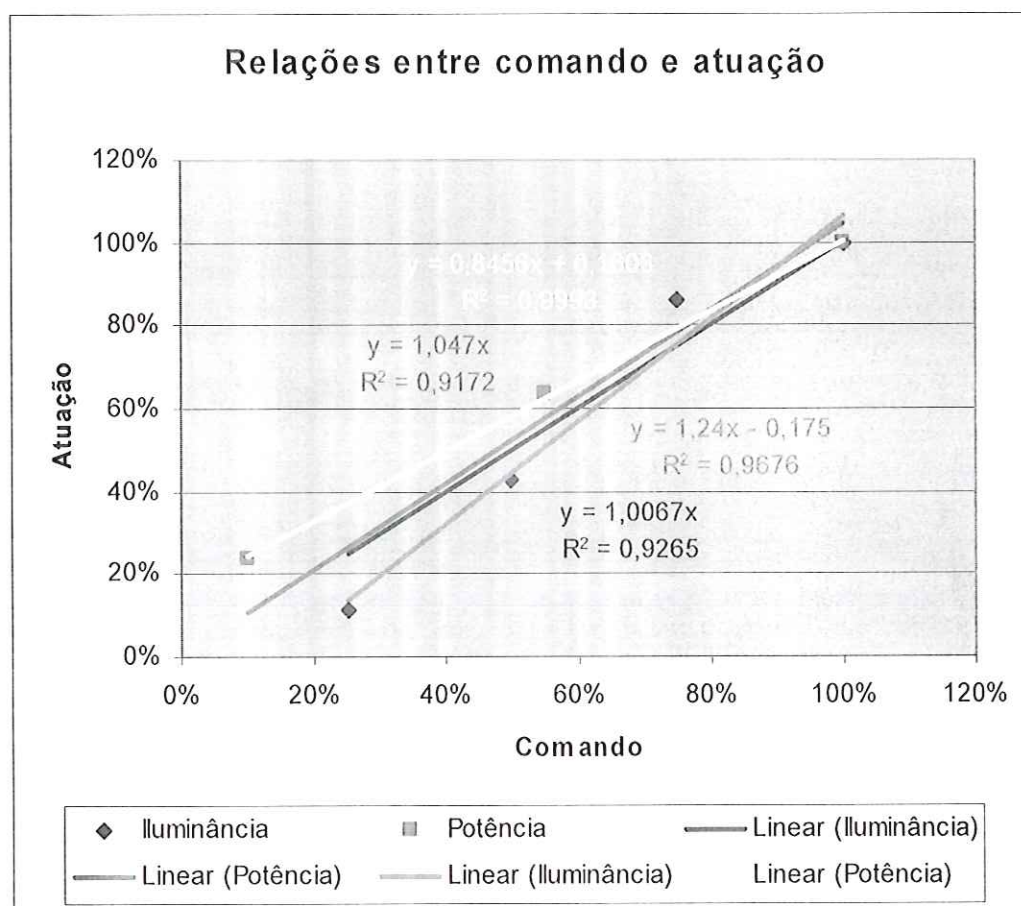


Figura 58 – Relação entre o valor de comando e o valor real da iluminância e da potência das lâmpadas.

Foi verificado também que a potência consumida pelo sistema de iluminação é em torno de 30% maior que a soma das potências das lâmpadas do sistema. Esse acréscimo de consumo se deve principalmente ao reator eletrônico.

Trafego na rede Lonworks

Foi medido o tráfego médio de pacotes na rede Lonworks. A rede Lonworks do LEE possui no mesmo canal sete SIA, um sistema de condicionamento de ar (aparelho de ar-condicionado, sensor de ocupação e sensor de temperatura ambiente), um sistema de controle de acesso (painel de acesso, sensor de ocupação, contatos secos em portas/janelas, fechadura elétrica e sirene), um sistema de incêndio (sensor de fumaça e sirene) e um roteador para internet interligado logicamente a todos os nós da rede. O número de nós na rede é de 16 e o de blocos funcionais interligados chega a 30. Para esta configuração no canal de 78 kilobits/segundo, os seguintes dados foram obtidos:

Quadro 6 – Trafego na rede Lonworks do LEE.

Número de pacotes por hora	40.000
Largura média de banda utilizada	4%
Taxa de erro de transmissão média	0,0894%
Tamanho médio dos pacotes	12 bytes

Índice

A	
absortância	10
atuadores	25
B	
bastonetes	14
blocos funcionais.....	61, 75
brilho	18
C	
candela	17
ciclo circadiano	
distribuição espacial da luz	24
duração	24
espectro	23
horário	24
quantidade de luz.....	22
circadiano	
ciclo.....	20
ritmo.....	20
cones	14
contraste	19
controladores.....	25
cores	14
cortinas automáticas	36
curva	
de sensibilidade escotópica	15
de sensibilidade fotópica	15, 26
E	
efeito Vavilov-Tcherenkov	12
eficiência luminosa.....	16
espectro eletromagnético.....	8
espectro visível.....	8
exitância	10
exitância luminosa.....	17
F	
<i>flicker</i>	33
fluxo luminoso	16
fluxo radiante	9
fontes	
fluorescentes.....	12
fosforescentes.....	12
incandescentes.....	12
fotocélula.....	26
fotorreceptores.....	26
fotossensores.....	26
I	
iluminância	16
incandescência.....	12
integração	
dos sistemas de controle prediais e a estrutura predial	43
entre os sistemas de controle prediais.....	43
intensidade luminosa	17
intensidade radiante	10
interruptores.....	30
irradiância	9
L	
lâmpadas	32
de descarga	32
depreciação dos lumens	34
eficiência luminosa	34
fluorescentes	32, 33
fluxo luminoso.....	34
incandescentes	32, 33
potência de consumo.....	34
propriedades relacionadas à cor.....	34
vida nominal	34
lonmark.....	59
Lontalk	
canal.....	55
variável de rede.....	57
Lontalk.....	54
Lontalk	
roteadores.....	56
Lontalk	
predictive p-persistent CSMA	56
lúmen	16
luminância	18
luminárias	35
curva de distribuição luminosa	35
rendimento	35
luminescência	12
lux	16
luz	
difusa	11
direta	11

M	
medidores de energia elétrica.....	31
modelo OSI	48
N	
neuron chip.....	58
nó.....	46
O	
ofuscamento	18
de desabilitação	19
de desconforto	19
orientação objeto	
classe	51
instância	51
métodos	51
orientação objeto	50
dados	51
P	
programação	
por consumo energético	39
por horário	39
por nível de iluminância.....	40
por ocupação	39
por posicionamento solar	40
protocolo de comunicação.....	46
R	
radiância.....	10
radiometria	9
refletância.....	10
reflexão	
difusa.....	11
especular.....	11
mista	11
relação	
de Einstein	8
de iluminâncias	27
S	
sensores.....	25
de consumo energético	31, 39
de luz	26, 40
posicionamento	26
de movimento	28
área de cobertura.....	29
campo de visão	29
detector piroelétrico	28
duais.....	29
híbridos	29
padrão de cobertura.....	29
retardo de tempo	29
sensibilidade	29
tecnologia infravermelha passiva.....	28
tecnologia microfônica	28
tecnologia ultra-sônica.....	28
de ocupação	39
de posicionamento de cortinas/janelas.....	31
de posicionamento solar	30, 40
de transmitância de vidro.....	31
horários	31, 39
interruptores.....	30
Sistemas de Controle	
Centralizado.....	45
Distribuído.....	44
Distribuído.....	45
Distribuído.....	75
T	
transceptor	58
transmitância.....	11
V	
venezianas automáticas.....	36