

# ESPECIFICAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NO PROJETO DE SISTEMAS PREDIAIS DE ELETRICIDADE UTILIZANDO UM SISTEMA ESPECIALISTA COM REGRAS NEBULOSAS

*Alexandre Mota\**

*Lia Mota\**

**Resumo:** No projeto de sistemas prediais de eletricidade, a iluminação desempenha um papel fundamental na garantia do conforto e do rendimento do trabalho. Essa etapa consiste na determinação da quantidade de pontos de luz a ser instalada por cômodo; da localização e da potência desses pontos; do tipo de lâmpada e de luminária a serem utilizadas. Para tanto, o projetista considera três fontes de informação: as preferências do cliente; as normas técnicas ABNT NBR 5410 e NBR 5413 e o Estudo Luminotécnico. Contudo, as informações fornecidas por essas fontes podem ser conflitantes. Assim, a tarefa do projetista pode tornar-se complexa. Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um Sistema Especialista, com uma base de regras capaz de agregar informações dessas três fontes, para fornecer soluções tecnicamente viáveis para o projeto. A partir da aplicação dessa metodologia, foram realizadas simulações com resultados bastante satisfatórios.

**Palavras-chave:** Iluminação, sistema especialista, lógica nebulosa.

**Abstract:** In an electrical installation project, the lighting specification plays a critical role. It helps to provide comfort and efficiency on the work. This specification consists on determining: the amount of lamps to be installed; the location and the power related to them; the type of lamp to be installed. In order to achieve this goal, the planner considers three sources of information: client preferences; Brazilian Technical Standards ABNT NBR 5410 and NBR 5413 and the Luminotechnical Study. However, the information of these sources may be not the same. So, the planner's task can become complex. In this context, this work proposes the development of an Expert System with fuzzy rules that is able to aggregate the information of the three information sources and to provide solutions to help the planner in this task. The method was tested through different simulations, yielding satisfactory results.

**Key words:** Lighting, expert system, fuzzy logic.

---

## INTRODUÇÃO

A especificação da iluminação dos ambientes possui grande importância no contexto do projeto de um sistema predial de eletricidade. A iluminação, quando projetada de forma adequada, pode trazer inúmeros benefícios como, por exemplo, conforto para os usuários do ambiente, elevação do rendimento no trabalho e diminuição de acidentes e erros, contribuindo, dessa maneira, para o estabelecimento de uma condição de maior segurança e bem-estar. Em especial, os

ambientes de trabalho (comercial e industrial) vêm emprestando uma importância cada vez maior ao projeto e instalação de uma iluminação eficiente. Isso porque, numa economia cada vez mais competitiva, os trabalhadores cumprem estressantes jornadas de trabalho e, conseqüentemente, a visão desses funcionários é submetida a esforços significativos. Nesse sentido, uma iluminação adequada pode diminuir a fadiga e aumentar o rendimento dos trabalhadores (Credler 2007; Cavalin & Cervelin 2007; IET 2008; Alves et al. 2010).

---

\* PUC-Campinas

O projeto de iluminação compreende, basicamente, as seguintes etapas: determinação da quantidade de pontos de luz a ser instalada por cômodo, especificação da localização desses pontos, determinação da potência para cada ponto e do tipo de lâmpada e de luminária a serem utilizadas. Para que a iluminação seja especificada corretamente, garantindo conforto ao usuário, o projetista deve considerar três diferentes fontes de informação. Uma dessas fontes corresponde às normas técnicas ABNT NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão e ABNT NBR 5413 – Iluminância de Interiores (ABNT 1992; ABNT 2004), que garantem a iluminação mínima necessária para a utilização do ambiente. Outra fonte de informação a ser considerada na elaboração do projeto de iluminação é o Estudo Luminotécnico. A partir desse estudo, o projetista determina a iluminação dos cômodos, com base em dados (e cálculos) mais detalhados como, por exemplo, o fluxo luminoso mínimo necessário para iluminar o ambiente, a iluminância relativa ao tipo de ambiente, as cores das paredes, do teto e do piso, a utilização e manutenção do local, o fator de uso da luminária escolhida, etc. A terceira fonte de informação para o projetista é o próprio cliente, que explicita as características de iluminação desejadas para cada cômodo. Essas características estão relacionadas às preferências do cliente, às finalidades de cada ambiente, ao tipo de usuário de cada cômodo, dentre outras.

Nota-se, portanto, que a elaboração do projeto de iluminação pode ser bastante complexa, especialmente quando as três fontes de informações citadas fornecerem resultados diferentes. Assim, torna-se extremamente relevante o desenvolvimento de ferramentas computacionais para auxiliar o projetista nessa tarefa. Nesse sentido, este trabalho propôs o desenvolvimento e implementação de um Sistema Especialista com base de regras nebulosas como ferramenta de apoio à tomada de decisão do projetista, quando da especificação da iluminação dos ambientes.

## **SISTEMAS ESPECIALISTAS E LÓGICA NEBULOSA EM INSTALAÇÕES PREDIAIS**

Um Sistema Especialista (SE) é uma técnica de Inteligência Artificial, implementada através de um programa computacional, que pode ser aplicada na resolução de problemas de diferentes áreas do conhecimento (Barr & Feigenbaum 1981).

Comumente, esses problemas podem ser solucionados por especialistas humanos que, a partir de seu conhecimento, são capazes de fornecer regras relacionadas à maneira pela qual analisariam os problemas. Assim, o conhecimento desses especialistas pode ser utilizado para criar uma base de regras (ou base de conhecimento) que, quando implementada computacionalmente, dá origem ao núcleo de um SE.

Existem três diferentes tipos de usuários envolvidos com o desenvolvimento e utilização do SE: (a) usuário final - que utiliza o SE implementado para auxiliá-lo na resolução de problemas; (b) especialista - que constrói a base de regras através de seu conhecimento; (c) engenheiro de conhecimento - que é responsável pela implementação e manutenção computacional do SE (através, inclusive, de consultas ao especialista). Com relação à sua arquitetura, um SE é principalmente constituído por: (a) base de conhecimento ou base de regras - que consiste em um conjunto de declarações, ou seja, regras e fatos, totalmente específicos do problema tratado; (b) motor de inferência - que é responsável pela busca das regras da Base de Conhecimento para serem avaliadas, sendo independente do problema em análise. A Figura 1 ilustra os componentes e um SE.

As regras contidas na Base de Conhecimento (especificadas a partir do conhecimento do especialista) são, geralmente, implementadas com o seguinte formato: “SE premissas (antecedentes) ENTÃO conclusão (conseqüentes)”. De forma resumida, o funcionamento de um SE é baseado na busca (realizada na Base de Conhecimento) pelas regras necessárias para se determinar uma solução para o problema. Uma vez escolhida uma regra (escolha feita em função da informação fornecida pelo usuário final), essa regra continuará sendo avaliada enquanto as condições da premissa forem verdadeiras, caso contrário uma nova regra será escolhida pelo SE.

Conforme citado anteriormente, os Sistemas Especialistas são utilizados para solucionar problemas de diferentes áreas do conhecimento. Com relação às áreas de instalações prediais e tecnologia do ambiente construído, podem ser encontrados na literatura diferentes trabalhos, tratando do projeto térmico de construções e sistemas de energia (Robin et al. 1993), do problema da detecção de faltas em sistemas de ar-condicionado (Qin & Wang 2005), dos problemas de

conforto térmico e visual em edificações (Dounis et al. 1995; Dounis & Caraiscos 2008), do problema do diagnóstico de fissuras em concreto armado (Formoso et al. 1993; Formoso et al. 1998), dentre outros.

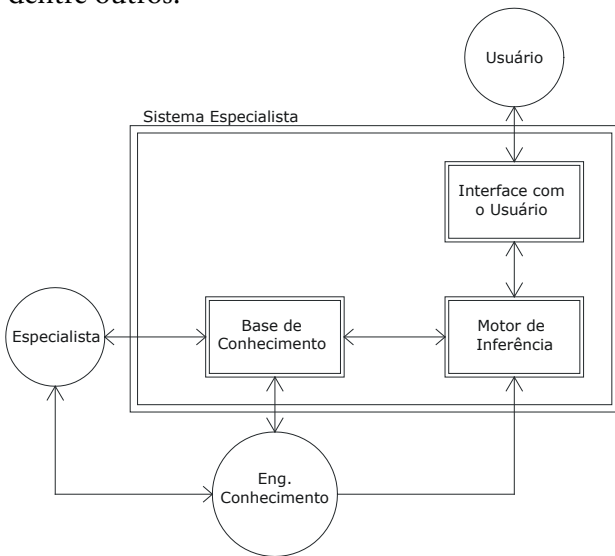


Figura 1: Componentes de um SE

O SE desenvolvido neste trabalho utiliza conceitos de lógica nebulosa na definição das regras da Base de Conhecimento. Diferentemente da lógica binária que trata as afirmações, classificando-as como verdadeiras ou falsas, a lógica nebulosa, difusa ou fuzzy admite valores lógicos intermediários entre a falsidade e a verdade, definindo, assim, uma área de pesquisa que trata das incertezas nos mais diversos tipos de problema (Simões & Shaw 2007). A lógica nebulosa é utilizada na resolução de problemas de difícil modelagem analítica. Com relação às áreas de instalações prediais e tecnologia do ambiente construído, essa técnica vem sendo amplamente empregada, tratando de controladores fuzzy utilizados no problema do conforto térmico em edificações (Kolokotsa et al. 2006), do controle de sistemas de ar-condicionado (Liu & Dexter 2001), do emprego de variáveis lingüísticas e lógica fuzzy na avaliação de desempenho de edifícios de escritório (Rheingantz 2002), da aplicação dessa técnica à racionalização inteligente de energia (Santos et al. 2005), dentre outros problemas, visando o condicionamento térmico predial.

Apesar de existirem muitas referências relacionadas à utilização de Sistemas Especialistas e lógica nebulosa em sistemas prediais, a aplicação dessas técnicas como ferramentas de apoio à tomada de decisão no projeto de sistemas prediais

de iluminação, foco deste trabalho, apresenta-se como área de pesquisa ainda a ser desenvolvida. Nesse sentido, os resultados obtidos neste trabalho podem contribuir para o fortalecimento das pesquisas nessa área do conhecimento. Neste trabalho, foi implementado um Sistema Especialista utilizando uma base de regras nebulosas, isto é, a inferência realizada pelo Sistema Especialista é difusa, através da aplicação de regras do tipo “SE A ENTÃO B” de forma que A e B, e a própria regra, sejam noções não-determinísticas, ou seja, nebulosas. A seção a seguir descreve, de forma detalhada, o Sistema Especialista desenvolvido.

## DESENVOLVIMENTO - O SISTEMA ESPECIALISTA IMPLEMENTADO

O sistema especialista desenvolvido neste trabalho foi baseado em regras definidas por especialistas na área e devido à característica, muitas vezes incerta, das variáveis envolvidas, foram utilizados conceitos de lógica nebulosa na definição dessas regras e variáveis. Além disso, é importante destacar que o sistema foi desenvolvido na linguagem computacional Java, de uso livre e gratuito.

## A ESTRUTURA DO SISTEMA ESPECIALISTA

O sistema especialista recebe, como entrada, diferentes informações relacionadas ao ambiente. Essas informações contemplam dados associados às três fontes de informação citadas anteriormente (cliente, normas técnicas e estudo luminotécnico) como, por exemplo, área e perímetro do cômodo, cores das paredes, do teto e do piso, preferências do cliente, etc.

Um exemplo da necessidade de utilização de conceitos de lógica nebulosa pode ser observado nas informações relativas às preferências do cliente. Esses dados possuem uma característica bastante incerta (não-determinística), uma vez que o cliente traz ao conhecimento do projetista seus gostos pessoais que, geralmente, não são determinísticos. Por exemplo, o cliente pode informar que deseja que sua sala possua um ambiente “muito aconchegante”, qualificativo que pode não ser facilmente representado de forma analítica. Da mesma maneira, pode querer um projeto que garanta uma “economia de energia razoável”, mas com “alta qualidade de energia”, qualificativos

também não-determinísticos, justificando o emprego de lógica nebulosa neste trabalho.

Essas informações são, então, processadas por uma base de regras nebulosas e por um sistema de pós-processamento, gerando, como saídas do sistema especialista, algumas especificações necessárias para o projeto de iluminação do ambiente. A Figura 2 ilustra, de maneira geral, o funcionamento do Sistema Especialista desenvolvido. Da análise dessa figura, nota-se que o Sistema Especialista recebe informações das três fontes mencionadas (NBR 5410 e NBR 5413, Estudo Luminotécnico e cliente) e fornece como saída o número e o tipo de lâmpadas e luminárias a ser instalado no cômodo. Descrevendo-o de forma mais detalhada, o Sistema Especialista é composto por uma base de regras nebulosas e um sistema de pós-processamento determinístico, que possuem diferentes variáveis de entrada e se relacionam conforme ilustra a Figura 3.

A base de regras trata do processamento nebuloso, recebendo, como entrada, informações do cliente que não podem ser modeladas analiticamente de forma simples como, por exemplo: grau de “aconchego” que o ambiente deve ter, grau de

economia de energia que a instalação deve possuir, grau de qualidade de energia da instalação, etc. Deve-se destacar que o quesito “economia de energia” está diretamente relacionado à utilização de lâmpadas com baixo consumo de energia, característica usualmente observada em lâmpadas fluorescentes. Já o quesito “qualidade de energia” corresponde à qualidade da energia disponível para alimentar a iluminação do ambiente, no que se refere a níveis adequados de magnitude de tensão e de distorções harmônicas, características geralmente alcançadas quando da utilização de lâmpadas incandescentes.

A partir dessas informações e da aplicação da base de regras, obtém-se, como saída, alguns importantes parâmetros a serem utilizados no projeto da iluminação do ambiente: o tipo de lâmpada e de luminária a serem empregados e o fator de depreciação do ambiente, determinado em função do grau de limpeza do ambiente e da frequência com que é feita manutenção no local. Essas três informações são utilizadas, então, conjuntamente com outros dados fornecidos pelo cliente (dados determinísticos, tais como as cores do piso, das paredes e do teto, o comprimento e a largura do



Figura 2: Funcionamento do Sistema Especialista

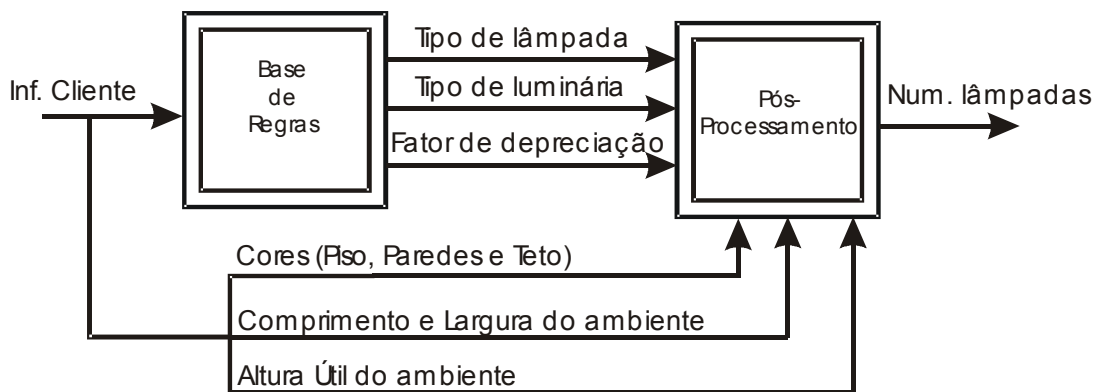


Figura 3: Detalhe do funcionamento do Sistema Especialista

ambiente e a altura útil do mesmo), como entradas do sistema de pós-processamento, responsável pelo processamento analítico e determinístico das informações. O sistema de pós-processamento fornece, como saída, o número de lâmpadas/luminárias a ser instalado no cômodo em análise. Para facilitar o entendimento do funcionamento do Sistema Especialista implementado, as Figuras 4 e 5 ilustram os detalhes do funcionamento da base de regras e do sistema de pós-processamento, com suas respectivas entradas e saídas.

Da análise das Figuras 4 e 5, pode-se observar que a base de regras tem como entradas variáveis de difícil modelagem analítica, modeladas, neste trabalho, como variáveis nebulosas: *tipo de ambiente* (com relação ao nível de “aconchego” desejado); *utilização do ambiente* (informação relacionada ao nível de acuidade visual que o usuário necessitará no ambiente); *economia de energia* (grau de economia de energia que o cliente deseja da sua instalação, conforme descrito anteriormente); *qualidade da energia* que o cliente requer do projeto, com relação à utilização de lâmpadas que possibilitem níveis adequados de magnitude de tensão e distorções harmônicas, conforme citado

anteriormente neste trabalho; *limpeza do ambiente* (dado associado ao grau de limpeza do ambiente em condições normais de funcionamento) e *manutenção do ambiente* (informação relacionada à frequência com que o cômodo será limpo).

Como saída, a base de regras fornece as informações já citadas anteriormente: *tipo de lâmpada e de luminária* e *fator de depreciação*.

Neste trabalho, os tipos de lâmpadas possíveis de serem escolhidos pela base de regras são as *lâmpadas incandescentes, fluorescentes tubulares e fluorescentes compactas*. Já as luminárias podem ser *comerciais* ou *decorativas*. O fator de depreciação que depende, diretamente, da limpeza e manutenção do ambiente, fornece uma medida de como a instalação se depreciará ao longo do tempo e é utilizado no Estudo Luminotécnico, conforme será descrito a seguir.

O sistema de pós-processamento é composto por dois módulos. O primeiro corresponde à aplicação das normas NBR 5410 e NBR 5413, tendo, como entradas, o tipo de lâmpada e de luminária (fornecidos pela base de regras) e o comprimento e largura do ambiente em análise (fornecidos pelo cliente). O segundo módulo

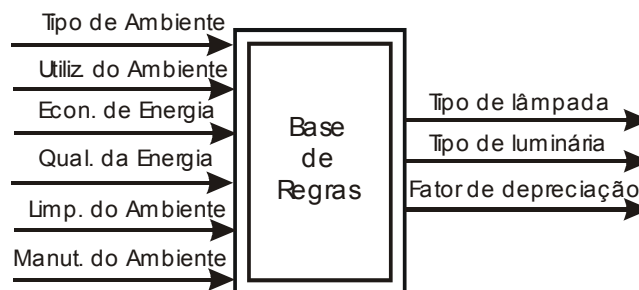


Figura 4: Detalhe do funcionamento da base de regras (modelagem nebulosa)

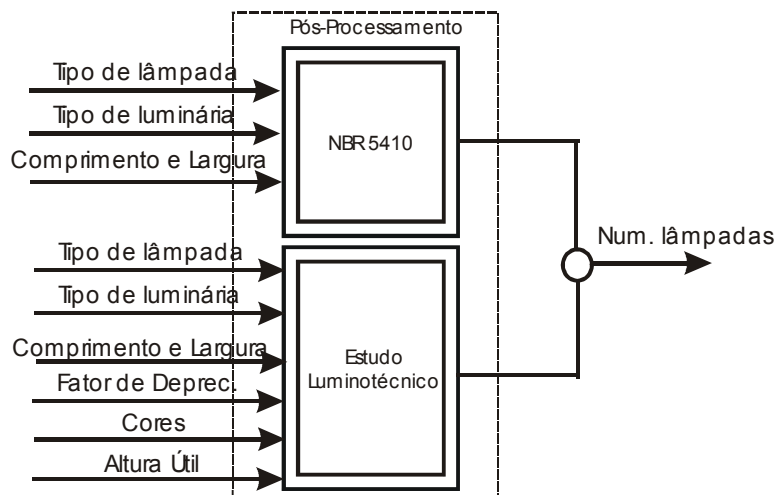


Figura 5: Detalhe do funcionamento do sistema de pós-processamento (processamento analítico)

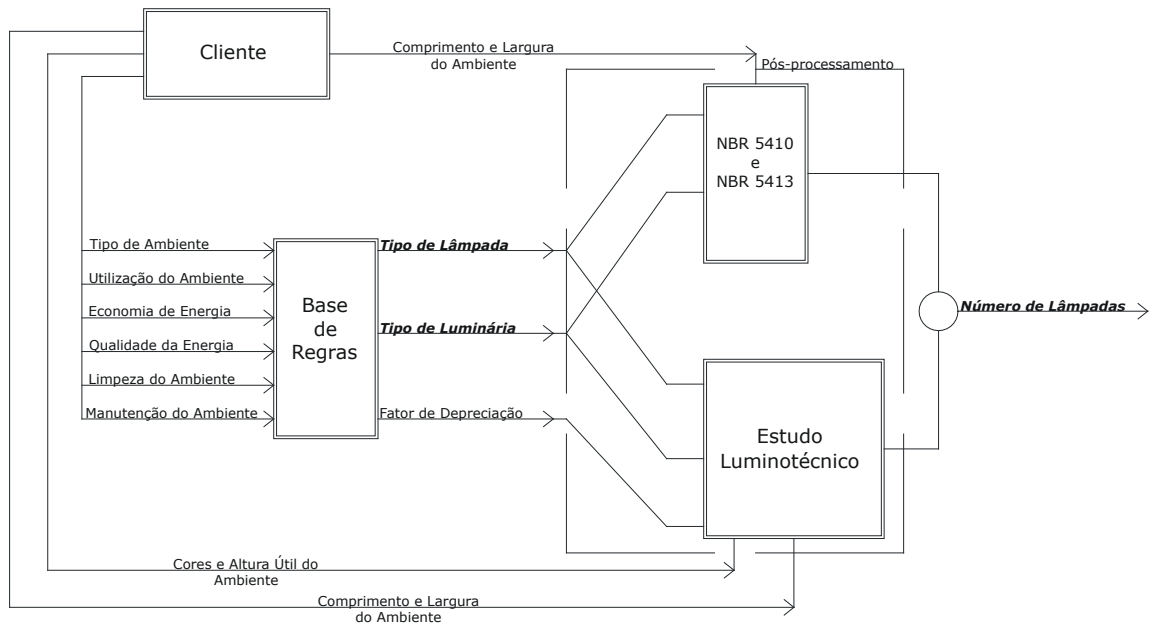


Figura 6: Fluxograma do Sistema Especialista desenvolvido

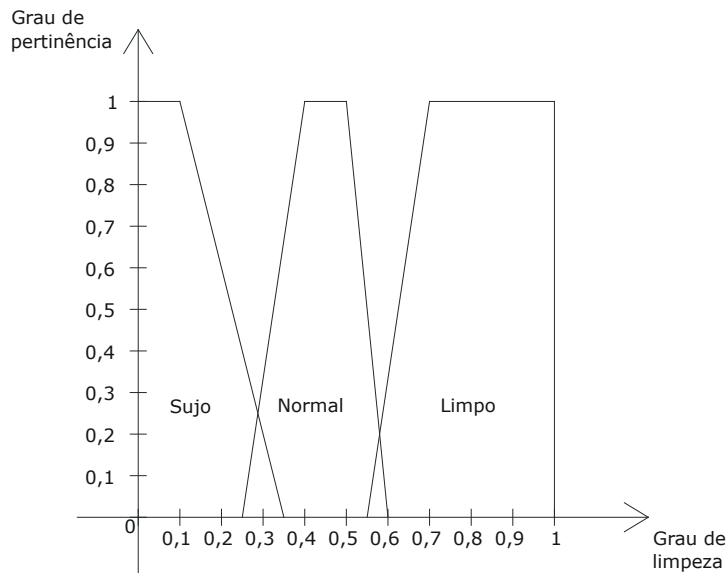


Figura 7: Função de pertinência da variável “limpeza do ambiente”

corresponde ao Estudo Luminotécnico realizado, neste trabalho, através do Método dos Lumens Simplificado (Creder 2007), tendo, como entradas, o tipo de lâmpada e de luminária, fator de depreciação (as três informações são fornecidas pela base de regras), o comprimento e largura do ambiente em análise, altura útil do cômodo e cores do piso, paredes e teto (dados fornecidos pelo cliente). A saída do sistema de pós-processamento é o número de lâmpadas/luminárias a ser instalado no cômodo.

A Figura 6 ilustra um fluxograma que descreve de forma detalhada o funcionamento do

Sistema Especialista desenvolvido. As grandezas em itálico referem-se às saídas do SE que se deseja determinar (tipo de lâmpada, tipo de luminária e número de lâmpadas).

#### VARIÁVEIS NEBULOSAS E FUZZIFICAÇÃO

As variáveis de entrada e de saída da base de regras, cuja modelagem analítica seria extremamente complexa, são modeladas, neste trabalho, como variáveis nebulosas (fuzzificação). Por exemplo, a variável “tipo de ambiente” pode ser

representada pelos conjuntos nebulosos referentes aos qualificativos lingüísticos “muito aconchegante”, “medianamente aconchegante” e “pouco aconchegante”, cada um deles representado por um conjunto nebuloso trapezoidal ou triangular (Simões & Shaw 2007). Já a variável “limpeza do ambiente” pode ser representada pelos conjuntos nebulosos referentes aos qualificativos “limpo”, “normal” e “sujo”, cada um deles representado por um conjunto nebuloso, caracterizando, assim, a função de pertinência da variável “limpeza do ambiente”. A figura a seguir ilustra essa função de pertinência.

Da análise dessa figura, pode-se observar que para um grau de limpeza de 0,32, por exemplo, a variável “limpeza do ambiente” pertence, com diferentes graus de pertinência, tanto ao conjunto “sujo” quanto ao conjunto “normal”, evidenciando a característica não-determinística do emprego dos conceitos de lógica nebulosa. As demais variáveis foram modeladas da mesma maneira, considerando sua associação a outros conjuntos nebulosos, conforme a Tabela 1. Nota-se que a variável “tipo de lâmpada” foi modelada como sendo a “chance da lâmpada ser de determinado tipo”.

#### BASE DE REGRAS

As regras são extraídas de uma base de conhecimento. Essa base de conhecimento deve representar a experiência de especialistas na área, acerca da influência das variáveis de entrada nas variáveis de saída. Neste trabalho, essas regras foram elaboradas com o seguinte formato:

*SE antecedente ENTÃO conseqüente*

O antecedente consiste em uma variável de entrada relacionada a um qualificativo lingüístico como, por exemplo, “ambiente muito aconchegante”. Da mesma maneira, o conseqüente refere-se a uma variável de saída relacionada a um qualificativo lingüístico como “chance da lâmpada ser incandescente é alta”. Alguns exemplos de regras implementadas neste trabalho (de um total de 48) estão descritos a seguir:

*“SE o ambiente É muito aconchegante ENTÃO a chance da lâmpada ser incandescente É alta”*

*“SE a qualidade da energia É alta ENTÃO a chance da lâmpada ser fluorescente tubular É baixa”*

*“SE a economia de energia É alta ENTÃO a chance da lâmpada ser fluorescente tubular É alta”*

*“SE o ambiente É muito aconchegante ENTÃO a luminária É decorativa”*

**Tabela 1** – Variáveis e seus conjuntos nebulosos

Variável	Conjuntos Nebulosos
Utilização do Ambiente	“muita acuidade visual”, “média acuidade visual”, “pouca acuidade visual”
Qualidade da Energia	“alta”, “média”, “baixa”
Economia de Energia	“alta”, “média”, “baixa”
Limpeza do Ambiente	“limpo”, “normal”, “sujo”
Manutenção do Ambiente	“muito freqüente”, “freqüente”, “pouco freqüente”
Chance de a Lâmpada ser Incandescente (LI)	“alta”, “média”, “baixa”
Chance de a Lâmpada ser Fluorescente Tubular (LFT)	“alta”, “média”, “baixa”
Chance de a Lâmpada ser Fluorescente Compacta (LFC)	“alta”, “média”, “baixa”
Tipo de Luminária	“decorativa”, “comercial”
Fator de Depreciação (d)	“alto”, “médio”, “baixo”

#### 3.4. VARIÁVEIS DE SAÍDA

Após a aplicação da base de regras, as variáveis de saída são defuzzificadas utilizando o método do centróide, bastante difundido na literatura (Simões & Shaw 2007). De forma geral, a aplicação da base de regras, que envolve os conceitos apresentados nos itens 3.2 e 3.3, pode ser ilustrada conforme a Figura 8. Depois desse processo de defuzzificação, as variáveis de saída da base de regras passam a ser variáveis de entrada do sistema de pós-processamento, que realiza, com as mesmas, cálculos analíticos convencionais estabelecidos nas normas técnicas e no Método dos Lumens Simplificado utilizado para o Estudo Luminotécnico (Creder 2007).

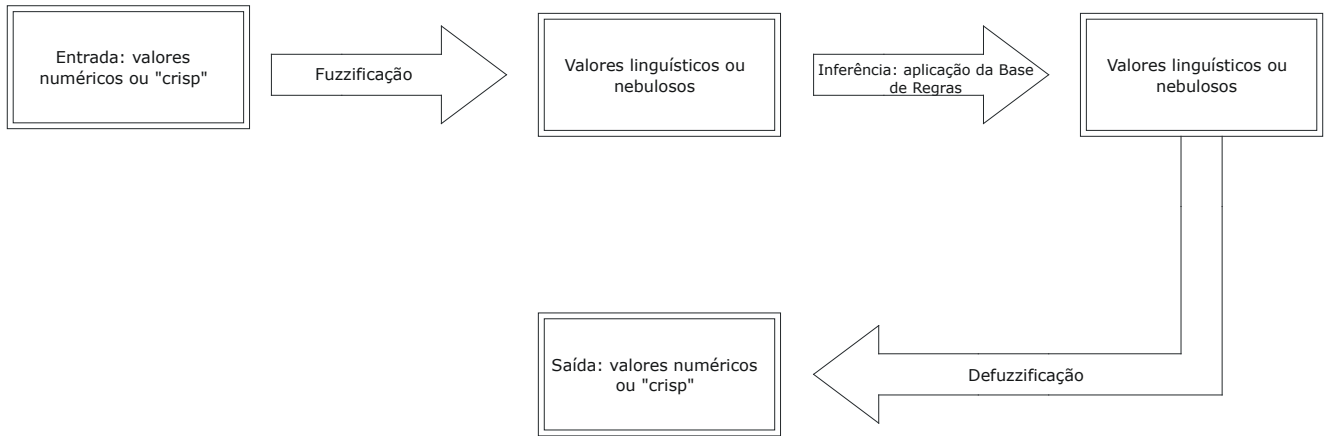


Figura 8: Aplicação da Base de Regras

## A INTERFACE DESENVOLVIDA PARA O SISTEMA ESPECIALISTA

Para facilitar a utilização do Sistema Especialista, foi implementada uma interface gráfica, em linguagem Java, que permite criar diferentes bases de regras através do cadastramento de novas regras, variáveis e qualificativos e da edição de parâmetros já existentes. Além disso, a interface possibilita executar, de forma gráfica, a aplicação da base de regras sobre um conjunto de variáveis de entrada, gerando as variáveis de saída já defu-

zificadas. É importante ressaltar que a interface também tem recursos para salvar, editar e carregar arquivos, permitindo a simulação de diferentes situações para um mesmo ambiente. As Figuras 9 e 10 ilustram algumas telas da interface desenvolvida. Em especial, a Figura 9(b) destaca a aplicação da seguinte regra nebulosa:

*“SE limpeza do ambiente É normal E manutenção do ambiente É freqüente ENTÃO fator de depreciação É médio”*

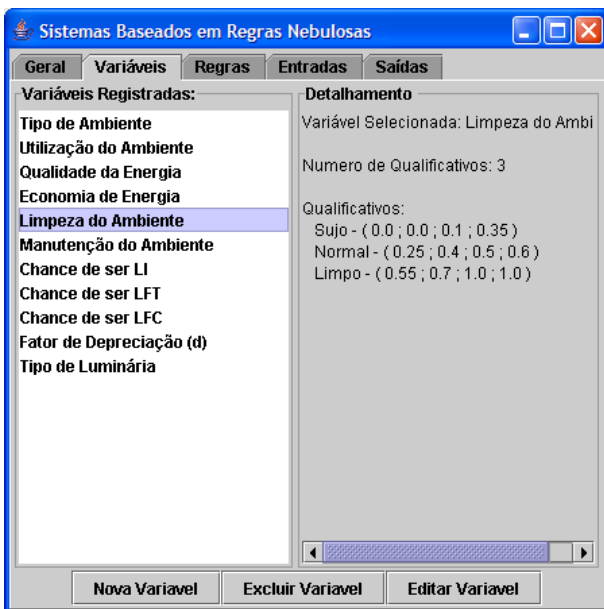


Figura 9-a: Variáveis registradas – destaque para a variável “limpeza do ambiente” e seus conjuntos nebulosos (qualificativos)

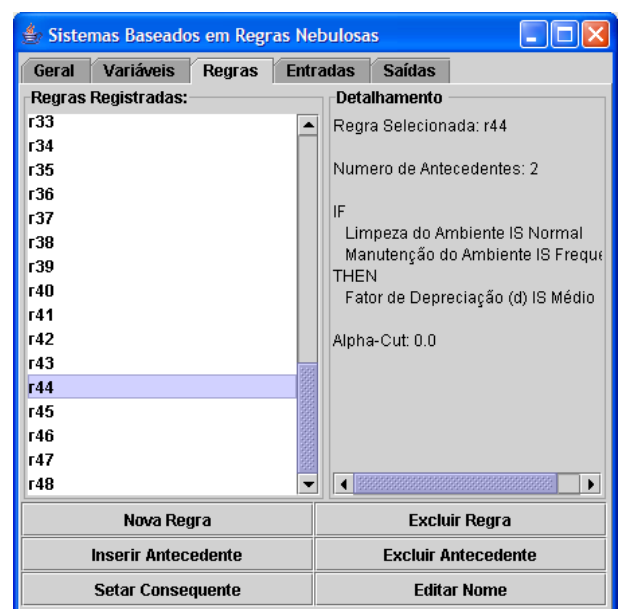


Figura 9-b: Regra (r44) relacionando as variáveis de entrada “limpeza do ambiente” e “manutenção do ambiente” à variável de saída “fator de depreciação”.



Variável	Valor para Fuzzificar
Tipo de Ambiente	1
Utilização do Ambiente	0.1
Qualidade da Energia	1
Economia de Energia	0.1
Limpeza do Ambiente	0.9
Manutenção do Ambiente	2500
Chance de ser LI	0.0
Chance de ser LFT	0.0
Chance de ser LFC	0.0
Fator de Depreciação (d)	0.0
Tipo de Luminária	0.0

Figura 10-a: Atribuição de valores às variáveis de entrada

Variável	Valor Defuzzificado
Chance de ser LI	0.8708163265306121
Chance de ser LFT	0.12411764705882353
Chance de ser LFC	0.34211111111111113
Fator de Depreciação (d)	0.9366666666666668
Tipo de Luminária	0.7441414141414141

Figura 10-b: Variáveis de saída (defuzzificadas) para as entradas ilustradas na Figura 10(a).

## SIMULAÇÕES E RESULTADOS OBTIDOS

Com o intuito de validar o Sistema Especialista desenvolvido, foram simuladas três situações representativas de desejos bastante distintos de clientes. Essas situações e seus respectivos resultados encontram-se descritos nos itens que se seguem.

### SITUAÇÃO A

Esse primeiro teste simula uma situação em que o cliente deseja as seguintes características do projeto de iluminação de determinado cômodo, descritas na Tabela 2. Os resultados obtidos, como saída da base de regras (após a defuzzificação), encontram-se descritos na Tabela 3.

Pode-se observar que os resultados obtidos condizem com os esperados, uma vez que pela aplicação da base de regras nebulosas a lâmpada a ser escolhida é a incandescente, o que condiz com as condições estabelecidas pelo cliente (ambiente com muito aconchego, necessidade de pouca acuidade visual, alta qualidade de energia e baixa economia de energia). A característica do tipo de ambiente também condiz com a escolha da luminária do tipo decorativa. Além disso, nota-se que

o fator de depreciação determinado pela base de regras está de acordo com a limpeza do ambiente e seu período de manutenção (ambiente limpo com manutenção muito freqüente). É importante salientar que diferentemente do que se poderia imaginar, um fator de depreciação alto indica boas condições de limpeza e manutenção.

Tabela 2 – Características da Situação A

Variável	Qualificativo (desejado pelo cliente)
Tipo de ambiente	“muito aconchegante”
Utilização do Ambiente	“pouca acuidade visual”
Qualidade da Energia	“alta”
Economia de Energia	“baixa”
Limpeza do Ambiente	“limpo”
Manutenção do Ambiente	“muito freqüente”

**Tabela 3** – Resultados obtidos para a Situação A

Variável	Valor defuzzificado / Qualificativo correspondente
Chance da Lâmpada ser Incandescente (LI)	0,871 / “alta”
Chance da Lâmpada ser Fluorescente Tubular (LFT)	0,124 / “baixa”
Chance da Lâmpada ser Fluorescente Compacta (LFC)	0,342 / “baixa”
Tipo de Luminária	0,744 / “decorativa”
Fator de Depreciação (d)	0,937 / “alto”

**SITUAÇÃO B**

Esse teste simula uma situação em que o cliente deseja as seguintes características do projeto de iluminação de determinado cômodo, descritas na Tabela 4. Os resultados obtidos, como saída da base de regras (após a defuzzificação), encontram-se descritos na Tabela 5. Pode-se observar que, novamente, os resultados obtidos condizem com os esperados, uma vez que pela aplicação da base de regras nebulosas a lâmpada a ser escolhida é a fluorescente tubular, o que condiz com as condições estabelecidas pelo cliente (ambiente com pouco aconchego, necessidade de muita acuidade visual, baixa qualidade de energia e alta economia de energia). A característica do tipo de ambiente também condiz com a escolha da luminária do tipo comercial. Além disso, nota-se que o fator de depreciação determinado pela base de regras está de acordo com a limpeza do ambiente e seu período de manutenção (ambiente limpo com manutenção freqüente).

**Tabela 4** – Características da Situação B

Variável	Qualificativo (desejado pelo cliente)
Tipo de ambiente	“pouco aconchegante”
Utilização do Ambiente	“muita acuidade visual”
Qualidade da Energia	“baixa”
Economia de Energia	“alta”

Limpeza do Ambiente	“limpo”
Manutenção do Ambiente	“freqüente”

**Tabela 5** – Resultados obtidos para a Situação B

Variável	Valor defuzzificado / Qualificativo correspondente
Chance de a Lâmpada ser Incandescente (LI)	0,124 / “baixa”
Chance de a Lâmpada ser Fluorescente Tubular (LFT)	0,871 / “alta”
Chance de a Lâmpada ser Fluorescente Compacta (LFC)	0,652 / “média”
Tipo de Luminária	0,183 / “comercial”
Fator de Depreciação (d)	0,803 / “médio”

**SITUAÇÃO C**

Esse último teste simula uma situação em que o cliente deseja as características do projeto de iluminação de um determinado cômodo conforme descrito na Tabela 6. Os resultados obtidos, como saída da base de regras (após a defuzzificação), encontram-se descritos na Tabela 7. Pode-se observar que, mais uma vez, os resultados obtidos condizem com os esperados, uma vez que pela aplicação da base de regras nebulosas a lâmpada a ser escolhida pode ser incandescente ou fluorescente compacta, o que condiz com as condições estabelecidas pelo cliente (ambiente com aconchego médio, necessidade de acuidade visual média, média qualidade de energia e média economia de energia). Entretanto, como as características fornecidas pelo cliente não são muito marcantes (todos os qualificativos são “médios”), a chance do tipo da lâmpada ser LI ou LFC é “média”, indicando que não existe uma preponderância de uma sobre a outra. A característica do tipo de ambiente também condiz com a escolha da luminária do tipo decorativa. Além disso, nota-se que o fator de depreciação determinado pela base de regras

está de acordo com a limpeza do ambiente e seu período de manutenção (ambiente sujo com manutenção pouco freqüente).

**Tabela 6 – Características da Situação C**

Variável	Qualificativo (desejado pelo cliente)
Tipo de ambiente	“medianamente aconchegante”
Utilização do Ambiente	“acuidade visual média”
Qualidade da Energia	“média”
Economia de Energia	“média”
Limpeza do Ambiente	“sujo”
Manutenção do Ambiente	“pouco freqüente”

**Tabela 7 – Resultados obtidos para a Situação C**

Variável	Valor defuzzificado / Qualificativo correspondente
Chance de a Lâmpada ser Incandescente (LI)	0,499 / “média”
Chance de a Lâmpada ser Fluorescente Tubular (LFT)	0,342 / “baixa”
Chance de a Lâmpada ser Fluorescente Compacta (LFC)	0,494 / “média”
Tipo de Luminária	0,744 / “decorativa”
Fator de Depreciação (d)	0,610 / “baixo”

## PÓS-PROCESSAMENTO PARA A SITUAÇÃO B

Em virtude do enfoque deste trabalho estar mais direcionado à implementação do Sistema Especialista, destacando o desenvolvimento da base de regras nebulosas, a etapa de pós-processamento, que utiliza apenas variáveis determinísticas (“crisp”), será ilustrada apenas para a Situação B.

Os dados de entrada para esse pós-processamento são: comprimento do cômodo = 3 metros; largura do cômodo = 2 metros; cores do piso (escura), das paredes (branca) e do teto (branca), o que implica em um índice de reflexão 8-5-1, de acordo com a referência (Creder 2007); altura útil do ambiente (distância entre o teto e o plano de trabalho) = 2 metros; lâmpada tipo LFT (foi utilizada uma lâmpada fluorescente tubular de 32 Watts); luminária decorativa (foi utilizada uma luminária decorativa para lâmpada fluorescente tubular de 32 Watts); fator de depreciação igual a 0,803. Deve-se salientar que os três últimos dados foram obtidos como saída da base de regras. Além disso, considerou-se que o ambiente será utilizado como uma sala de estar, o que implica em um iluminamento normatizado igual a 150 Lux. Aplicando-se os cálculos associados às normas técnicas e ao Estudo Luminotécnico, chegou-se à conclusão de que existe a necessidade de colocação de uma luminária com duas LFT de 32 Watts.

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um Sistema Especialista baseado em regras nebulosas capaz de fornecer importantes parâmetros relacionados ao projeto de iluminação de um ambiente. Partindo de dados de difícil modelagem analítica, como por exemplo, o nível de “aconchego” de um ambiente, o sistema realiza a modelagem dessas variáveis como nebulosas e aplica uma base de regras para determinar o tipo de lâmpada e o tipo de luminária a serem utilizadas, bem como o fator de depreciação associado ao local. Essas informações são utilizadas, conjuntamente com outros dados (determinísticos, como a área do cômodo), para obter, numa etapa de pós-processamento, o número de lâmpadas/luminárias a ser instalado no ambiente. Para tanto, foi desenvolvida uma interface em linguagem Java, permitindo a criação, edição e alteração de diferentes bases de regras, variáveis e conjuntos nebulosos (qualificativos) e facilitando a realização de diversas simulações. Apesar da possibilidade de melhoria da base de regras através da inclusão de novas regras, novas variáveis e da adequação e refinamento dos conjuntos nebulosos, os resultados obtidos a partir dos testes realizados condizem com os esperados. Além disso, através desses resultados, pôde-se observar que a metodologia pode

ser executada em tempo computacional reduzido. Isso demonstra que o sistema implementado pode vir a auxiliar o projetista na especificação da iluminação de diversos tipos de ambiente para diferentes tipos de cliente.

## REFERÊNCIAS

ABNT (1992). *NBR 5413: Iluminância de interiores*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT (2004). *NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Alves, J. & Mota, A. & Mota, L. & Ricardo, R. (2010). *Implementação de sistema de iluminação híbrido utilizando fibra óptica para transporte de luz solar*. Anais do XIII ENIE - Encontro Nacional de Instalações Elétricas, São Paulo.

Barr, A. & Feigenbaum, E. A. (eds) (1981). *The Handbook of Artificial Intelligence*. Los Altos, California: William Kaufmann Inc.

Cavalin G. & Cervelin S. (2007). *Instalações Elétricas Prediais*. São Paulo: Editora Érica Ltda.

Creder, H. (2007). *Instalações Elétricas*. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

Dounis A. & Santamouris, M. & Lefas, C. & Argiriou, A. (1995). *Design of a fuzzy set environment comfort system*. Energy and Buildings, 22(1): 81-87.

Dounis A. & Caraiscos, C. (2008). *Fuzzy Comfort and its Use in the Design of an Intelligent Coordinator of Fuzzy Controller-Agents for Environmental Conditions Control in Buildings*. Journal of Uncertain Systems, 2(2): 101-112.

Formoso, C. & Silva, L. & Costa, A. (1993). *Desenvolvimento de um sistema especialista para o diagnóstico de fissuras em concreto armado*. Anais do 5º Encontro Nacional em Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC). São Paulo: AN-TAC/APUSP, 2: 709-710

Formoso, C. & Boudinova, M. & Silva, M (1998). *Desenvolvimento de EQUIPES - um protótipo de sistema especialista para a seleção de equipamentos para construção de edifícios de múltiplos andares*. Anais do 7º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Florianópolis: NPC/UFSC, 2: 543-550.

IET (2008). IEE Wiring Regulations 17th Edition - BS 7671. Londres: Institution of Engineering and Technology.

Kolokotsa D. & Saridakisb G. & Pouliezosc A. & Stavrakakis G. (2006). *Design and installation of an advanced EIB™ fuzzy indoor comfort controller using Matlab™*. Energy and Buildings, 38 (9): 1084-1092.

Liu X. & Dexter A (2001). *Fault-tolerant supervisory control of VAV air-conditioning systems*. Energy and Buildings , 33(4): 379-389.

Qin J. & Wang S. (2005). *A fault detection and diagnosis strategy of VAV air-conditioning systems for improved energy and control performances*. Energy and Buildings, 37(10): 1035-1048.

Rheingantz P. (2002). *Lógica fuzzy e variáveis linguísticas aplicadas na avaliação de desempenho de edifícios de escritório*. Ambiente Construído, 2(3): 41-55.

Robin C. & Brau J. & Roux J. (1993). *Integration of expert knowledge and simulation tools for the thermal design of buildings and energy systems*. Energy and Buildings, 20(2): 167-175.

Santos R. & Borges G. & Melo G. & Bauchspiess A. (2005). *Controle fuzzy para racionalização de energia em protótipo de processo térmico predial*. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São Luís (MA).

Simoes M. & Shaw I. (2007). *Controle e Modelagem Fuzzy - 2ª Edição Revista e Ampliada*. São Paulo: Edgar Blücher/FAPESP.