

**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DA**  
**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E**  
**AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



*Projeto de Formatura – 2002*  
**Software de Luminotécnica utilizando Algoritmos  
Genéticos**

**Aluno: Teodoro Melo de Ornelas**

**Orientador: Prof. Dr. José Aquiles B. Grimon**

**Coordenadores: Prof Dr. Marco Antônio Saidel  
e Prof. Dr. Carlos Márcio Vieira Tahan**

**ESCOLA POLITÉCNICA  
DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E  
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



*Projeto de Formatura – 2002*

**Software de Luminotécnica utilizando Algoritmos  
Genéticos**

**Aluno: Teodoro Melo de Ornelas**

**Orientador: José Aquiles B. Grimoní**

**Coordenador: Marco Antônio Saidel**

**Índice**

<b>ÍNDICE .....</b>	<b>2</b>
<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>5</b>
1.1 - OBJETIVOS.....	6
<b>2 - LUMINOTÉCNICA E FOTOMETRIA.....</b>	<b>8</b>
2.1 - LUZ.....	8
2.2 - ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL .....	9
2.2.1 - <i>Fotometria</i> .....	11
2.3 - LÂMPADAS .....	14
2.3.1 - <i>Lâmpadas Incandescentes</i> .....	14
2.3.1.1 - Parâmetros.....	16
2.3.2 - <i>Lâmpadas de Descarga Elétrica</i> .....	18
2.3.2.1 - Cor.....	20
2.4 - ILUMINAÇÃO DE INTERIORES.....	21
2.4.1 - <i>Leis de Lambert</i> .....	23
2.4.2 - <i>Considerações sobre o Software</i> .....	25
<b>3 - ALGORÍTMOS GENÉTICOS .....</b>	<b>25</b>
3.1 - EVOLUCIONISMO.....	25
3.2 - GENÉTICA.....	27
3.2.1 - <i>Mecanismos Genéticos</i> .....	28
3.2.1.1 - Cromossomos e Genes .....	28
3.2.1.2 - Reprodução .....	29
3.2.1.3 - Crossover .....	29
3.2.1.4 - Mutação .....	30
3.3 - OS ALGORÍTMOS GENÉTICOS .....	30
3.3.1 - <i>Codificação da Solução</i> .....	31
3.3.2 - <i>Função de Avaliação</i> .....	32
3.3.3 - <i>Seleção</i> .....	32
3.3.4 - <i>Reprodução</i> .....	33
3.3.4.1 - Crossover .....	33
3.3.4.2 - Mutação .....	34
3.3.4.3 - Elitismo .....	34

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

<b>4 – PROJETO DO SOFTWARE.....</b>	<b>35</b>
4.1 – OVERVIEW.....	35
4.2 – MÓDULO DE CÁLCULO LUMINOTÉCNICO.....	36
4.2.1 – <i>Padrões de Entrada de Dados</i> .....	37
4.2.1.1 – O Arquivo LAMP.DAT .....	38
4.2.1.2 – O Arquivo ROOM.DAT .....	38
4.2.1.3 – O Arquivo LAMPPOS.DAT .....	39
4.2.3 – <i>Cálculo Luminotécnico</i> .....	40
4.2.4 - <i>Geração da Saída</i> .....	41
4.3 – MÓDULO INTELIGENTE.....	42
4.3.1 – <i>Função de Avaliação</i> .....	43
4.3.2 – <i>Função de Ordenação</i> .....	46
4.3.3 – <i>Função de Reprodução</i> .....	46
4.3.3.1 – Elitismo .....	47
4.3.3.2 – Chance de Reprodução .....	47
4.3.3.3 – Método da Roleta – Roulette Wheel.....	48
4.3.3.4 - Crossover .....	49
4.2.3.5 – Mutação.....	50
4.4 – INTERFACE.....	51
4.4.1 – <i>Entrada de Dados</i> .....	51
4.4.2 – <i>Parâmetros (arquivo DEFAULTS.DAT)</i> .....	54
<b>5 – RESULTADOS OBTIDOS.....</b>	<b>55</b>
5.1 – TEMPO DE PROCESSAMENTO .....	56
5.2 – QUALIDADE DOS RESULTADOS .....	56
5.3 – NÚMERO DE GERAÇÕES .....	57
5.4 – ESTUDO DE CASO – SALA DE PEQUENAS DIMENSÕES.....	59
5.5 – ESTUDO DE CASO - SALA QUADRADA DE GRANDES DIMENSÕES.....	62
<b>6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>68</b>
6.1 – TIPOS DE LUMINÁRIAS.....	69
6.2 – CONVERGÊNCIA DAS SOLUÇÕES .....	69
6.3 – APRIMORAMENTOS FUTUROS.....	70
<b>APÊNDICE 1 – RELAÇÃO POTÊNCIA X ILUMINÂNCIA.....</b>	<b>72</b>

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

LÂMPADAS INCANDESCENTES.....	72
LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS.....	72
LÂMPADAS FLUORESCENTES TUBULARES COM REATORES CONVENCIONAIS	
.....	72
<b>ÍNDICES .....</b>	<b>74</b>
ÍNDICE DE FIGURAS .....	74
ÍNDICE DE TABELAS.....	74
ÍNDICE DE EQUAÇÕES .....	74
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>76</b>

## **1 - Introdução**

Num mundo cada vez mais preocupado com a conservação e com o uso racional da energia, engenheiros e projetistas do mundo inteiro buscam cada vez mais maximizar a eficiência de seus projetos, seja de máquinas ou instalações.

A iluminação artificial ainda é, sem sombra de dúvidas, um campo que ainda permite a intervenção e a obtenção de ganhos energéticos expressivos com projetos mais eficientes. Estes projetos, entretanto, não são feitos normalmente com a precisão necessária, fiando-se muitas vezes em regras e condutas derivadas de experiência anterior de instaladores, que não necessariamente representam as técnicas mais conservadoras no campo energético.

É neste contexto de necessidade latente de estudo e comprovação das hipóteses adotadas que este trabalho se encaixa. São nossos objetivos a obtenção de um software funcional que auxilie de fato os projetistas na execução de projetos de iluminação mais eficientes do ponto de vista energético e de um mecanismo que possa servir de prova para ratificar ou não as técnicas de iluminação hoje adotadas.

Para atingir tal objetivo, utilizaremos uma técnica de Inteligência Artificial chamada Algoritmos Genéticos, pois esta técnica possui características de primordial importância nesta aplicação: permite a confecção de um software com poucos recursos computacionais; é uma técnica de fácil entendimento e implementação; encaixa-se com harmonia em problemas de diversas naturezas; e ainda é um mecanismo de busca extremamente poderoso quando o espaço de busca é tido como ilimitado ou muito grande.

O Algoritmo Genético será utilizado para propor uma configuração de luminárias e lâmpadas que melhor se adeque às necessidades do usuário, que podem variar desde a garantia de um nível mínimo, médio e/ou máximo de iluminamento em uma sala; minimização da diferença entre o ponto com maior e menor iluminamento na sala; minimização do custo de operação e/ou instalação da configuração.

Tais parâmetros serão variáveis de uma utilização para outra, ou seja, poderão ser inseridos como “pesos” no algoritmo, sendo que a melhor solução será aquela que combinar pontos positivos nas diversas características.

Para implementação do software, foi escolhida a linguagem de programação C++, que, além de ser de nosso domínio, é uma linguagem poderosa que permite acessar recursos básicos do computador, e que não necessita de muitos recursos computacionais para rodar.

Entretanto, programas em C++ tendem a ser pouco amigáveis para o usuário final ou para o programador, visto que o desenvolvimento deste tipo de software em ambiente gráfico consumiria muito mais tempo do que o disponível. Assim sendo, foi decidido que seria desenvolvida uma interface entre o usuário e o núcleo do programa em VisualBasic, que, além de outras coisas é uma linguagem fácil de se aprender, de extrema facilidade no tocante a design de telas e interfaces, e ainda possui uma interface muito interessante com bancos de dados, que poderão ser utilizados para guardar informações de lâmpadas, luminárias, etc.

### **1.1 - Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é a confecção de um software automático que otimize projetos de luminotécnica de ambientes fechados. Para isso, serão desenvolvidos dois módulos básicos.

O primeiro módulo é a camada mais baixa do software, desenvolvida em C++, referente ao cálculo luminotécnico de uma sala de dimensões quaisquer. Este módulo recebe como entrada arquivos descrevendo as condições da sala (dimensões, quantidade e posicionamento das luminárias, curva fotométrica das luminárias).

O segundo módulo compreende a interface do programa com o usuário, bem como o módulo pensante, de algoritmos genéticos. Desenvolvido em Visual Basic, este módulo é responsável por trocar informações com o usuário,

transformá-las de modo que possam ser compreendidas pelo módulo de cálculo luminotécnico, e assim gerar os resultados esperados.

Com esta configuração, objetivamos um software que atinja os seguintes requisitos:

- Ser capaz de gerar e analisar uma configuração de sala qualquer fornecida pelo usuário, sem utilizar o módulo inteligente.
- Ser capaz de, dadas as dimensões da sala, os tipos de lâmpada e luminária a serem utilizados e os critérios de seleção (por exemplo, priorizar o custo de operação, o iluminamento médio, etc), sugerir uma configuração espacial de luminárias para o usuário, e apresentar os dados da análise luminotécnica desta configuração.
- Ser graficamente amigável, tanto na interface com o usuário quanto na apresentação de resultados.

Não existem grandes preocupações com os seguintes aspectos quanto ao desempenho do software:

- Tempo de processamento. O tempo de processamento do algoritmo genético é longo, visto que o mesmo recorre muitas vezes ao programa de cálculo de salas, e por este motivo é um software demorado.
- Integração do programa com outros aplicativos de mercado existentes. Na medida do possível, procurou-se seguir os padrões de menus e botões já existentes no Windows, mas esta não foi uma preocupação central.

## 2 - Luminotécnica e Fotometria

### 2.1 - Luz

Luz é o nome que damos à sensação ótica causada pela radiação eletromagnética de um determinado espetro de freqüências. De todas as formas de radiação eletromagnética, uma das que mais nos afeta é a chamada luz. Entretanto, o espectro visível é formado por uma pequena parte do espectro total de radiações eletromagnéticas existente na natureza. A luz é algo que todos temos familiaridade. Ela vem de muitas fontes, a principal delas sendo o Sol, e é a luz que nos provê a energia necessária para a vida.

O físico escocês chamado James Clerk Maxwell<sup>1</sup> mostrou que campos elétricos e magnéticos oscilando juntos podem se propagar como uma onda. A luz é uma onda deste tipo. Maxwell sabia que um campo elétrico variando produzia um campo magnético. Ele supôs que um campo magnético que variasse no tempo também criaria um campo elétrico, porque as coisas na natureza, na sua maior parte, são balanceadas. Baseado no trabalho de Faraday e Hertz, tal suposição foi provada verdadeira.

Uma onda eletromagnética, como qualquer outra onda, tem uma freqüência  $f$ , velocidade  $v$  e comprimento de onda  $\lambda$ . No vácuo ou no ar, numa boa aproximação, a velocidade  $v$  é igual a  $c$  (velocidade da luz,  $3 \times 10^8$  m/s).

---

<sup>1</sup> James Clerk Maxwell – 1831-1879 – Físico escocês responsável por grande parte da teoria eletromagnética, notadamente as 4 equações de Maxwell (Lei de Faraday, Lei de Ampère, a equação que exprime o fato de que cargas magnéticas isoladas não são encontradas na natureza e a Lei de Gauss).

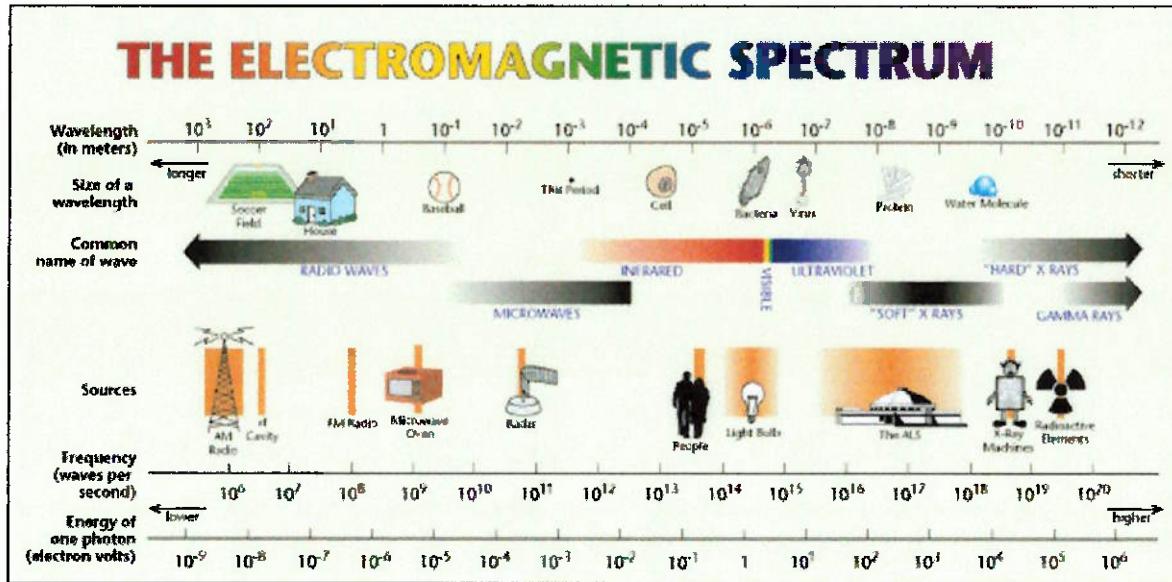


FIGURA 1 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

A figura 1 acima mostra o espectro eletromagnético total. Pode-se ver que as ondas de freqüência mais baixas, no início do espectro, tem freqüências da ordem de dezenas de Hertz. Sua utilização é em rádios. Aumentando-se a freqüência passamos às microondas, ao infravermelho, e por fim chegamos à luz visível. Nota-se que a faixa responsável pelo espectro visível é bastante estreita se levarmos em consideração o espectro total. Acima desta freqüência, temos os raios ultravioleta, raios X e raios Gama.

Como a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é constante e independente da freqüência, é muito comum referir-se à uma onda eletromagnética pelo seu comprimento de onda. Assim, podemos dizer que o espectro de luz visível compreende desde 750 nm (vermelho) até 400 nm (violeta). Entre estes dois extremos estão compreendidas todas as outras cores visíveis.

O estudo da natureza da luz permitiu a observação do Cosmos numa maneira nunca antes imaginada. Imagens de raios X e Gama mostram um universo muito mais “colorido”, onde antes pensava-se ser uma região escura e monótona.

## 2.2 - Iluminação Artificial

Poucos inventos na história do homem causaram tanto impacto nos modos de viver do ser humano como a invenção da iluminação artificial. Modificando o ambiente (principalmente urbano) de maneira sem igual, a iluminação elétrica contribuiu para a formação de grandes metrópoles, grandes centros de aglomeração de pessoas e tornou possível a utilização do período noturno para diversos fins, antes impensáveis.

A descoberta da eletricidade por Benjamin Franklin<sup>2</sup> em 1746, seguida da invenção de uma bateria rudimentar de Luigi Galvani<sup>3</sup>, aperfeiçoada por Alessandro Volta<sup>4</sup> foi o marco inicial da história da eletricidade. Mas a eletricidade só ganhou força mesmo após os trabalhos de Oersted<sup>5</sup>, Ampère<sup>6</sup> e Faraday<sup>7</sup>, que impulsionaram estudos e mostraram diversos possíveis usos da energia elétrica antes desconhecidos.

Um dos mais importantes usos, como mencionado acima, foi a utilização da eletricidade para a iluminação. Com um princípio de operação extremamente simples, a lâmpada elétrica foi um dos primeiros inventos que utilizavam a energia elétrica para o seu funcionamento.

A primeira lâmpada elétrica foi feita em 1800 por Humphry Davy, um cientista inglês. Davy fazia experiências com eletricidade, e desenvolveu uma bateria

---

<sup>2</sup> Benjamin Franklin – 1706 – 1790 – inventor, escritor, cientista e político americano, conduziu experimentos e mostrou que os raios são manifestações elétricas, e algum tempo depois propôs o princípio de conservação das cargas. Mais tarde, foi um dos signatários da Carta de Independência Americana.

<sup>3</sup> Luigi Galvani – 1737 – 1798 – físico italiano. Estudou a fundo a interação entre eletricidade e seres vivos. Em algumas de suas mais famosas experiências, fez circular corrente elétrica pelas patas de um sapo, obtendo contrações musculares, e construiu uma bateria rudimentar composta de metal e fluídos corpóreos de sapos.

<sup>4</sup> Alessandro Giuseppe Anastasio Volta – 1745 – 1827 – Cientista e inventor italiano. Sua mais importante contribuição ao estudo da eletricidade foi a invenção da “pilha voltaica”, que provou que a eletricidade poderia ser obtida de materiais não orgânicos.

<sup>5</sup> Hans Christian Oersted – 1777 – 1851 – Físico dinamarquês. Mostrou a relação existente entre eletricidade e magnetismo, ao perceber que uma bússola mudava sua orientação com a passagem de uma corrente elétrica em um condutor próximo.

<sup>6</sup> André Marie Ampère – 1775 – 1836 – Físico e matemático francês – desenvolveu, a partir do fenômeno da deflexão da bússola pela corrente elétrica, a chamada Lei de Ampère, que descreve o campo magnético criado por uma corrente elétrica

<sup>7</sup> Michael Faraday – 1791 – 1867 – Físico e químico inglês. A partir dos resultados obtidos por Ampère e Oersted, Faraday acreditou que um polo magnético poderia ser posto a se mover em torno de um condutor elétrico, criando assim o primeiro motor elétrico.

elétrica. Quando ele conectou cabos entre a sua bateria e um pedaço de carbono, o carbono brilhou, produzindo luz.

Muito tempo depois, em 1860, o físico inglês Sir Joseph Wilson Swan estava determinado a produzir luz elétrica prática e de longa duração. Ele descobriu que um filamento fino de carbono funcionava bem, mas queimava rapidamente. Era o primórdio de uma descoberta, que ainda não tinha encontrado meios de transformar conhecimento científico em tecnologia.

Já em 1879, Thomas Alva Edison experimentava milhares de componentes e materiais para formar o filamento. Edison descobriu que um filamento de carbono num ambiente livre de oxigênio funcionava bem, e não se queimava em pouco tempo. Pouco tempo depois Edison inventou uma lâmpada em forma de bulbo que podia iluminar sem se queimar por mais de 1500 horas.

Desde então, as lâmpadas elétricas vêm evoluindo. Desde a primordial lâmpada incandescente de filamento de carbono de Edison até as modernas lâmpadas de descarga e mistas, a necessidade do homem de iluminar interiores e tornar mais hospitalar o ambiente noturno tem feito o estudo da iluminação artificial importante e necessário.

Desta necessidade constante de estudo nasceu uma cadeira inteiramente dedicada a este campo de conhecimento, a fotometria.

#### 2.2.1 - Fotometria

O estudo da Fotometria “consiste em uma série de métodos e processos de medida das grandezas luminosas”<sup>8</sup>. Tais grandezas são definidas de acordo com a norma NBR 5461 da seguinte forma:

**Fluxo Radiante:** É a potência, ou quantidade de energia transportada por uma radiação. Suas unidades de medida são o Watt (W), quando falamos de potência (energia por unidade de tempo) ou Watt-hora (Wh) ou Joule (J), quando falamos de energia.

---

<sup>8</sup> MOREIRA, Vinícius de Araújo; “Iluminação & Fotometria – Teoria e Aplicação”, p. 24

**Fluxo Luminoso ( $\Phi$ ):** “É uma grandeza característica de um fluxo energético, portanto, derivado do fluxo radiante, que exprime sua aptidão de produzir uma sensação luminosidade em um receptor (...). Pode também ser entendido como a quantidade total de luz emitida por segundo por uma fonte”<sup>9</sup> luminosa.

Medido em lúmens (lm), que é definido como sendo o fluxo luminoso emitido no interior de um ângulo sólido<sup>10</sup> igual a um esferoradiano, por uma fonte luminosa de intensidade igual a uma candela.

Incorpora tanto a energia capaz de causar sensação luminosa como as outras (que correspondem a radiação eletromagnética com comprimento de onda fora do espectro visível – 380 a 780 nm)

**Eficácia Luminosa:** É a relação entre o fluxo radiante e o fluxo luminoso, ou seja, indica a parcela do fluxo radiante responsável por gerar sensação visual luminosa.

**Eficiência Luminosa:** Relação entre o fluxo luminoso emitido por uma fonte de luz e a potência necessária absorvida para emitir tal fluxo.

$$\eta = \frac{\phi}{P} [\text{lm}/\text{W}]$$

EQUAÇÃO 1 - EFICIÊNCIA LUMINOSA

**Intensidade luminosa (I):** É a derivada do fluxo luminoso em relação a um infinitésimo de área de uma superfície orientada. É dependente, portanto, da forma com a qual o fluxo radiante se distribui nas imediações da fonte de luz. “O fluxo radiante exprime a potência de uma fonte de luz, porém, não indica como a energia irradiada se distribui em todas as direções”.

**Iluminância (E):** Densidade superficial de fluxo luminoso recebido. Exprime a quantidade de fluxo luminoso incidente em uma superfície.

<sup>9</sup> GARCIA Júnior, Ervaldo; “Luminotécnica”, p. 4

<sup>10</sup> Ângulo Sólido – Considerando uma esfera e uma área na sua superfície, corresponde ao volume formado pela ligação do centro da esfera com os pontos pertencentes a essa área. Para uma esfera de 1m de raio, se a figura na superfície possuir área de 1m<sup>2</sup>, dizemos que o ângulo sólido tem valor de 1 esferoradiano.

O lux é a unidade de medida, sendo que 1 lux corresponde à iluminância recebida por uma superfície perpendicular à emissão, superfície essa de 1 m<sup>2</sup>, recebendo um fluxo luminoso uniforme de 1 lm.

Existem normas que indicam valores de iluminâncias para aplicações típicas.

Temos como exemplo:

Atividade	Iluminância Mínima (lux)	Iluminância Máxima (lux)
Mínimo para ambientes de trabalho	150	-
Tarefas Visuais simples e variadas	250	500
Observações contínuas de detalhes médios e finos (trabalho normal)	500	1000
Tarefas visuais contínuas e precisas (trabalho fino, por exemplo, desenho)	1000	2000
Trabalho muito fino (iluminação local, por exemplo, conserto de relógio)	2000	-

TABELA 1 – ILUMINÂNCIAS RECOMENDADAS

O estudo da fotometria permite o desenvolvimento de um ferramental precioso e objetivo para podermos comparar diversas soluções físicas para um mesmo problema de luminotécnica. Por exemplo, para uma mesma iluminância, temos uma infinidade de maneiras para dispor luminárias, escolher o tipo das luminárias, lâmpadas, enfim, uma gama imensa de possibilidades para atender ao mesmo

problema. Escolher a configuração mais adequada para um problema é, além do mote deste trabalho, o objetivo do estudo de luminotécnica.

Este estudo obviamente não seria completo sem um estudo mínimo da tecnologia disponível para a execução de um projeto de luminotécnica.

### **2.3 - Lâmpadas**

Um estudo de iluminação nunca estará minimamente completo se não forem estudados os mecanismos de se prover iluminação a ambientes. Os equipamentos utilizado para tal são as lâmpadas, que existem em uma razoável variedade de tipos e princípios de funcionamento.

Daremos início agora ao estudo das lâmpadas elétricas, mostrando suas principais características.

#### **2.3.1 - Lâmpadas Incandescentes**

A luz emitida por uma lâmpada incandescente é gerada pela incandescência de um fio, a partir do seu aquecimento ao ser percorrido por uma corrente elétrica. A energia elétrica se transforma em energia térmica e luminosa, sendo assim irradiada da lâmpada para o ambiente.

A energia térmica move-se de um corpo para o outro (da lâmpada para o ambiente, por exemplo) quando existe uma diferença de temperatura entre eles. Os três principais mecanismos com os quais essa transferencia pode ocorrer são: Condução, Convexão e Radiação. No caso da luz (que assim como o calor é uma onda eletromagnética, apenas de comprimento de onda menor), a transmissão é feita por radiação.

A taxa de emissão de radiação de um corpo depende da quarta potência da temperatura deste corpo. Esta é conhecida como a Lei da Radiação de Stefan-Boltzmann:

$$P = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 [\text{Watts}]$$

## EQUAÇÃO 2 - LEI DE STEPHEN - BOLTZMANN

Onde:

$\epsilon$  representa a capacidade de um corpo emitir radiação (varia de 0 a 1)

$\sigma$  é a constante de Boltzmann, cujo valor é  $5,672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

$A$  é a superfície do corpo, em  $\text{m}^2$

$T$  é a temperatura absoluta do corpo, em Kelvin.

Podemos fazer um cálculo simples para estimar a ordem de grandeza das temperaturas nas quais teremos alguma emissão de luz razoável de uma lâmpada incandescente. A título de exemplo, estudemos uma lâmpada de automóvel. Estas lâmpadas normalmente são de 12V, 12W, com um filamento reto de cerca de 6,5mm e diâmetro 1,0mm. Podemos assumir que tal lâmpada possui uma emitividade  $\epsilon$  da ordem de 0,5.

Da Lei de Stefan-Boltzmann temos:

$$P = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

$$T = \sqrt[4]{\frac{P}{\epsilon \cdot \sigma \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot d}} = \sqrt[4]{\frac{12}{0,5 \cdot 5,672 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}} \cong 1800 \text{ K}$$

## EQUAÇÃO 3 - TEMPERATURA DE OPERAÇÃO - EXEMPLO

Nota-se então que a temperatura necessária de operação de um filamento já é alta quando lidamos com potências da ordem de 12 Watts. Isso significa que, com tecnologia rudimentar como a de lâmpadas de automóveis, lâmpadas de alta potência teriam que operar sob temperaturas impraticáveis. Por exemplo, uma lâmpada de 1000 W teria de operar a cerca de 5500 K.

Para solucionar este problema usam-se filamentos especiais, que não são apenas pedaços finos de fio, e sim filamentos espiralados ou mesmo duplo-espiralados. Desta maneira, aumenta-se o comprimento e a área radiante do condutor, minimizando a necessidade de temperaturas tão elevadas.

Apesar disso, o grande problema da oxidação do filamento ainda é algo que precisa ser resolvido. Ao ser aquecido a temperaturas elevadas, o poder de oxidação do filamento aumenta e muito. Um filamento normal de lâmpada

incandescente exposta a atmosfera comum queimaria em questão de frações de segundo. Por este motivo, as lâmpadas são dotadas de um bulbo de vidro, no qual é formada uma atmosfera não oxidante.

O vácuo não é muito utilizado por alguns motivos simples de se compreender: é mais caro produzir-se vácuo num recipiente de vidro fino do que injetar-se gases inerte, e, mais importante que isso, um filamento metálico sob baixa pressão e alta temperatura tenderia a se vaporizar, deteriorando-se rapidamente.

Usa-se na grande maioria das lâmpadas incandescentes filamentos de tungstênio, sendo que praticamente a única alternativa ao tungstênio é o carbono. “O carbono tem ponto de fusão de 3871 K e o tungstênio de 3655 K. Portanto, teoricamente, Edison estava certo quando, nas primeiras lâmpadas, utilizou filamentos de carbono.”<sup>11</sup>

Como vimos anteriormente, a baixa evaporação também é muito importante nas lâmpadas incandescentes. Neste ponto, o tungstênio leva vantagem sobre o carbono, visto que para o carbono operar com níveis aceitáveis de evaporação deve operar em temperaturas bem abaixo do ponto de fusão, cerca de 2100 K, ao passo que lâmpadas de filamento de tungstênio podem operar a cerca de 2500 a 3000 K, temperatura bem mais elevada.

A maior parte das lâmpadas incandescentes, além de utilizarem filamentos de tungstênio, utilizam dentro do bulbo “misturas de argônio e nitrogênio (em alguns casos criptônio), que criam certa pressão interna no bulbo, diminuindo a vaporização do filamento. (...) A presença desses gases, contudo, aumenta as perdas de calor por meio de convexão. Para minimizá-las, o filamento é concentrado em espiral, apresentando, desse modo, maior aquecimento mútuo e menor área de contato com o gás inerte”.<sup>12</sup>

#### **2.3.1.1 - Parâmetros**

---

<sup>11</sup> MOREIRA, Vinícius de Araújo; “Iluminação & Fotometria – teoria e aplicação”, p.59

<sup>12</sup> Idem, p. 59

Os parâmetros de fluxo luminoso, potência absorvida e vida útil da lâmpada são função da tensão aplicada sobre seus terminais. Existem estudos que mostram a variação desses parâmetros com a variação da tensão de operação. As seguintes leis empíricas foram calculadas:

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \left( \frac{V}{V_0} \right)^{3,38} \quad \frac{P}{P_0} = \left( \frac{V}{V_0} \right)^{1,54} \quad \frac{T}{T_0} = \left( \frac{V}{V_0} \right)^{0,424} \quad \frac{L}{L_0} = \left( \frac{V}{V_0} \right)^{-13,1}$$

EQUAÇÃO 4 - PARÂMETROS DE LÂMPADAS INCANDESCENTES

Onde  $V$  é a tensão de operação,  $V_0$  é a tensão nominal de operação,  $\phi$  é o fluxo luminoso produzido,  $\phi_0$  é o fluxo luminoso nominal,  $T$  é a temperatura de operação,  $T_0$  é a temperatura nominal de operação,  $L$  é a vida útil estimada da lâmpada,  $L_0$  é a vida útil estimada da lâmpada operando em condições nominais.

A título de exemplo, tomemos uma lâmpada de 100W, 1500 lm e vida de 1000h, com tensão nominal de operação de 220 V ligada, por exemplo, a uma rede com tensão de 209 V (5% a menos da tensão nominal de operação). Calculando-se os novos parâmetros dessa lâmpada, teremos um fluxo luminoso de 1261 lm (redução de 16%), potência absorvida de 92,4 W (redução de 7,6%), e vida útil de 1958 h (aumento de 95,8% da vida útil).

Da mesma forma, se submetermos a mesma lâmpada a uma rede com tensão de 231 V (5% a mais), teremos  $\phi = 1770$  lm (aumento de 18%),  $P = 108$  W (aumento de 8%) e  $L = 528$  h (diminuição de 47% da vida útil).

Variações na tensão são extremamente danosas para a lâmpada, e muito das queimas de lâmpadas incandescentes se deve a oscilações de tensão na rede. Da lei de Stephen-Boltzmann vista anteriormente, podemos ver que com o aumento da potência absorvida pela lâmpada, devemos ter um grande aumento de temperatura (grandezas relacionadas com a quarta potência).

Existe um tipo de lâmpada incandescente que opera de maneira muito similar às lâmpadas incandescentes comuns, com o porém de que estas trabalham sob temperaturas mais altas. Para conseguir isso, essas lâmpadas utilizam uma atmosfera interna de halógeno (também são conhecidas como lâmpadas halógenas) – iodo ou

bromo. Sob temperaturas da ordem de 1400 °C, o tungstênio evaporado combina-se com o iodo (ou o bromo), e não chega a se depositar nas paredes da lâmpada. Esse composto fica circulando pela atmosfera interna da lâmpada até que se aproxima novamente do filamento. Quando isso acontece, o tungstênio é novamente depositado no filamento.

Devido a este ciclo interno do tungstênio, este tipo de lâmpada pode operar sob temperaturas mais altas sem comprometimento da vida útil. Entretanto, para poder suportar temperaturas mais elevadas dos gases internos (para que o ciclo ocorra), o bulbo deste tipo de lâmpada deve estar pelo menos a 250 °C, e portanto não pode ser feito de vidro. Normalmente utiliza-se o quartzo para a construção destes bulbos, o que encarece a lâmpada.

### **2.3.2 - Lâmpadas de Descarga Elétrica**

As lâmpadas de descarga elétrica (ou fluorescentes) têm um princípio de funcionamento bastante diferente do das lâmpadas incandescentes. Neste tipo de lâmpada, a luz é gerada pela passagem de corrente elétrica através de um arco que se forma em um gás, mistura de gases ou vapores, direta ou indiretamente.

Ao serem atravessados por uma corrente elétrica, os átomos e/ou moléculas do gás são excitados e, quando retornam ao seu estado normal, emitem radiação. Essa radiação emitida tem freqüência que depende diretamente do número de camadas eletrônicas do átomo e, portanto, do tipo de átomo em si. Um átomo de neônio emite radiação em freqüências diferentes em relação a um átomo de criptônio, por exemplo.

Outro fator importante a se considerar é a freqüência da radiação emitida, que é sempre em faixas estreitas. Isto significa que a radiação emitida pode não estar compreendida dentro do espectro visível, ou mesmo que esteja em faixas muito delimitadas, produzindo luz de cor não natural.

A solução para este tipo de problema é o uso de substâncias conversoras de freqüência nas paredes do tubo de descarga, por exemplo, o fósforo. O fósforo tem a

capacidade de se excitar com freqüências fora do espectro visível (por exemplo, Ultra Violeta), e emitir radiação no espectro visível.

As lâmpadas de descarga são constituídas por “um tubo contendo gases ou vapores, através dos quais se estabelece um arco elétrico. Os gases mais utilizados são o argônio, o neônio, o xenônio, o hélio ou o criptônio e os vapores de mercúrio e sódio muitas vezes com alguns aditivos.

“A pressão do gás ou vapor dentro do tubo pode variar desde fração de atmosfera até dezenas de atmosferas. Daí podemos classificar as lâmpadas como de baixa, média e alta pressão.”<sup>13</sup>

Os eletrodos internos ao tubo de descarga são normalmente feitos de níquel, tungstênio ou nióbio, e podem ser recobertos por substâncias que facilitem a emissão de elétrons, normalmente óxidos de bário ou estrôncio.

“Uma lâmpada de descarga sempre funciona com um equipamento auxiliar (reator e em alguns casos um ignitor) ligado ao seu circuito elétrico. O reator tem como função limitar a corrente da lâmpada e o ignitor ajudar a produzir a tensão necessária para o início da descarga elétrica”.

Ao contrário de uma resistência ôhmica (que possui uma característica tensão-corrente positiva, ou seja, a intensidade da corrente aumenta com o aumento da tensão aplicada), a descarga em um gás possui uma característica negativa, ou seja, a corrente tende a diminuir quando a tensão fica superior à necessária para a manutenção do arco elétrico. Este é o fator que nos obriga a colocar uma impedância limitadora em série com a lâmpada no circuito.

Esta impedância limitadora pode ser resistiva, indutiva ou capacitiva.

O uso da impedância resistiva é limitado a aplicações nas quais se deseja reduzir o custo ou nas aplicações em corrente contínua. Normalmente, o resistor é um filamento incandescente que acaba contribuindo para o fluxo luminoso final da lâmpada (lâmpadas de luz mista). “A lâmpada, estabilizada por circuito resistivo, terá fator de potência unitário, mas sua eficiência luminosa global será diminuída devido à baixa eficiência do filamento incandescente”.

---

<sup>13</sup> Ibidem, p. 74

O método mais empregado atualmente de estabilização é por circuito indutivo (reatores). Neste caso, temos um fator de potência do conjunto baixo, pois o reator faz com que a corrente esteja atrasada em relação a tensão. A grande vantagem desta configuração é a eficiência energética elevada – as perdas são mínimas no elemento estabilizador. Entretanto, esta solução só é viável em circuitos de corrente alternada.

Um terceiro e menos utilizado método de estabilização é através de um circuito capacitivo. Assim como no caso da estabilização por elemento indutivo, o fator de potência é baixo, sendo que a corrente está adiantada da tensão aplicada. “É um circuito que se torna econômico para funcionamento em freqüências mais elevadas”, mas que perde competitividade em freqüências industriais, pois impedâncias capacitivas nestas freqüências dependem de grandes capacitâncias, o que torna o elemento estabilizador caro.

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência (transistores de potência), tornou-se possível criar elementos estabilizadores eletrônicos, capazes de operar em freqüências acima de 20 kHz, com aumento da eficiência luminosa. “Com sua utilização também teremos redução no peso e nas dimensões do equipamento, além de ser possível estabilizar variações na tensão de alimentação e minimizar o efeito estroboscópico”.<sup>14</sup>

#### 2.3.2.1 - Cor

O quesito cor é de especial importância nas lâmpadas fluorescentes, visto seu princípio de funcionamento explicado acima. Pelo fato de a maior parte da produção de fluxo radiante se dar na faixa do ultravioleta, a conversão através de fósforo, por exemplo, se faz necessária.

Assim, podemos gerar lâmpadas que produzem luz em diversas tonalidades. Desde as mais avermelhadas, até as mais esbranquiçadas e artificiais, é

---

<sup>14</sup> Ibidem, p. 79

possível gerar uma vasta tonalidade de cores através de misturas de gases, vapores e fósforo no interior da lâmpada.

#### **2.4 - Iluminação de Interiores**

Fazer a iluminação de um interior significa projetar e executar uma instalação de modo que esta possa atender as necessidades de iluminação de ambientes diversos. Na execução do projeto de iluminação, devemos ter em mente o nível de iluminamento adequado à aplicação e/ou atividade a ser conduzida neste espaço.

É razoável admitirmos que cada utilização de um ambiente demanda níveis diferentes de iluminação. Por exemplo, o planejamento e execução de um projeto de iluminação de um dormitório são incompatíveis com um outro ambiente que não seja um dormitório, ou algo com necessidades próximas. Não podemos utilizar uma mesma instalação de um dormitório num escritório, por exemplo, e muito menos em uma sala de cirurgia.

Além deste aspecto, temos que levar em conta o aspecto eficiência energética, assunto que está cada vez mais em voga com o aumento do consumo per capita de energia, escassez de fontes de energia e consequente tendência de alta nos custos da energia. Assim, temos que levar em conta um uso racional dos potenciais de iluminação dos diversos tipos de luminárias, lâmpadas, etc.

Para auxiliar no projeto de iluminação, existem normas que ilustram os níveis recomendados de iluminação para as diversas aplicações. No caso brasileiro, a norma é a NB-57, da ABNT, que indica os níveis de iluminamento recomendados (em lux):

Área	Atividade	Iluminância (lux)
Indústria Química	Geral	150
Indústria Alimentícia	Geral	250 – 500
Indústria Mecânica	Trabalho Pesado	250 – 500

	Máquinas Operatrizes	250 – 500
	Trabalho de Precisão	500 – 1000
	Trabalho Fino	1000 – 2000
Comércio	Escritórios	500 – 1000
	Datilografia	500 – 1000
	Computadores	500 – 1000
	Desenho	1000 – 2000
Escolas	Salas de Aula	250 – 500
	Laboratórios	250 – 500
	Bibliotecas	250 - 500

TABELA 2 – NORMA BRASILEIRA NB-57 / ABNT, ILUMINAMENTOS DE INTERIORES

Lembrando que 1 lux equivale a um fluxo luminoso de 1 lúmen incidindo sobre uma área de 1 metro quadrado, podemos fazer um cálculo aproximado do número de lâmpadas necessárias para iluminar um ambiente.

Por exemplo, suponhamos que temos um escritório de 50 m<sup>2</sup> para ser iluminado, e desejamos que este escritório receba uma iluminância média de 500 lux. Multiplicando-se a área do escritório pelo iluminamento (ou iluminância) desejado, temos:

$$E = \frac{\phi}{A}$$

$$\phi = E \cdot A$$

$$\phi = 500 [\text{lux}] \cdot 50 [\text{m}^2] = 25000 [\text{lux} \cdot \text{m}^2] = 25000 [\text{lm}]$$

EQUAÇÃO 5 - EXEMPLO - ILUMINAMENTO

Este seria o fluxo luminoso que deveria atingir o plano de trabalho para garantir um nível de iluminância *médio* de 500 lux. Entretanto, nem todo o fluxo luminoso emitido por uma lâmpada atinge o plano de trabalho. Uma parcela não desprezível se perde por: ineficiência das luminárias; absorção por outras superfícies (teto, paredes); nível de limpeza (manutenção) das luminárias – quanto mais tempo entre uma limpeza e outra, e também quanto mais sujo o ambiente a ser iluminado,

maior será o depósito de detritos e sujeira nas luminárias, diminuindo sua característica refletora.

Dessa forma, definem-se dois fatores: o fator de depreciação da sala (decorrente da diminuição do poder de reflexão das paredes e teto do interior, com o passar do tempo e acúmulo de poeira) e o fator de utilização (que reflete as características do ambiente – paredes, teto, piso, formas de montagem da luminária, etc.).

Incorporando estes dois fatores no cálculo do iluminamento médio, temos:

$$E = \frac{F_u F_p \phi}{A}$$

EQUAÇÃO 6 - MÉTODO DOS LÚMENS

Este é o chamado método dos lúmens, ou ainda método do Fluxo Luminoso. Ele nos proporciona uma maneira de calcular o número de luminárias para que o iluminamento médio em um recinto seja garantido. Apesar de bastante simples e rápido quando se deseja calcular o valor médio de iluminamento numa sala, este método não permite um cálculo de posicionamento de luminárias, e também não garante que o nível de iluminamento será uniforme no recinto.

Para garantir uma certa uniformidade, existem práticas que indicam modos de montagens como, por exemplo, garantir um espaçamento simétrico entre as luminárias, utilizar luminárias de foco não muito fechado, enfim, algumas indicações quase que intuitivas de o que fazer.

#### 2.4.1 - Leis de Lambert

Existem algumas leis do iluminamento que são demonstradas pela chamada equação de Lambert. São elas:

O iluminamento é diretamente proporcional à intensidade luminosa na direção do ponto considerado.

O iluminamento cai com o quadrado da distância entre a fonte luminosa e o ponto iluminado.

O iluminamento varia proporcionalmente ao coseno do ângulo formado entre a normal e a direção do raio luminoso que incide sobre o mesmo.

Para melhor exemplificar as afirmativas acima, vejamos a figura:

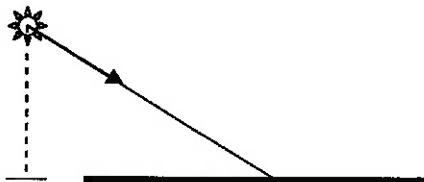


FIGURA 2 - MÉTODO PONTO A PONTO

A lei de Lambert nos diz que o iluminamento num diferencial de área horizontal em volta do ponto P será:

$$E_H = \frac{I \cdot \cos \alpha}{d^2}$$

EQUAÇÃO 7 - LEI DE LAMBERT

Mas, da figura, tiramos que:

$$h = d \cdot \cos \alpha$$

EQUAÇÃO 8 - ALTURA

Com uma manipulação algébrica simples, podemos dizer que o iluminamento no ponto P pode ser calculado por:

$$E_H = \frac{I \cos^3 \alpha}{h^2}$$

EQUAÇÃO 9 - MÉTODO PONTO A PONTO

Com estas fórmulas, “podemos calcular o iluminamento em qualquer ponto de uma superfície (iluminada por fontes puntuais), individualmente, para cada ponto luminoso que ilumine a mesma superfície”<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Ibidem, p. 22

Como o iluminamento possui a propriedade da aditividade, podemos calcular individualmente a contribuição de cada fonte luminosa para o iluminamento de um ponto, somar todas as contribuições e obter o valor preciso do iluminamento total naquele ponto. Expandindo-se o cálculo para vários pontos de um mesmo ambiente, podemos ter uma noção bastante precisa da distribuição do iluminamento na superfície de trabalho, e a partir daí, obter os iluminamentos médios, mínimo e máximo do recinto.

Obviamente o nível de detalhe (ou resolução) obtido com este método é limitado pelo número de cálculos que se pode fazer. Um cálculo manual dificilmente poderia conseguir calcular o nível de iluminamento em muitos pontos de um ambiente iluminado por muitas luminárias.

Utilizando recursos computacionais, entretanto, isto muda de figura, pois o computador consegue executar milhões de cálculos em segundos, tornando assim possível a determinação do iluminamento preciso em muitos pontos de um mesmo ambiente, iluminado por um grande número de luminárias.

#### **2.4.2 - Considerações sobre o Software**

Por ser um método muito mais preciso e que permite análises mais ricas quanto a distribuição dos níveis de iluminamento no plano de trabalho, e também por ser um método facilmente acoplado numa rotina iterativa de resolução, o método ponto a ponto será o utilizado na confecção do software.

### **3 - Algoritmos Genéticos**

#### **3.1 - Evolucionismo**

Nem sempre o conceito de evolução das espécies esteve presente no ranking de idéias consideradas naturais pelo homem. Apesar de atribuirmos

erroneamente a Charles Darwin<sup>16</sup> o início do pensamento evolutivo, este nasceu algum tempo antes, com Lamarck<sup>17</sup> e mesmo com seu próprio avô, Erasmus Darwin<sup>18</sup>.

Lamarck ficou mais conhecido hoje em dia quase que por ser um “contra exemplo” do que a teoria de Darwin propunha. Lamarck propôs uma teoria evolutiva na qual os traços e características eram adquiridos pelos seres vivos durante a vida, vindas de necessidades e hábitos, e eram transferidas à suas proles. De acordo com Lamarck, a girafa teria desenvolvido um longo pescoço para poder alcançar as folhas mais altas e tenras das árvores através de esforço contínuo e passado adiante durante as gerações.

Apesar de poder parecer uma idéia até mesmo ingênua nos dias de hoje, a obra de Lamarck tem uma importância fundamental. Apesar de não ter “acertado” no mecanismo evolutivo, Lamarck foi o primeiro a expor com clareza uma idéia de evolucionismo, contrapondo-se diretamente ao criacionismo cristão.

Até então, acreditava-se que Deus havia criado todas as espécies habitantes do Universo, e desde então estas espécies permaneceram estáticas, sem modificações, sem extinção e sem aparecimento de espécies novas.

A grande contribuição de Charles Darwin não foi, portanto, a proposição de que havia evolução nas espécies, mas sim que as espécies se modificavam através de um mecanismo por ele denominado de Seleção Natural. De acordo com Darwin, as espécies competiam umas com as outras, e o fruto desta competição era a sobrevivência do mais forte, do mais adaptado. Uma mudança no ambiente traria possibilidades para que uma outra espécie se visse melhor adaptada e assim passasse a uma condição mais favorável.

---

<sup>16</sup> Charles Darwin - 1809 – 1882 – Naturalista inglês. Responsável pela publicação em 1859 de: “*A Origem das Espécies por meios de Seleção Natural*”.

<sup>17</sup> Jean Baptiste Pierre Antoine de Monet, Chevalier de Lamarck – 1744 – 1829 – Naturalista francês. Hoje mais conhecido pelo desacordo de Charles Darwin com sua teoria, o *Lamarckismo*, que propunha o conceito de herança de características adquiridas.

<sup>18</sup> Erasmus Darwin – Avô de Charles Darwin. Considerado o primeiro cientista sério desde os gregos a propor uma idéia de evolução, ainda que bastante primitiva.

Outro ponto de extrema importância na obra de Darwin é notarmos a consciência que ele tinha de que a evolução não se dá em indivíduos, e sim nas populações como um todo, e que essas mudanças chamadas de evolução biológica transcendem o período de vida de um indivíduo.

### 3.2 - Genética

O desenvolvimento da Genética, iniciado pelos estudos com espécies de ervilhas de Mendel casou perfeitamente com as idéias de Darwin. Ou talvez o mais correto seria dizer que as idéias de Darwin se casaram com o trabalho de Mendel, pois este conduziu seus experimentos dois anos antes. Este desconhecimento fez Darwin lutar para conseguir tentar compreender o que ocorria com os organismos:

“O germe fertilizado de um dos animais superiores, sujeito como é a tão vasta série de mudanças, desde a célula germinativa até a velhice, talvez seja o objeto mais maravilhoso da natureza. É provável que dificilmente qualquer tipo de mudança que afete um dos pais não deixe alguma marca no material germinativo. Por outro lado, pela doutrina da reversão, o ovo torna-se um objeto muito mais maravilhoso pois, além das mudanças visíveis que vai sofrendo, precisamos crer que ele contenha uma infinidade de caracteres invisíveis apropriados para ambos os sexos, para os dois lados do corpo e para a extensa linhagem de machos e fêmeas ancestrais, separada do presente por centenas ou mesmo milhares de gerações; e estes caracteres, como aqueles escritos em papel com tinta invisível, permanecem prontos para desenvolverem-se sempre que a organização for perturbada por certas condições conhecidas ou desconhecidas.”<sup>19</sup>

Este trecho da obra de Darwin mostra que, apesar de incorrer basicamente no mesmo erro de Lamarck, ao acreditar que dificilmente as mudanças que afetam aos pais não modifiquem o material germinativo, e, portanto, os filhos, Darwin já tinha claros os conceitos de *genótipo* e *fenótipo*.

---

<sup>19</sup> DARWIN, Charles; “A variação dos Animais e Plantas sob domesticação”

Genótipo é o conjunto de características do “projeto” de um organismo. São todas as instruções recebidas dos pais que podem estar ativas ou latentes, isto é, podem se expressar em alguma característica externa e/ou visível, ou então pode estar latente, presente na carga genética, mas sem trazer nenhuma mudança na constituição do indivíduo, e ainda assim podendo ser transmitidas aos descendentes.

Fenótipo é o conjunto das manifestações do genótipo, ou seja, todas as características externadas. Dois indivíduos de uma mesma espécie podem ter fenótipos bastante parecidos, mas terem genótipos diferentes. Já dois indivíduos com o mesmo genótipo são praticamente idênticos (caso de gêmeos ou clones), sendo que as eventuais diferenças apresentadas se devem apenas a interações com o ambiente.

### **3.2.1 - Mecanismos Genéticos**

Para um estudo eficiente dos algoritmos genéticos, um estudo básico de genética se faz necessário. Por esta razão, faremos agora algumas explicações sobre mecanismos e definições da genética, sem a pretensão de esgotar o assunto, mas apenas de poder dar uma noção geral inicial.

#### **3.2.1.1 - Cromossomos e Genes**

Vida e DNA estão intimamente ligados. Na realidade, não se conhece vida sem a presença de DNA. O DNA (ou ácido desoxirribonucleico) é uma substância que carrega em si as informações genéticas dos seres vivos.

As moléculas de DNA que armazenam estas informações são chamadas de cromossomos. Diferentes espécies possuem diferentes cromossomos, que variam tanto em número como em forma e tamanho. O conjunto de cromossomos, que no caso humano somam 23 pares, e que dão as características físicas e até mesmo algumas psicológicas dos indivíduos, é chamado de *genoma*.

Internamente, o cromossomo é composto por uma seqüência de “bases”, ou pares de bases. “Cada par de base (ou *nucleotídeo*) é constituído por uma

purina (adenina [A] ou guanina [G]), acoplada a uma pirimidina específica (timina [T], ou citosina [C]), pareando-se A com T e C com G.”<sup>20</sup>

Todo ser vivo é codificado, portanto, por uma cadeia formada de um “alfabeto” de 4 letras, ou seja, A, T, C e G. Para efeito de estudo, o cromossomo pode ser dividido em *genes*. Um gene é uma seqüência de nucleotídeos.

### **3.2.1.2 - Reprodução**

Uma das características que classificam um ser como vivente é a reprodução. Todo ser vivo se reproduz, seja de forma assexuada ou sexuada. Em ambos os tipos de reprodução ocorre algum tipo de variabilidade genética entre prole e pais. No caso da reprodução sexuada esta variabilidade é grande, pois metade das informações genéticas vem do pai e metade da mãe.

Já no caso da reprodução assexuada, a variabilidade é muito menor, visto que a prole é cópia idêntica do pai, e a variação ocorrerá apenas quando houver *mutação*.

### **3.2.1.3 - Crossover**

O fenômeno de crossover consiste na troca de material genético entre dois cromossomos. A cadeia genética é dividida em dois ou mais segmentos, e estes segmentos são trocados entre os dois cromossomos para gerar dois cromossomos filhos.

---

<sup>20</sup> BARCELLOS, João Carlos Holland; “Algoritmos Genéticos Adaptativos: Um estudo comparativo”; p. 13

### **3.2.1.4 - Mutação**

Ao contrário da hereditariedade, que atua como uma força conservadora, mantendo as características da espécie ao longo das gerações, a mutação atua como uma força renovadora, alterando o material genético ao acaso.

No fenômeno da mutação, alguns nucleotídeos modificam-se, gerando uma nova seqüência genética, mudando, portanto o genótipo do indivíduo. Tais mudanças podem ou não refletir mudanças fenotípicas, ou seja, mudanças externas nas características individuais.

A mutação, portanto, representa a matéria prima da evolução, visto que é a única força genética capaz de criar novidades. O crossover, ao contrário, pode até mesmo gerar indivíduos diferentes e mais bem adaptados que os pais. Entretanto, a base para tal já existia separadamente em cada um dos pais, sendo apenas juntadas para maximizar o seu potencial.

## **3.3 - Os Algoritmos Genéticos**

Os Algoritmos Genéticos (AG)são métodos computacionais que simulam os princípios e processos da evolução, através da seleção natural e mecanismos genéticos (crossover e mutação), visando principalmente a resolução de problemas de otimização.

Os AG podem ser encarados como uma representação matemática simplificada das teorias de Darwin e da genética, que pode ser aplicada na resolução de problemas complexos. Num Algoritmo Genético, os indivíduos são representações de possíveis soluções de um problema, e, recombinando-se entre si e sofrendo mutações, os indivíduos competem numa simulação de um ecossistema básico onde existe apenas uma forma de vida.

Submetidos a uma função de avaliação<sup>21</sup> que mede o quanto boa é a solução dada, no decorrer das gerações os indivíduos vão ficando cada vez mais adaptados, mais próximos da solução ideal.

A grande vantagem que o Algoritmo Genético nos fornece é que a única relação entre a solução e o problema em si é a função de avaliação, podendo esta ser modificada sem ser necessário modificar o algoritmo em si. Não é preciso também saber nem calcular outras informações sobre esta função, como derivadas de primeira ou segunda ordem, como alguns métodos numéricos para cálculo de raízes de função necessitam.

O algoritmo mais simples proposto, conhecido na literatura como *Simple Genetic Algorithm* ou *Standard Genetic Algorithm* (SGA) pode ser sucintamente descrito em cinco passos:

Iniciar uma população de tamanho  $N$  com cromossomos gerados aleatoriamente

Aplicar a função de adequação em cada cromossomo da população

Propiciar a reprodução entre pares destes cromossomos, sendo que os mais adaptados terão mais chance de se reproduzir. Aplicar crossover e mutação.

Eliminar os menos adaptados da antiga população para que haja espaço para os novos elementos.

Verificar se a solução encontrada é satisfatória ou se o número máximo de gerações já foi atingido. Se a resposta for negativa, voltar ao passo 2.

### **3.3.1 - Codificação da Solução**

Um dos métodos mais utilizados para trabalhar com algoritmos genéticos é codificar os parâmetros das soluções candidatas em uma cadeia de zeros e uns. “Isso permite uma manipulação fácil e eficiente dos operadores genéticos sobre estes cromossomos”<sup>22</sup>.

---

<sup>21</sup> Também chamada de função *fitness* ou *eval* (do inglês *evaluation*)

<sup>22</sup> Idem, p. 19

Esta não é a única solução. Podemos também codificar os parâmetros como números reais, ou mesmo outras codificações que se possa pensar. Os estudos nesta área divergem um pouco, sendo que existem pessoas que defendem o uso de parâmetros reais em alguns problemas, e existem também aqueles que acreditam que os números binários levam sempre vantagem.

De qualquer maneira, a representação dos indivíduos é de extrema importância num AG, podendo significar a distinção entre um algoritmo eficiente e um fracassado.

### **3.3.2 - Função de Avaliação**

A função de avaliação ou função de adequação ou função de *fitness* tem a o papel de ligar o Algoritmo Genético ao problema propriamente dito. Esta função deve ter como entrada um indivíduo (ou seja, uma cadeia de bits ou caracteres) e como saída um valor real representando o quanto adaptado o indivíduo está.

Uma função de avaliação é dita normalizada quando seu contradomínio é igual ao intervalo  $[0,1]$ . Não é importante que uma função de adequação seja normalizada, visto que a função de adequação tem como principal função fornecer um método de se comparar os cromossomos para saber qual o mais adaptado, para que a seleção possa ser feita de maneira correta.

### **3.3.3 - Seleção**

É o processo que ocorre após a aplicação da função de *fitness* nos cromossomos. Desempenha o papel de Seleção Natural no algoritmo, selecionando os indivíduos mais aptos para a reprodução.

Existem várias maneiras de se implementar um processo de Seleção. Alguns AG's utilizam a ordenação para fazer com que seus indivíduos se reproduzam. Isto significa que, após a aplicação da função de avaliação, os cromossomos são postos em ordem decrescente de adaptação, e são reproduzidos em cascata, ou seja, o mais

adaptado se reproduz com o segundo mais bem adaptado, o terceiro com o quarto, e assim por diante.

Outro método bastante utilizado é o método da roleta. Neste método, cada cromossomo tem a chance de se reproduzir proporcional ao seu grau de adaptação. Assim, cromossomos muito adaptados tendem a se reproduzir, ao passo que os menos adaptados tendem a não passar adiante seu material genético.

Ao final, alguns elementos são eliminados para dar lugar aos novos cromossomos criados. Ao algoritmo que elimina toda a população antiga e troca por uma nova é dado o nome de *Generational GA*, ao passo que aqueles algoritmos que trocam apenas uma fração da população antiga pela nova são chamados de *Steady-State GA*.

### 3.3.4 - Reprodução

É a maneira pela qual dois cromossomos se unem para gerar dois novos cromossomos filhos. Os dois cromossomos pais são copiados, gerando dois cromossomos clones, e então são aplicados os operadores de crossover e de mutação, podendo torná-los diferentes dos pais ou não.

O processo depende então de dois parâmetros probabilísticos, que podem ser escolhidos anteriormente pelo programador ou pelo operador, que são a taxa de mutação (pm) e a taxa de recombinação (pc).

Valores usuais para estas taxas são da ordem de 0.5 a 1.0 para pc e de 0.001 a 0.02 para pm.

#### 3.3.4.1 - Crossover

Em se constatando a existência de crossover, um ponto do cromossomo (locus) é escolhido aleatoriamente. “Ambos os cromossomos são quebrados nesse mesmo ponto. A primeira parte do cromossomo A é concatenada à segunda parte do cromossomo B, formando um novo cromossomo. O mesmo ocorre com as outras

partes: a primeira parte do cromossomo *B* é ligada à segunda parte do cromossomo *A*, formando um segundo cromossomo”<sup>23</sup>.

#### **3.3.4.2 - Mutação**

Após a formação dos dois novos cromossomos, aplica-se a mutação. O operador de mutação percorre todos os elementos da cadeia genética e, no caso de verificar-se a existência de mutação, o bit ou caractere é trocado por um outro do alfabeto.

#### **3.3.4.3 – Elitismo**

Existe um conceito que é muitas vezes utilizado para preservar eventuais soluções boas encontradas de não se perderem ao acaso, por meio de uma mutação ou de um crossover num ponto particularmente ruim<sup>24</sup>. Trata-se do conceito do elitismo.

Com o elitismo, força-se que, caso o indivíduo melhor adaptado de uma geração seja menos adaptado do que o da geração anterior, o indivíduo da geração anterior “sobrevive” e entra no lugar do menos adaptado.

Este mecanismo, apesar de tornar o algoritmo menos “natural”, garante que o mesmo não irá “andar para trás”, isto é, sofrer alterações que o levem para mais longe da solução desejada.

---

<sup>23</sup> Ibidem, p. 23

<sup>24</sup> Ao efetuar uma mutação, uma lâmpada que estava ativa pode se desativar, ou vice versa, causando uma modificação drástica nas características fenotípicas do indivíduo. Além disso, pode acontecer de por acaso o indivíduo não ser selecionado para reprodução, apesar de muito bem adaptado.

## 4 – Projeto do Software

### 4.1 – Overview

O software desenvolvido está segmentado em três blocos funcionais claros e distintos, sendo eles o módulo de cálculo luminotécnico, o módulo inteligente e a interface com o usuário.

O software foi estruturado desta maneira para permitir que o desenvolvimento e os testes fossem feitos de forma independente, ou seja, que fosse possível desenvolver apenas o módulo de cálculo luminotécnico de maneira independente dos outros dois, e assim por diante. Naturalmente, num certo ponto do projeto a integração entre as partes foi não só inevitável, como também foi o objetivo. A partir de uma certa altura, o foco do projeto foi justamente o desenvolvimento da interface de comunicação entre os módulos e também o desenvolvimento de partes dos módulos que necessitavam de informações vindas do outro.

Um bom esquema básico funcional do programa pode ser descrito no esquema abaixo:

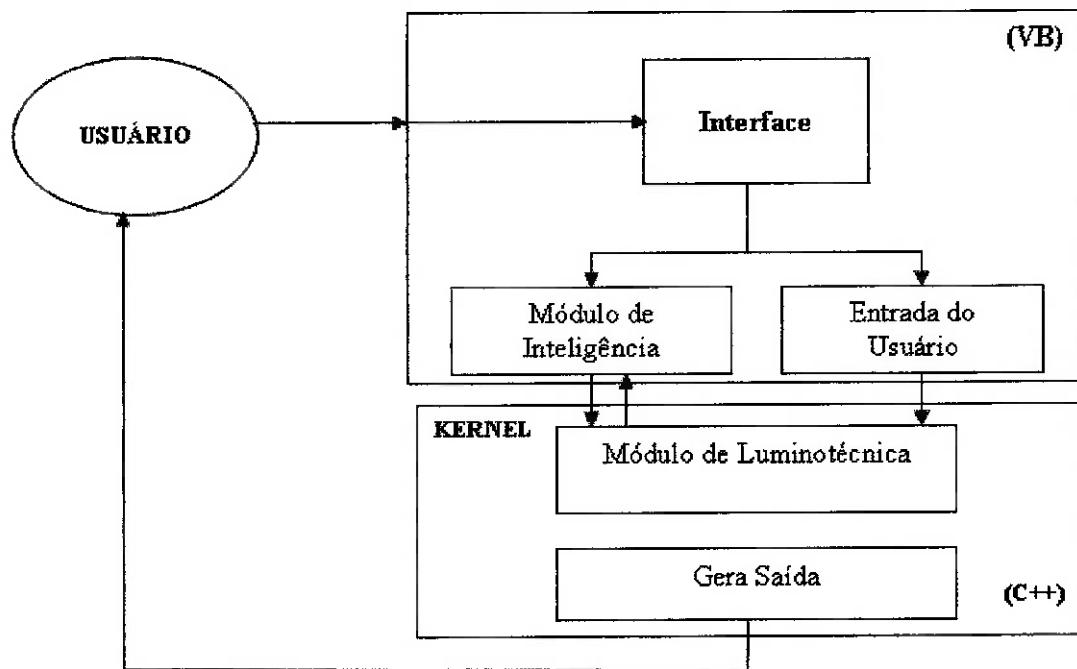


FIGURA 3 – DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAIS

Como se pode verificar no diagrama acima, o usuário insere os dados através da interface. A partir daí, o programa envia dados para o módulo de inteligência ou diretamente pela entrada do usuário, e passa a dialogar com o módulo de luminotécnica. Nova ação do usuário só é necessária quando a saída já está gerada.

#### 4.2 – *Módulo de Cálculo Luminotécnico*

O módulo de cálculo luminotécnico foi inteiramente desenvolvido em C++ e é completamente independente dos outros módulos do software. Isto significa que podemos rodar uma simulação apenas com o módulo luminotécnico, não necessitando que os outros módulos estejam rodando.

Isto se deve ao fato de que o módulo comunica-se com os outros através de arquivos. Desta maneira, podemos criar arquivos quaisquer e colocá-los como “inputs” do luminotécnico de forma absolutamente transparente ao mesmo.

#### **4.2.1 – Padrões de Entrada de Dados**

O programa, batizado de *LUMINA.EXE*, deve ser executado a partir da linha de comando da seguinte forma:

*LUMINA.EXE [arquivo de parâmetros] <GENETIC>*

No lugar de [arquivos de parâmetros] deve-se colocar o nome de um arquivo que contém a seguinte estrutura:

*[arquivo com informações da luminária]*

*[arquivo com informações da sala]*

*[arquivo com informações do posicionamento das luminárias]*

*[arquivo de saída]*

Um exemplo de arquivo de parâmetros é o arquivo *PARAMS.DAT*, gerado pela interface e pelo módulo inteligente para ativar o cálculo luminotécnico:

##### ***Arquivo: PARAMS.DAT***

*LAMP.DAT*

*ROOM.DAT*

*LAMPOS.DAT*

*OUTPUT.DAT*

Como se pode verificar, este arquivo apenas contém os endereços dos outros arquivos que serão acessados pelo programa e que, estes sim, contém as informações que serão utilizadas pelo programa. Isso permite, por exemplo, que rodemos várias vezes a mesma sala, com a mesma distribuição de luminárias, mas com luminárias diferentes. Para isso, basta rodar o programa repetidas vezes, modificando apenas o arquivo *PARAMS.DAT* para apontar para, por exemplo, *LAMP1.DAT*, *LAMP2.DAT*, etc.

Vale lembrar que o programa utiliza o sistema americano de pontuação. Desta forma, o caractere a ser utilizado para representar fração é o ponto, e não a vírgula, como utilizado no Brasil.

#### **4.2.1.1 – O Arquivo *LAMP.DAT***

O arquivo *LAMP.DAT* contém a curva fotométrica da luminária a ser utilizada pelo programa para efetuar o cálculo. Para representar a curva fotométrica, foi feita a leitura de valores da curva fotométrica para alguns ângulos, e estes valores foram inseridos de forma seqüencial no arquivo.

Como padrão, utilizou-se a parametrização de 5 em 5 graus. Isto significa que existem 35 valores, e que o primeiro valor representa o valor da curva fotométrica para o ângulo 90°, o segundo para 85°, o terceiro para 80°, e assim por diante. O valor começa no ângulo 90° pois a origem dos ângulos, o ângulo 0° é o perpendicular em relação ao solo. O arquivo contém dados então que variam do -90° ao +90°, sendo que o 0° é o valor central.

Como identificador de fim de arquivo, utilizamos a seqüência EOFOK, que representa *end of file okay*. Utilizando este identificador, temos uma segurança a mais de que o arquivo a ser utilizado não está corrompido.

#### **4.2.1.2 – O Arquivo *ROOM.DAT***

O arquivo *ROOM.DAT* contém as informações das dimensões da sala. Ele é formado pela seqüência de 5 números reais, sendo eles a dimensão X da sala, Y, Z (altura), a distância entre as luminárias e o teto e finalmente a distância entre o chão e o plano de trabalho.

Novamente, utilizamos o identificador EOFOK para assegurar que o arquivo não está corrompido.

Um exemplo de um arquivo *ROOM.DAT* pode ser visto abaixo:

**Arquivo: *ROOM.DAT***

10 10 3 .3 1.2

EOFOK

Vemos que a sala descrita no arquivo reproduzido acima tem 10 metros de largura, 10 metros de comprimento, 3 metros de altura, as luminárias estão a 30 centímetros do teto e o plano de trabalho sobre o qual será calculada a distribuição luminosa está a 1,2 metros do chão.

**4.2.1.3 – O Arquivo *LAMPPOS.DAT***

Este arquivo contém as informações do posicionamento das luminárias na sala, bem como a potência (em lumens) de cada lâmpada nas luminárias. O arquivo é iniciado com um indicador (número inteiro) de quantas lâmpadas estão descritas no seu interior. Se existirem quatro lâmpadas na sala, o primeiro número apresentado no arquivo será o número 4.

A seguir, deve existir uma seqüência de três números reais para cada lâmpada existente na sala, contendo a posição X e Y da lâmpada, e a sua potência em lumens.

Como os outros arquivos, o arquivo *LAMPPOS.DAT* também é finalizado com o identificador EOFOK.

Um exemplo de arquivo *LAMPPOS.DAT* gerado para um cálculo com quatro luminárias pode ser visto abaixo:

**Arquivo: *LAMPPOS.DAT***

4

6.015 1.064 3000

1.916 2.454 1500

2.734 6.635 2000

5.586 6.463 1000

EOFOK

#### 4.2.3 – Cálculo Luminotécnico

O cálculo luminotécnico é feito de maneira direta. A sala é dividida numa matriz de 100 x 100 elementos. Isto significa que a matriz é de dimensões proporcionais à sala, sendo que a totalidade dos 100 x 100 elementos será utilizada apenas se a sala for quadrada. Uma sala de 20 x 50 metros, portanto, utilizará 40x 100 elementos da matriz.

É executado então um laço triplo de modo a calcular o iluminamento em cada ponto referente a cada uma das lâmpadas. Este laço calcula todos os elementos de uma determinada linha para uma determinada lâmpada, depois passa para a linha seguinte, e assim por diante até completar o cálculo da matriz inteira para uma lâmpada. Após isso, passa-se para a próxima lâmpada, e calculam-se novamente todos os elementos da matriz, já se adicionando o valor obtido no laço atual aos valores obtidos nos laços anteriores (outras lâmpadas).

Podemos esquematizar o funcionamento deste laço da seguinte maneira:

Inicia o valor do contador de lâmpadas N em 0

Inicia o valor marcador da linha da matriz Y em 0

Inicia o valor marcador da coluna da matriz X em 0

Enquanto N for menor que o número de lâmpadas;

    Enquanto Y for menor que o número de linhas;

        Enquanto X for menor que o número de colunas

            Calcula o valor da iluminação referente a lâmpada N em (X,Y)

            Se X for maior que o número de colunas, X recebe 0 e Y recebe  
Y+1

            Se Y for maior que o número de linhas, Y recebe 0 e N recebe N+1

            Se N for maior que o número de lâmpadas na sala, sair do laço

O cálculo do valor de iluminância num ponto (X,Y) a partir de uma fonte localizada em  $(X_0, Y_0)$  é interessante. O programa foi concebido de modo a calcular através da Lei de Lambert qual a iluminância no ponto. Desta forma, o cálculo executado é o seguinte:

Inicialmente, calcula-se o ângulo entre a linha que une o ponto  $(X, Y)$  e a fonte de iluminação em  $(X_0, Y_0)$ , através da relação entre a distância entre os pontos e a altura entre eles. Esta distância, por sua vez, é calculada como a hipotenusa do triângulo formado pelos catetos  $(X_0, Y_0) - (X, Y)$ .

Através de um trivial cálculo trigonométrico, verifica-se que o valor do ângulo é igual ao arco cuja tangente é igual a distância entre os pontos e a altura entre eles.

A partir daí, com o ângulo calculado, interpola-se este valor entre os valores fornecidos através do arquivo *LAMP.DAT* para obtermos o valor da curva fotométrica neste ângulo. A interpolação utilizada é linear.

Com o valor do iluminamento neste ângulo, aplica-se simplesmente a Lei de Lambert. O valor da iluminação no ponto  $(X, Y)$  será igual ao produto do iluminamento neste ângulo, multiplicada pelo coseno ao cubo do ângulo, dividida pela altura ao quadrado.

#### 4.2.4 - Geração da Saída

Como saídas do programa, temos dois arquivos. O arquivo *OUTPUT.DAT* e o arquivo *OUTPUT.PPM*. O primeiro é a reprodução da matriz calculada após a última lâmpada, ou seja, a matriz com os valores da iluminância em cada ponto.

O segundo é a mesma matriz convertida num arquivo que pode ser lido por um programa de exibição de figuras. Cada valor da matriz é convertido num novo valor que varia entre 256 tons de cinza. Desta forma, a matriz de iluminamentos transforma-se numa matriz de tons de cinza, permitindo a visualização gráfica dos pontos mais e menos iluminados.

#### **4.3 – Módulo Inteligente**

O módulo inteligente foi desenvolvido em linguagem Visual Basic de forma integrada com a interface com o usuário. Basicamente, o conjunto Interface e Módulo Inteligente é responsável por obter os dados junto ao usuário, tratá-los e validá-los, para, em seguida, gerar arquivos que serão posteriormente utilizados pelo módulo luminotécnico.

O módulo inteligente utiliza-se de informações de configuração do programa (número de gerações e número de indivíduos de gerações) para seu funcionamento. Tais informações estão descritas no arquivo *DEFAULTS.DAT*. Uma descrição detalhada deste arquivo pode ser encontrada no capítulo referente à interface com o usuário.

De posse destas informações, o programa executa uma série de laços, descritos no esquema abaixo:

Inicia o valor do contador de gerações gennum em 0

Enquanto gennum for menor que o número de gerações

    Avalie cada indivíduo

    Ordene os indivíduos pela sua adaptabilidade

    Reproduza os indivíduos (gerar nova geração)

    Incrementar o número de gerações

O primeiro laço é gerado com uma população completamente aleatória. O programa gera esta população de lâmpadas criando-as em posições aleatórias (obviamente dentro dos limites da sala), e utilizando lâmpadas de potências também aleatórias.

A descrição das potências luminosa e elétrica das lâmpadas está contida no arquivo *LAMPLIST.DAT*. Este arquivo contém, no seu cabeçalho, um indicador de quantas lâmpadas estão descritas no seu interior e, em seguida, a sua potência luminosa (em lumens) e sua potência elétrica (em watts).

Para identificar depois quais foram as lâmpadas utilizadas no projeto é necessário fazer o cruzamento com a sua potência em lumens. É recomendado não

utilizar neste arquivo duas lâmpadas com o mesmo valor de iluminamento, pois assim elas ficaram idênticas dentro do projeto.

#### 4.3.1 – Função de Avaliação

A função de avaliação é uma das mais importantes no programa, visto que é o elo primordial entre o problema e o algoritmo de solução. A boa estrutura desta função, gerando resultados consistentes para a diversa gama de soluções possíveis de serem apresentadas pelo programa é fundamental para que o módulo inteligente consiga realmente distinguir soluções satisfatórias das não satisfatórias.

A função de avaliação atribui a cada indivíduo um valor (número real) entre zero e cinco, referente à adaptabilidade do indivíduo às condições dadas. Um indivíduo muito bem adaptado recebe uma “nota” maior do que um mal adaptado. Esta nota é composta de cinco parcelas, sendo elas:

- A proximidade do iluminamento médio conseguido na sala do solicitado pelo usuário.
- A uniformidade do iluminamento na sala.
- O número de lâmpadas utilizadas para obter este iluminamento
- O custo de instalação destas lâmpadas
- O custo de operação destas lâmpadas.

A diferença entre o valor do iluminamento médio obtido e o especificado no projeto é calculado da seguinte maneira:

$$MeanIllum = 1 - \left| \frac{Mean - TMean}{Mean + TMean} \right|$$

EQUAÇÃO 10 - ILUMINAMENTO MÉDIO

Onde *Mean* é o valor da média do iluminamento obtido neste indivíduo, e *TMean* é o valor alvo do iluminamento, definido no projeto.

Já a uniformidade do iluminamento da sala é calculada a partir da média do iluminamento e dos seus valores mínimo e máximo.

$$Unif = TUnif \cdot \frac{Mean + Min}{Mean + Max}$$

EQUAÇÃO 11 - UNIFORMIDADE

Onde  $TUnif$  é o peso da uniformidade no cálculo da avaliação do indivíduo (um número entre 0 e 1),  $Mean$  é o valor da média do iluminamento da sala obtido neste indivíduo,  $Min$  é o valor mínimo do iluminamento na sala e  $Max$  é o valor máximo deste iluminamento.

Desta maneira, conseguimos obter um valor que varia de zero (quando  $Min$  tende a zero e  $Max$  tende a infinito – o pior caso possível) e um (quando  $Min$  e  $Max$  tendem ao mesmo valor, que será igual a  $Mean$  – o mais uniforme possível). Este foi considerado um bom mecanismo de cálculo da uniformidade, pois leva em consideração além dos valores mínimo e máximo, o valor da média da sala. Isto é bastante interessante, pois indica o quanto próximos os valores estão da média, e não apenas se estão muito distantes um do outro.

O número de lâmpadas da instalação é obtido diretamente do projeto (do arquivo *LAMPOS.DAT*). O custo de instalação e o custo de operação são calculados a partir das informações das lâmpadas.

Cada um destes valores é multiplicado por uma constante de proporcionalidade antes de serem agregados ao valor final da adaptabilidade do indivíduo. Estas constantes são definidas pelo usuário antes de iniciado o algoritmo genético, como forma de priorizar um dos quesitos.

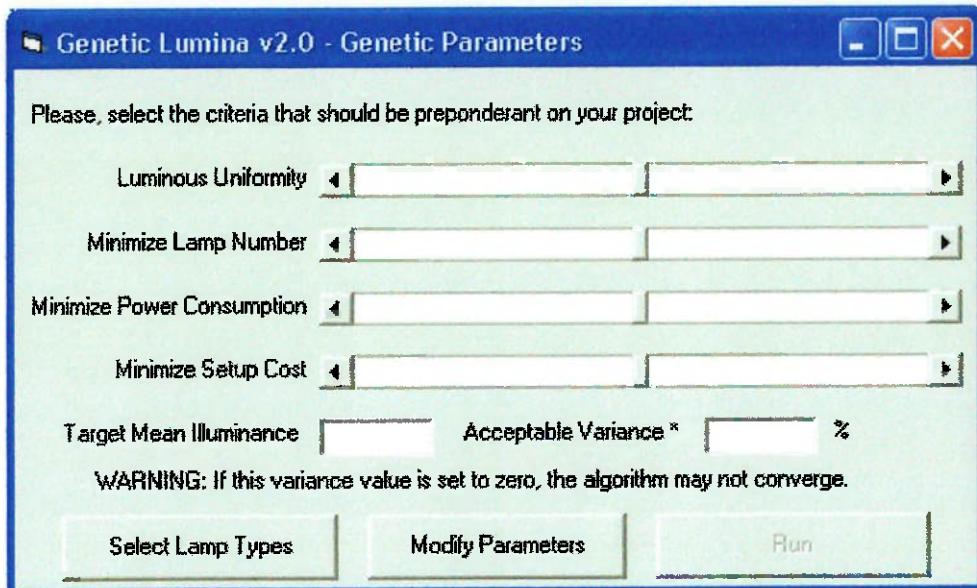


FIGURA 4 – CRITÉRIOS E PARÂMETROS

Alterando-se a relação entre as barras acima, o usuário altera o peso dos quesitos na formação da nota final de cada indivíduo. Desta forma, os projetos podem ser montados para a preponderar a uniformidade, o número de luminárias, o consumo energético ou o custo de instalação (ou qualquer combinação destes quatro).

O resultado final da função de avaliação é dado por:

$$Fitness = MeanIllum + Unif + LampNum + SetupCost + PowerCons$$

EQUAÇÃO 12 - CÁLCULO DO FITNESS

A avaliação do indivíduo então permite ao usuário configurar quais são os parâmetros mais importantes para ele. Cada indivíduo será classificado de acordo com este critério.

Para garantir que os valores apresentados de iluminamento médio estejam dentro da faixa aceitável definida pelo usuário, é feita uma verificação. Caso a diferença entre o iluminamento apresentado e o valor desejado seja superior ao tolerável estipulado pelo usuário, o indivíduo terá o seu “fitness” dividido por dez.

#### **4.3.2 – Função de Ordenação**

A função de ordenação utiliza o método *bubblesort* para ordenar os indivíduos de acordo com o seu “fitness”. Desta maneira o indivíduo que ocupa a posição 1 é sempre o mais adaptado.

Isto simplifica algumas etapas do algoritmo, mas não é algo essencial. O algoritmo funcionaria praticamente do mesmo modo se não fosse executada a ordenação.

#### **4.3.3 – Função de Reprodução**

A função de reprodução é especialmente interessante no software. É uma das peças centrais do bom funcionamento do algoritmo genético. Seu funcionamento pode ser descrito no esquema abaixo:

Executa Elitismo

Atribui a cada indivíduo uma chance de reprodução

Enquanto o contador da população for menor que o número de indivíduos

    Seleciona 2 indivíduos da população para reproduzir

    Efetua o crossover entre os dois caso necessário

    Copia os novos indivíduos para a nova matriz de geração

    Incrementa o contador de indivíduos em 2

Cada etapa da função de reprodução merece especial atenção:

#### 4.3.3.1 – *Elitismo*

O conceito de elitismo foi utilizado tal qual descrito no item 3.3.4.3. Inicialmente é feita uma comparação entre a adaptabilidade do indivíduo desta geração e o melhor adaptado de todas as gerações. Caso o mais bem adaptado desta geração seja menos adaptado do que o melhor de todos, então os últimos dois elementos da geração presente são substituídos por cópias do melhor de todos até então.

Da mesma maneira, a cada geração é verificado se o melhor adaptado é ainda melhor que o mais bem adaptado até então. Em caso de resposta afirmativa, o mais bem adaptado até então é substituído por este novo indivíduo.

O recurso do elitismo pode ser desabilitado, bastando para isso alterar-se o arquivo *DEFAULTS.DAT*<sup>25</sup>.

Verifica-se na prática que o elitismo é de fundamental importância para o bom funcionamento do algoritmo. Sem ele, o risco de se perder indivíduos bons devido a mutações deletérias ou outros problemas é suficientemente grande, capaz de fazer algumas “rodadas” não convergirem para nenhum valor aceitável por este motivo.

#### 4.3.3.2 – *Chance de Reprodução*

A cada indivíduo é atribuída uma chance de reprodução baseada na sua adaptabilidade. Este valor é acumulativo, e será utilizado para comparação com um número aleatório.

Inicialmente, é calculada a soma de todos os *fitness* na geração. A seguir, para cada indivíduo é somado o seu valor de *fitness*, dividido pela soma total, com o valor do indivíduo anterior. Por exemplo, supondo que existam quatro indivíduos na geração, e que seus *fitness* sejam, em ordem: 2; 1; 0,5; 0,5. Neste caso:

---

<sup>25</sup> O arquivo *DEFAULTS.DAT* será descrito com mais detalhes na seção referente à interface.

Indivíduo	<i>Fitness</i>	Chance de Reprodução
1	2	0,5
2	1	0,75
3	0,5	0,875
4	0,5	1

TABELA 3 – EXEMPLO DE CHANCE DE REPRODUÇÃO

Estes valores serão utilizados pelo método da roleta para selecionar os indivíduos a se reproduzir.

#### **4.3.3.3 – Método da Roleta – Roulette Wheel**

A seleção dos indivíduos que irão se reproduzir é feita através do método da roleta. Neste método, simula-se uma roleta de cassino, ou pião, na qual o cada indivíduo recebe uma chance proporcional ao seu *fitness*. Sorteia-se então um número aleatório entre zero e um, que irá percorrer todos os indivíduos.

Quando a chance de reprodução do indivíduo for maior do que o número sorteado na roleta, então este indivíduo é selecionado.

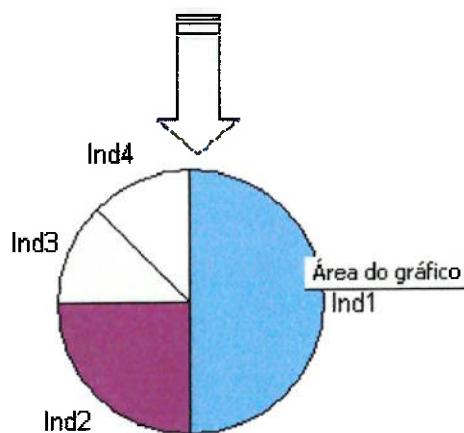


FIGURA 5 – RODA DE ROLETA

Este mecanismo simula uma roleta, onde a bola pode dar até uma volta completa, e o ângulo percorrido é um número aleatório. A área da roleta coberta por cada indivíduo é proporcional ao seu *fitness*. Desta forma, os mais bem adaptados tem chance maior de serem escolhidos do que os menos adaptados.

O segundo indivíduo “pai” é escolhido “rodando a roleta” a partir do ponto parado para o pai anterior.

#### **4.3.3.4 - Crossover**

Selecionados os dois indivíduos que serão os indivíduos “pais”, o próximo passo da função de reprodução é o crossover entre os dois. A ocorrência de crossover não é obrigatória. Existe uma chance de ocorrência ou não de crossover, definida pelo usuário.

No caso de não ocorrência de crossover, os indivíduos filhos serão cópias idênticas dos pais. Ou seja, o filho 1 será idêntico ao pai 1 e o filho 2, ao pai 2.

Caso ocorra o crossover, define-se primeiramente um ponto de crossover, isto é, a partir de qual lâmpada os indivíduos começarão a trocar informações. Desta maneira, o filho 1 é idêntico ao pai 1 até o ponto de crossover. A partir daí, será idêntico a continuação da seqüência, agora referenciada ao pai 2. O esquema pode ser melhor compreendido na figura abaixo. Supomos que o ponto de crossover seja entre as lâmpadas Lamp6 e Lamp7.

#### **PAIS**

Lamp1	Lamp2	Lamp3	Lamp4	Lamp5	Lamp6	Lamp7	Lamp8	Lamp9
<i>Lamp1</i>	<i>Lamp2</i>	<i>Lamp3</i>	<i>Lamp4</i>	<i>Lamp5</i>	<i>Lamp6</i>	<i>Lamp7</i>	<i>Lamp8</i>	<i>Lamp9</i>

#### **FILHOS**

Lamp1	Lamp2	Lamp3	Lamp4	Lamp5	Lamp6	<i>Lamp7</i>	<i>Lamp8</i>	<i>Lamp9</i>
<i>Lamp1</i>	<i>Lamp2</i>	<i>Lamp3</i>	<i>Lamp4</i>	<i>Lamp5</i>	<i>Lamp6</i>	Lamp7	Lamp8	Lamp9

FIGURA 6 – CROSSOVER

#### **4.2.3.5 – Mutação**

Assim como o crossover, a existência de mutação obviamente não é garantida. A taxa de mutação é definível pelo usuário, mas a literatura recomenda ater-se a valores baixos (próximos de 1%, e certamente não maior do que 10%). Uma taxa de mutação muito elevada pode trazer grandes efeitos deletérios para o funcionamento e convergência do algoritmo.

Existem dois mecanismos distintos de mutação. Inicialmente, o programa tenta alterar a posição X e Y da lâmpada aleatoriamente. Isso é feito somando-se e depois subtraindo-se um número aleatório entre 0 e 1 metro da coordenada X e então da coordenada Y. Isso garante que a alteração não será apenas “positiva”, mas sim positiva ou negativa, permitindo à lâmpada excursão total<sup>26</sup> dentro da sala.

Além disso, caso a nova posição da lâmpada esteja fora dos limites da sala, a função de mutação gera uma outra posição absolutamente aleatória dentro da sala. Isto também pode ocorrer aleatoriamente mesmo sem existir esta condição, com uma chance igual à chance de mutação.

A chance de a lâmpada nova (após a mutação) estar ativa ou não é de 50%. Ou seja, todas as lâmpadas que sofrem mutação têm a chance de se tornarem ativas ou inativas, independente do seu status atual.

Depois de efetuada a eventual mutação das lâmpadas, a antiga geração é substituída pela nova, e o ciclo recomeça. Novamente será calculado o *fitness* de cada indivíduo, os mesmos serão ordenados, e partirão para o processo de reprodução mais uma vez.

---

<sup>26</sup> Através da soma e subsequente subtração de um número aleatório, simulamos a soma de um número aleatório com sinal, isto é, um número que varia de -1 a +1 metro.

#### **4.4 – Interface**

A interface com o usuário foi desenvolvida em Visual Basic, juntamente com o módulo inteligente. A interface é a maneira com que o usuário troca informações com o programa, seja configurando parâmetros, inserindo informações ou mesmo recebendo informações (resultados) do software.

Tendo isto em mente, buscou-se desenvolver a interface o mais amigável possível, com recursos visuais gráficos que ao mesmo tempo facilitem o uso do programa e sejam atraentes.

##### **4.4.1 – Entrada de Dados**

A entrada de dados é feita em algumas etapas. Caso o programa esteja rodando no modo simples (sem o módulo inteligente, apenas calculando uma sala com dimensões e luminárias informadas pelo usuário), são solicitadas inicialmente as informações do recinto (dimensões X, Y, Z, altura do plano de trabalho e distância das lâmpadas ao teto) e, após isto, a localização de cada uma destas lâmpadas, assim como o tipo de luminária / lâmpada.

Rodando no modo inteligente, o programa inicialmente solicita informações quanto às dimensões da sala. Em seguida, a tela de entrada de dados dos parâmetros genéticos variáveis relativos ao projeto (relação de preponderância entre os quesitos formadores do *fitness*) é apresentada, e estas variáveis são então ajustadas.

A seguir as telas na seqüência em que são apresentadas ao usuário.

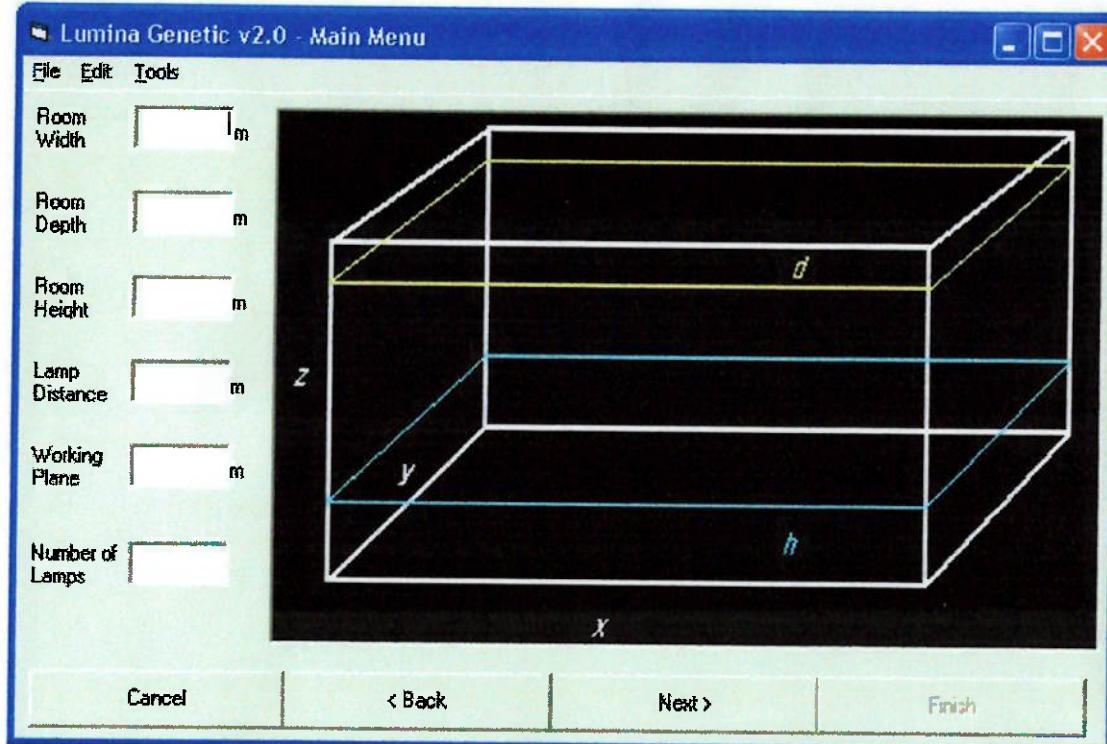


FIGURA 7 – DIMENSÕES DA SALA – MODO SIMPLES

Como descrito acima, inicialmente são solicitados as informações relativas às dimensões da sala e o número de luminárias que estarão iluminando a mesma (rodando no módulo simples, sem Algoritmos Genéticos).

Todas as medidas a serem inseridas respeitam o Sistema Internacional de pesos e medidas, e, portanto devem ser medidas em metros.

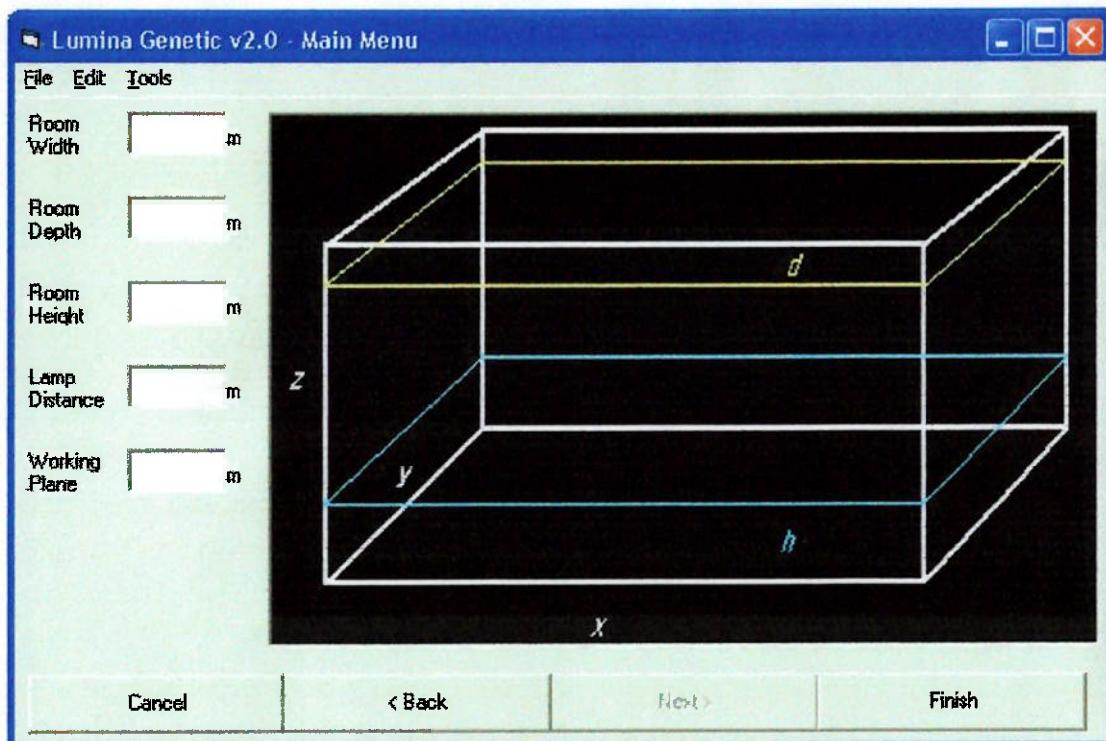


FIGURA 8 – DIMENSÕES DA SALA – MODO GENÉTICO

A figura 8 acima mostra a tela inicial de tomada de dados do programa rodando no módulo genético. São inseridas apenas as informações relativas às dimensões e não ao número de lâmpadas, pois este será determinado dinamicamente pelo programa<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> Cada indivíduo de cada geração pode trabalhar com um número diferente de lâmpadas ativas.

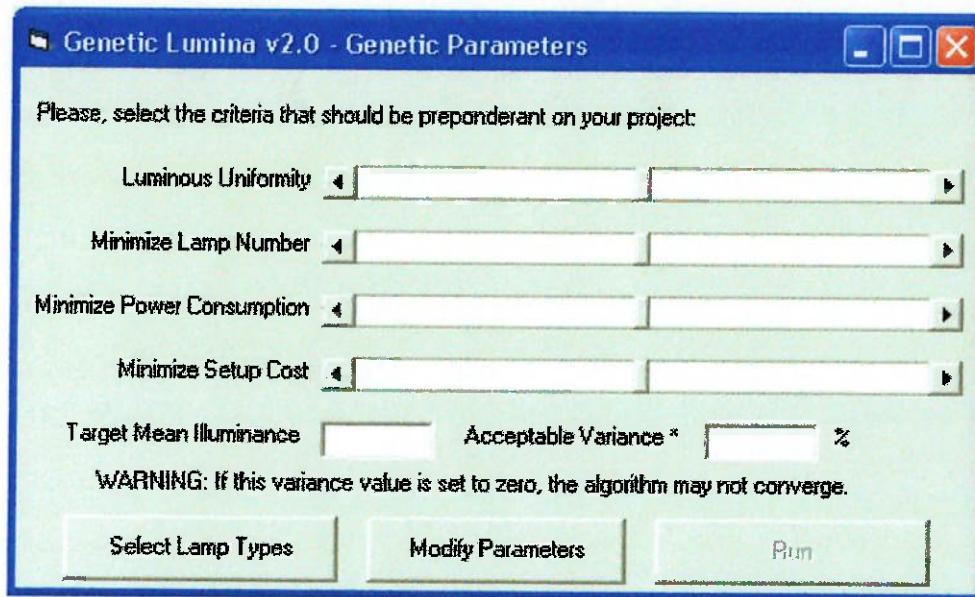


FIGURA 9 – PARÂMETROS E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

O último passo é selecionar as opções relativas aos critérios de seleção do AG. Com isso, determinamos a importância relativa dos diversos parâmetros (uniformidade, número de luminárias, consumo de energia e custo de instalação), bem como o nível de iluminamento desejado para o projeto.

#### 4.4.2 – Parâmetros (arquivo DEFAULTS.DAT)

Além das informações variáveis de projeto a projeto, algumas outras informações são perenes e mantêm-se constantes mesmo em diferentes projetos calculados. São os parâmetros genéticos, que não devem variar, o número de gerações a ser calculado, o número de indivíduos que cada geração e o número máximo de lâmpadas que deve ser utilizado em cada indivíduo<sup>28</sup>.

<sup>28</sup> O número máximo de lâmpadas é fixo pelo módulo de cálculo luminotécnico. Como este é um aplicativo distinto do módulo genético, a informação está sendo passada como parâmetro num arquivo. Desta forma, o módulo luminotécnico pode ser modificado livremente (por exemplo, pode ter sua capacidade aumentada para mais de 100 lâmpadas) sem que seja necessário recompilar o módulo inteligente para lidar com esta alteração. Basta modificar o arquivo de parâmetros DEFAULTS.DAT.

Todas estas informações estão contidas no arquivo DEFAULTS.DAT, que é manipulável internamente diretamente do programa. Para isso, basta acessar o menu “Tools”, e então “Preferences”.

Nesta tela pode-se configurar a taxa de mutação, de crossover, o número de indivíduos por geração (este número deve ser par) e o número máximo de gerações, além da presença ou não do elitismo.

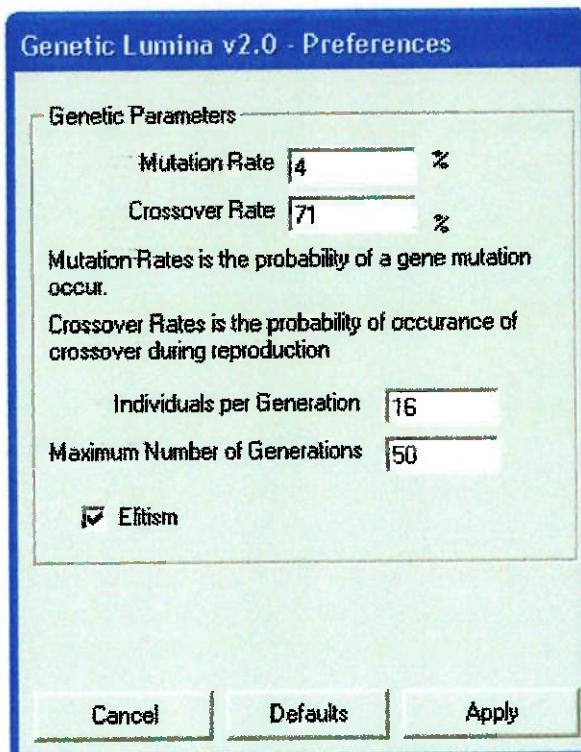


FIGURA 10 – PARÂMETROS

## 5 – Resultados Obtidos

Muitos resultados interessantes foram obtidos com algumas experiências realizadas com o software. Claramente estas experiências podem ser completadas futuramente com estudos mais profundos do software, acompanhadas de desenvolvimento e aprimoramento do mesmo..

### **5.1 – *Tempo de Processamento***

Como já era previsto, o tempo de execução deste software é grande. Num computador Athlon XP 1900+<sup>29</sup>, com 256 megabytes de memória RAM padrão DDR<sup>30</sup>, o cálculo de cada geração de 16 indivíduos demora em média 10,76 segundos. Considerando que esta média se mantém constante para qualquer número de gerações, uma rodada com 100 gerações demoraria cerca de 18 minutos, um tempo relativamente alto para softwares como este.

### **5.2 – *Qualidade dos Resultados***

O software respondeu de maneiras distintas para as várias necessidades expostas. Para salas de dimensões pequenas, a solução apresentada mais vezes foi a que podemos considerar trivial, que consiste em uma única luminária posicionada proximamente ao centro do recinto.

Para salas maiores, o software não convergiu para as soluções usuais (espaçamento igual entre luminárias). Ao invés disso, verificamos distribuições muitas vezes não simétricas, com lâmpadas menos potentes sendo utilizadas para “cobrir” os espaços mal iluminados deixados pela distribuição das lâmpadas mais potentes.

Ainda assim, todas as soluções foram satisfatórias, do ponto de vista da função de avaliação. Raras foram as vezes em que o indivíduo mais bem adaptado

---

<sup>29</sup> Athlon XP 1900+ - 1900 significa que o processador se comporta, segundo a AMD, de maneira equivalente a um Pentium 4 de 1,9 GHz. O clock do processador é, entretanto, de 1,6 GHz.

<sup>30</sup> DDR – Double Data Rate – A memória funciona enviando dois dados a cada pulso de clock, efetivamente dobrando sua velocidade. No caso a memória utilizada tem um clock de 133 MHz, que se comporta como 266 MHz.

possuía um *fitness* baixo. Isso demonstra que realmente o software otimiza o projeto luminotécnico<sup>31</sup>.

### 5.3 – Número de Gerações

O número de gerações, como esperado e mencionado na literatura, influí muito na qualidade da solução apresentada, porém de forma não linear. Isto significa que dobrar o número de gerações a serem processadas não significa dobrar o *fitness* médio dos indivíduos. Claramente existe um ponto de saturação na evolução dos indivíduos, e este ponto representa o encontro da solução melhor adaptada para a sala e condições de avaliação (função de avaliação) dadas.

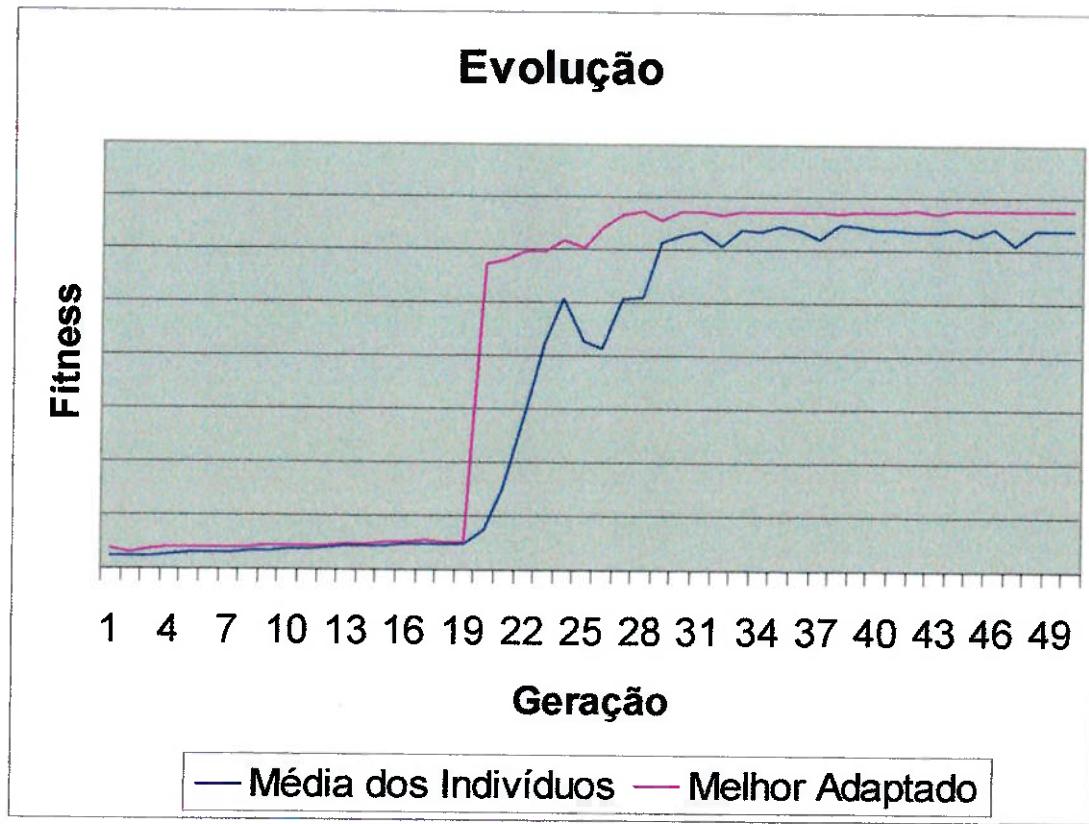


FIGURA 11 - EVOLUÇÃO

<sup>31</sup> O estudo de um caso em específico será apresentado a seguir.

A figura 11 acima ilustra um exemplo da existência da saturação. Claramente podemos ver, a partir da curva do indivíduo mais adaptada, que por volta da 19<sup>a</sup> geração do exemplo acima ocorreu uma mutação ou crossover entre dois indivíduos que gerou um filho muito bem adaptado. Deste instante até por volta da 24<sup>a</sup> geração, este indivíduo espalhou seu material genético por toda a população, dominando assim seus concorrentes.

A partir da 25<sup>a</sup> geração, entretanto, o indivíduo mais adaptado começou também a evoluir, chegando ao seu auge por volta da 30<sup>a</sup> geração. Deste momento em diante não ocorreram grandes alterações no indivíduo mais bem adaptado, nem na média do conjunto dos indivíduos.

Note-se que a média dos indivíduos sempre será igual ou menor que o *fitness* do indivíduo mais adaptado.

Neste exemplo, a evolução ocorreu através de um único salto evolucionário. É possível que mais futuramente outros saltos ocorressem, mas o mais provável é que o valor ficasse flutuando em volta deste valor (talvez a média dos indivíduos subisse um pouco mais). O importante é que, grosso modo, o auge evolucionário já havia sido atingido em menos de 50 gerações. Caso o programa tivesse sido configurado para rodar 50, 100, ou mesmo 1000 gerações, o resultado final provavelmente se manteria o mesmo<sup>32</sup>.

Aumentar o número de gerações é recomendado apenas quando se nota que o algoritmo não está conseguindo chegar a nenhum salto evolucionário, e os valores de *fitness* vêm se mantendo baixo durante todo o processamento, até o final. Nestes casos, uma maior disponibilidade de tempo (gerações) pode significar o alcance ou não de uma solução aceitável.

---

<sup>32</sup> Com o mesmo fenótipo, ou seja, com o mesmo valor de *fitness*. A real distribuição física das lâmpadas poderia ser completamente diferente, mas os efeitos combinados de uniformidade, custos, etc. seria o mesmo.

#### 5.4 – Estudo de Caso – Sala de Pequenas Dimensões

Como já visto anteriormente, o estudo de salas de pequenas dimensões não mostra nenhuma característica muito peculiar. Como esperado, a solução mais vezes apresentada é a de uma única lâmpada posicionada no centro da sala (caso esta seja quadrada), ou duas ou mais lâmpadas, caso a sala seja muito retangular (quase um corredor).

A posição do centro da sala varia ligeiramente de projeto para projeto. Por exemplo, foram efetuados os cálculos de otimização para um projeto de uma sala quadrada, de 3 x 3 x 2,5 metros, com as lâmpadas a 10 cm do teto e o plano de trabalho a 1 metro do chão. Por se tratar de uma sala pequena, foi possível efetuar o cálculo com apenas 50 gerações, e já obtivemos resultados satisfatórios.

Simulou-se, neste caso, um dormitório, onde, a princípio não é necessária uma forte iluminação (utilizamos 200 lux de iluminação<sup>33</sup> “alvo”), e manteve-se os critérios todos com pesos iguais, isto é, a obtenção de um iluminamento uniforme tem a mesma preponderância que um projeto com custo baixo, com poucas lâmpadas, etc.

Os resultados foram bastante interessantes. De dez projetos otimizados, oito continham realmente apenas uma lâmpada no centro da sala, cujas coordenadas variaram aleatoriamente, mas bastante próximas do ponto (1,5;1,5).

Os outros dois mostraram-se igualmente satisfatórios, porém com distribuições diferentes de lâmpadas. Um deles utilizou duas luminárias e privilegiou a direção horizontal para isso, conforme ilustra a figura.

---

<sup>33</sup> Vide tabela 1

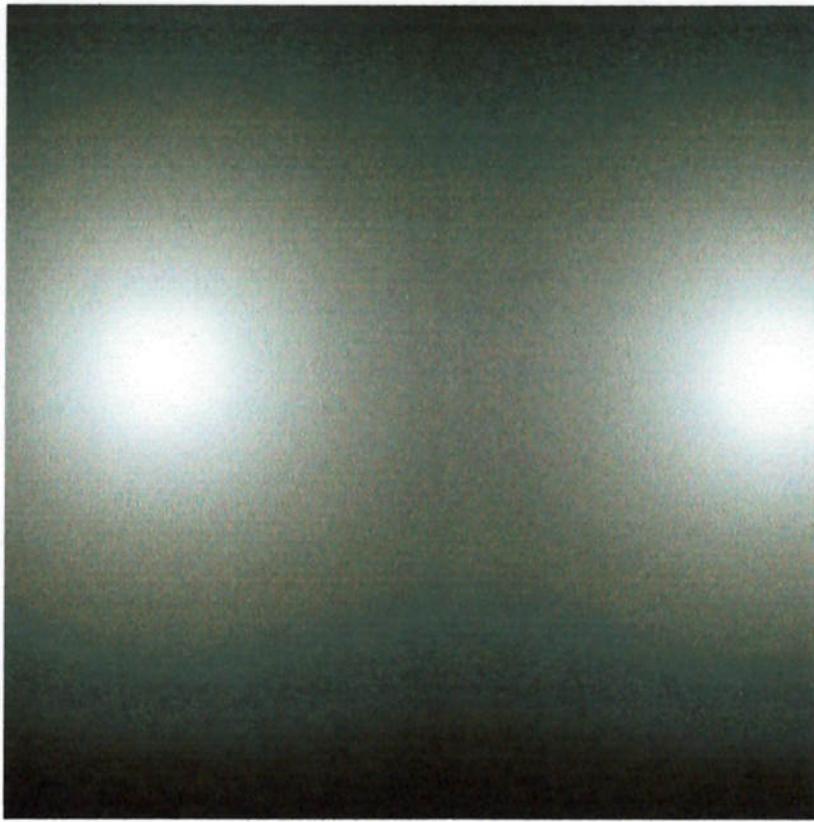


FIGURA 12 – PROJETO LUMINOTÉCNICO DE SALA DE PEQUENAS PROPORÇÕES 1

Claramente o projeto ilustrado na figura 12 acima não é simétrico. Para sê-lo deveríamos ter as luminárias colocadas um pouco abaixo de onde estão, e a luminária da direita um pouco mais ao centro. Mesmo assim o resultado acima é uma indicação boa de que o programa realmente está otimizando o processo.

O projeto gerado utilizou portanto duas luminárias, posicionadas nos pontos  $(1,324; 0,541)$  e  $(1,352 \ 2,857)$ , ambas com lâmpadas de 200 lúmens<sup>34</sup>. O projeto resultante teve uma iluminância média de 254,05 lux (cerca de 1,62% a mais do que o solicitado, algo bastante aceitável), e teve iluminância mínima de 52,99 lux no canto inferior esquerdo, e máxima de 585,04 sob as duas luminárias, como era de se esperar.

Podemos questionar a uniformidade do iluminamento, que varia de 52,99 lux a 585,04 lux. Isto ocorreu devido a inexistência de lâmpadas de menor intensidade

---

<sup>34</sup> Uma lâmpada incandescente de 200 lumens equivale (aproximadamente, dependendo do fabricante) a uma lâmpada de 25 W. Os dados foram retirados de um estudo realizado por técnicos da UNICAMP. Vide Apêndice 1

luminosa. Caso existissem lâmpadas de 10 lumens ou menos, por exemplo, caso a prioridade fosse a uniformidade do iluminamento o projeto provavelmente resultaria numa grande quantidade de pequenas luminárias por todo o teto. No limite podemos imaginar uma sala com infinitas pequenas lâmpadas cobrindo todos os pontos, cada uma emitindo apenas um diferencial mínimo de iluminamento que, integrado por toda esta área, resultaria num iluminamento absolutamente uniforme.

O outro caso que igualmente fugiu ao padrão representa um resultado semelhante ao acima detalhado. Neste caso, como no anterior, foram utilizadas duas luminárias, com lâmpadas de 200 lumens, e a solução apresentada pode ser verificada na figura abaixo:



FIGURA 13—PROJETO LUMINOTÉCNICO DE SALA DE PEQUENAS PROPORÇÕES 2

Pode-se perceber que a solução apresentada é da mesma família da solução apresentada na figura 12, apenas modificando a direção privilegiada (no caso, uma diagonal ao invés de uma horizontal).

### **5.5 – Estudo de Caso - Sala Quadrada de Grandes Dimensões**

Foi feito também estudo comparativo de salas de grandes proporções quadradas, onde possivelmente a solução trivial não é a mais indicada. O fato que notadamente se ressalta é a maior necessidade de iterações para a obtenção de uma solução satisfatória. Enquanto que, no caso da sala de pequenas dimensões, cerca de 50 gerações eram suficientes, no caso da sala de grandes dimensões esse número não pôde ser menor do que 150 gerações. Isso aumentou em muito o tempo de processamento, tanto pelo maior número de gerações quanto pelas maiores dimensões da sala, o que gerou um aumento de tempo de processamento de cada sala<sup>35</sup>.

O projeto utilizado visava a otimização de uma sala de 15mx15mx3m, com lâmpadas a 10 cm do teto, e plano de trabalho a 1 metro do chão, que deveria simular o galpão de uma fábrica onde algum trabalho de precisão mecânica seria executado. A iluminação alvo era de 1000<sup>36</sup> lux.

As soluções apresentadas utilizando-se apenas 50 gerações não foram nem um pouco satisfatórias, conforme mostra a figura abaixo:

---

<sup>35</sup> Como visto no capítulo 4.2.3, para cada lâmpada é executado um laço no software. Uma sala grande necessita de muitas lâmpadas para seu iluminamento, e, portanto, o tempo para efetuar o seu cálculo cresce.

<sup>36</sup> Conforme padronização indicada pela Tabela 2 - ABNT

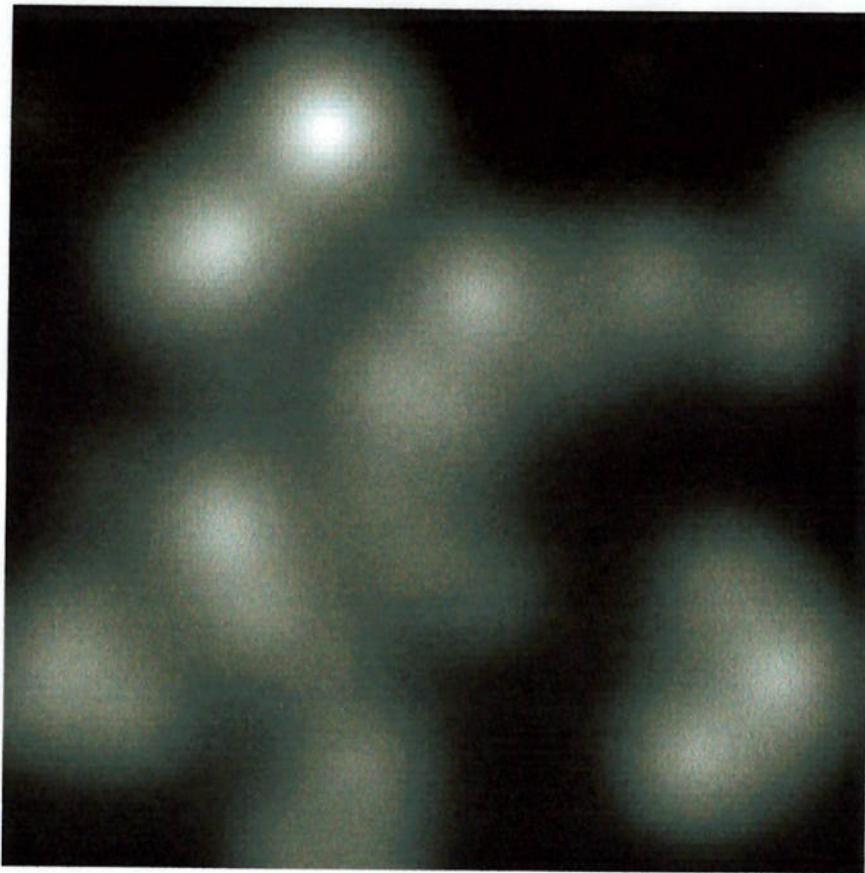


FIGURA 14 – PROJETO NÃO SATISFATÓRIO DE SALA DE GRANDES PROPORÇÕES

A solução apresentada na figura 14 acima utiliza 40 luminárias, aparentemente distribuídas de maneira completamente aleatória, com grandes áreas de concentração de lâmpadas, e ao mesmo tempo com áreas escuras, sem iluminação satisfatória.

Analizando as notas de *fitness* do caso, verificou-se que o critério número de luminárias começa a ser muito preponderante nestes casos, diminuindo e muito o valor final do *fitness*. Deste modo, este critério teve seu peso reduzido, ao passo que os outros tiveram seu peso aumentado, especialmente o critério de uniformidade da solução, para que o projeto pudesse convergir.

Modificando-se estes parâmetros, já foi possível obter um projeto ligeiramente melhor com as mesmas 50 gerações como se pode ver na figura abaixo:

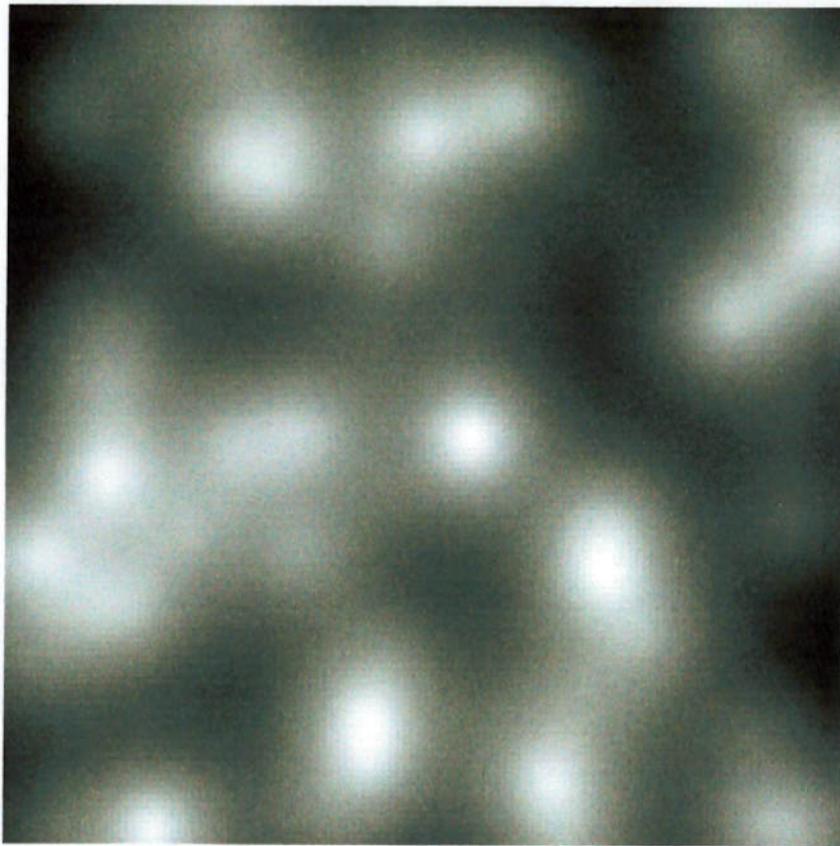


FIGURA 15 – PROJETO DE UMA SALA DE GRANDES DIMENSÕES

Apesar de poder parecer igualmente ruim, esta solução atende melhor aos requisitos de uniformidade, pois utilizou, sem nenhuma censura por parte da função de avaliação, maior número de luminárias do que a solução anterior.

Esta segunda solução utilizou 60 luminárias, distribuídas ainda de maneira aparentemente bastante aleatória, mas que conseguiu um iluminamento médio de 899,47 lux (cerca de 10% abaixo do valor ideal, o que é considerado bom, visto que a variância admissível configurada foi de 15%).

Nesta sala de grandes proporções verificamos que o número de gerações necessárias para a obtenção de um resultado minimamente satisfatório cresce com a área da sala. Os resultados começaram a se tornar mais interessantes a partir de 1000 gerações, um número absurdamente grande que solicitou um enorme tempo de processamento (cerca de 4 horas), e ainda assim não atendeu muito bem aos requisitos (como se pode verificar na figura abaixo).

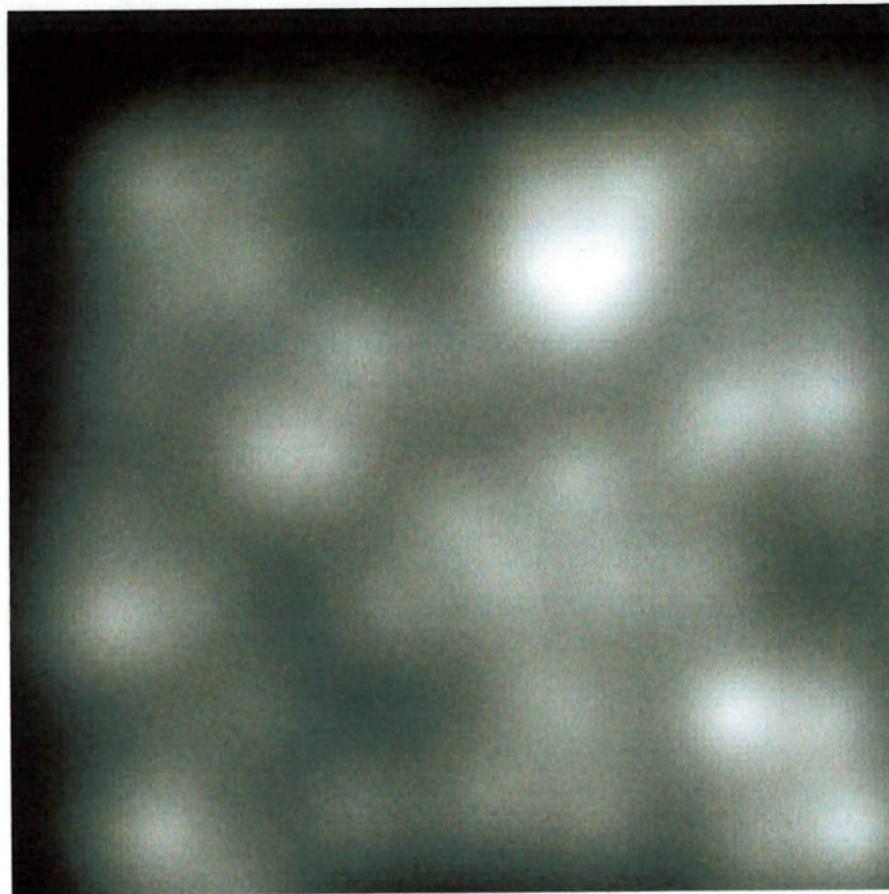


FIGURA 16 – PROJETO DE SALA DE GRANDES DIMENSÕES – APÓS 1000 GERAÇÕES

Apesar de não parecer boa esta distribuição, ela que gerou o *fitness* mais elevado de todo o conjunto das 1000 gerações de 20 indivíduos, obtendo uma iluminância média de 956,23 lux através de 49 luminárias posicionadas como indica a tabela abaixo:

X [m]	Y[m]
10.05	14.93
10.08	6.3
10.28	1.67
11.38	8.66
11.63	10
11.73	4.06
11.91	12.16
11.97	9.46
11.98	13.88
12.57	2.75
13.28	8.04
13.49	5.86
13.61	9.85

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

13.91	2.38
13.95	14.24
14.13	12.53
14.95	3.71
2.06	6.05
2.09	14.36
2.21	12.33
2.49	4.16
2.92	10.61
2.99	2.44
2.99	8.97
4.34	4.02
4.36	8.76
4.38	10.29
4.76	12.48
4.79	2.56
4.89	14.16
4.92	6.8
5.26	9.58
5.67	5.89
5.98	7.69
6.34	2
6.6	13.91
6.75	12.16
6.84	4.17
7.51	5.33
7.56	4.28
7.58	11.5
7.91	9.57
8.33	14.36
8.44	1.7
8.56	7.56
9.62	11.67
9.68	10.11
9.7	8.28
9.97	3.12

TABELA 4 -- POSICIONAMENTO DAS LUMINÁRIAS

Deste experimento com salas de grandes dimensões, pode-se concluir que o programa funciona especialmente bem para salas de pequenas dimensões, e que sua performance vai decaindo conforme as dimensões (área) da sala vai aumentando. Para compensar esta queda de performance do programa, foi necessário aumentar em muito o número de gerações a serem calculadas, para permitir que o programa encontre o máximo global da função (ou se aproxime suficientemente dele).

De certa forma este resultado era previsível. Em salas grandes, o uso de poucas luminárias é muito difícil, tanto pela quantidade de lumens que esta lâmpada deveria emitir para garantir o iluminamento médio da sala, quanto pela concentração do iluminamento todo num único ponto, o que comprometeria fortemente a uniformidade da sala.

#### **5.6 – Manipulação dos parâmetros genéticos**

Verificou-se que o elitismo realmente é algo muito importante num problema como este. O enorme número de possibilidades de distribuição de luminárias na sala faz com que crossovers e mutações possam ser extremamente deletérias.

Com base nisso, a taxa de mutação deve ser mantida baixa (abaixo de 4 porcento). Caso o elitismo não fosse utilizado, este valor deveria ser menor ainda, pois a chance de ocorrer mutação poderia destruir indivíduos bem adaptados antes que estes pudessem disseminar seu material genético pela população.

#### **5.7 – Manipulação dos Critérios de Seleção**

Manipulando-se os critérios de seleção, podem-se obter diferentes soluções para um mesmo projeto. O exemplo utilizado foi o da sala de pequenas proporções. Este projeto foi rodado duas vezes, tendo o número de lâmpadas e custo de operação como um fator preponderante (mesmo peso que a uniformidade da solução) e como um fator não preponderante (tendo seu peso próximo de zero).

Os resultados foram claros. No primeiro caso, a esmagadora maioria dos resultados obtidos eram as soluções triviais, ou seja, uma única luminária colocada no centro da sala. Apesar de o parâmetro uniformidade ser prejudicado nesta solução, o custo de operação, instalação e o número de luminárias é minimizado (apenas 1 lâmpada).

No segundo experimento, a solução apresentada já foi diferente. Em uma das soluções, obteve-se distribuições com 4 ou 5 luminárias dispostas de maneira

razoavelmente simétrica, utilizando lâmpadas de baixa potência luminosa e baixa eficiência (relação lumens / watts). Isto se explica pois estas lâmpadas (geralmente incandescentes) são as únicas capazes de fornecer baixos valores de iluminância, porém consumindo grande potência elétrica (em relação às eficientes lâmpadas de descarga).

O número de luminárias elevado também contribui para a diminuição do fitness destas soluções, caso submetidas à função de avaliação ponderada pelos pesos do primeiro experimento.

## **6 – Considerações Finais**

Do desenvolvimento e experiências executadas com o software pode-se tirar conclusões bastante interessantes sobre o mesmo. De fato, o uso de Algoritmos Genéticos otimizou de maneira bastante satisfatória projetos de pequena escala (salas consideradas de pequenas dimensões, com área de até cerca de 25 metros quadrados).

Salas com áreas médias, entre 25 e 50 metros quadrados, tiveram desempenho razoável. Alguns projetos não convergiram na primeira simulação, o que obriga o usuário a rodar o programa mais de uma vez para garantir-se de que a otimização realmente ocorreu.

Tipicamente, salas com até 25 metros quadrados convergiram (em média) em menos de 50 gerações, salas médias (de 25 a 50 ou 100 metros quadrados) convergiram em média com menos de 300 gerações, e salas grandes só convergem após 1000 gerações ou mais. Isto está diretamente ligado com o tempo de processamento, visto que para salas grandes o número de laços a serem calculados pelo módulo luminotécnico é maior (mais lâmpadas para calcular) e o número de gerações é maior.

### **6.1 – Tipos de Luminárias**

Verificou-se através de experiências com o software que os tipos de luminárias com iluminação difusa são mais indicados para salas de grandes e médias proporções, pois abrangeam uma área maior com uma lâmpada de mesma potência luminosa.

Este é um indício de que talvez o método utilizado de luminárias focadas pode não ser o mais eficiente para iluminação de ambientes fechados. Luminárias difusas com lâmpadas potentes podem ser mais eficientes e provavelmente mais confortáveis para o usuário.

### **6.2 – Convergência das Soluções**

Grosso modo, pode-se afirmar que o programa realmente otimiza os projetos a que é submetido. Os indícios disto são as previsíveis soluções apresentadas para salas de pequenas dimensões e a alternância entre “famílias” de solução de acordo com os critérios de seleção.

Naturalmente esta “evolução” se dá no sentido apontado pela função de avaliação, que pode não ser o sentido fisicamente correto, isto é, a função de avaliação pode não descrever fidedignamente os indivíduos gerados pelo algoritmo. Para se ter garantias de que a função realmente avalia corretamente os indivíduos, é necessário analisar com cuidado a função de avaliação tal qual está proposta hoje, e verificar se ela necessita de modificações ou não.

De fato, os Algoritmos Genéticos, apesar das restrições efetuadas às salas de grandes dimensões, foram um método de otimização correto a ser utilizado, pois estes conseguem tratar com o praticamente infinito espaço de soluções dos problemas, sem necessitar de um tempo de processamento igualmente infinito.

Outro aspecto positivo do uso de Algoritmos Genéticos é a sua maleabilidade. Modificar o algoritmo final significa, provavelmente, modificar a

função de avaliação. Isto é uma parte pequena e localizada do software, e, portanto facilmente identificável e modificável.

### ***6.3 – Aprimoramentos Futuros***

Algumas melhorias podem ser propostas desde já a este projeto, sendo que as mais relevantes são a melhoria do tempo de processamento, talvez implementando o módulo genético em C++ e interligando-o ao módulo de cálculo luminotécnico dinamicamente (através de uma DLL, por exemplo)

Na parte específica da luminotécnica, existem também melhorias a serem efetuadas. Por exemplo, o programa só tem capacidade para trabalhar com fontes luminosas puntiformes. A tecnologia atual, entretanto, utiliza lâmpadas de descarga (arco) que podem ser mais bem representadas por segmentos, e não pontos, ou seja, a fonte luminosa como tendo uma dimensão muito maior que as outras duas. Incorporar tais características das lâmpadas no projeto luminotécnico significa tornar as soluções apresentadas muito mais fidedignas ao que irá ser obtido numa montagem real.

Um outro adicional que poderia tornar o software muito mais real seria a incorporação das reflexões, tanto nas paredes como no teto e no chão para efeito do cálculo luminotécnico. Isto implicaria certamente num aumento considerável do tempo de processamento, visto que para cada reflexão a ser calculada teremos um novo laço a ser executado para cada lâmpada.

Externalizar a função de avaliação pode ser também interessante. Torná-la customizável pelo usuário poderia modificar drasticamente o desempenho do software, pois o ponto nefrágico do mesmo (a função de avaliação) poderia ser editado diretamente pelo usuário. Isto facilitaria também o desenvolvimento futuro que se limite em alterar a função de avaliação, que hoje encontra-se compilada e dentro do software.

Estas são apenas algumas sugestões dentro de um conjunto delas. Naturalmente, o desenvolvimento deste programa (e de softwares em geral) não

termina, pois novas tecnologias, tanto de programação quanto funcionais, e novas necessidades surgem com o passar do tempo.

Mesmo assim, conclui-se que os objetivos foram em sua grande maioria alcançados, e que o produto final deste projeto é um software funcional, útil e passível de um considerável volume de estudos adicionais que podem ser efetuados a posteriori. Além disso, trata-se de um software que de fato otimiza os projetos propostos, com todas as ressalvas expostas no capítulo 6.2.

## **Apêndice 1 – Relação Potência x Iluminância<sup>37</sup>**

### ***Lâmpadas Incandescentes***

<b>Potência Elétrica Nominal (W)</b>	<b>Fluxo Luminoso Nominal (lm)</b>
25 W	190 a 260 lm
40 W	370 a 490 lm
60 W	640 a 820 lm
75 W	840 a 1080 lm
100 W	1210 a 1540 lm
150 W	2220 a 2410 lm
200 W	3150 a 3420 lm

### ***Lâmpadas Fluorescentes Compactas***

<b>Potência Elétrica Nominal</b>	<b>Fluxo Luminoso Nominal (lm)</b>
9 W	400
11 W	600
15 W	900
20 W	1200
23 W	1500

### ***Lâmpadas Fluorescentes Tubulares com Reatores Convencionais***

<b>Potência Elétrica Nominal (W)</b>	<b>Fluxo Luminoso Nominal (lm)</b>
20 W	650 a 1380

<sup>37</sup> Fonte – ANEEL: <http://www.aneel.gov.br>

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

***DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS***

32 W	2500 a 2900
40 W	1700 a 3150
2x65W	2800 a 4500
2x110W	8300

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

## **Índices**

### **Índice de Figuras**

FIGURA 1 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO .....	9
FIGURA 2 - MÉTODO PONTO A PONTO .....	24
FIGURA 3 – DIAGRAMA DE BLOCOS FUNCIONAIS.....	36
FIGURA 4 – CRITÉRIOS E PARÂMETROS .....	45
FIGURA 5 – RODA DE ROLETA .....	48
FIGURA 6 – CROSSOVER .....	49
FIGURA 7 – DIMENSÕES DA SALA – MODO SIMPLES .....	52
FIGURA 8 – DIMENSÕES DA SALA – MODO GENÉTICO.....	53
FIGURA 9 – PARÂMETROS E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO .....	54
FIGURA 10 – PARÂMETROS .....	55
FIGURA 11 - EVOLUÇÃO .....	57
FIGURA 12 – PROJETO LUMINOTÉCNICO DE SALA DE PEQUENAS PROPORÇÕES 1.....	60
FIGURA 13 – PROJETO LUMINOTÉCNICO DE SALA DE PEQUENAS PROPORÇÕES 2 .....	61
FIGURA 14 – PROJETO NÃO SATISFATÓRIO DE SALA DE GRANDES PROPORÇÕES .....	63

### **Índice de Tabelas**

TABELA 1 – ILUMINÂNCIAS RECOMENDADAS.....	13
TABELA 2 – NORMA BRASILEIRA NB-57 / ABNT, <i>ILUMINAMENTOS DE INTERIORES</i> .....	22
TABELA 3 – EXEMPLO DE CHANCE DE REPRODUÇÃO.....	48
TABELA 4 – POSICIONAMENTO DAS LUMINÁRIAS .....	66

### **Índice de Equações**

EQUAÇÃO 1 - EFICIÊNCIA LUMINOSA.....	12
EQUAÇÃO 2 - LEI DE STEPHEN - BOLTZMANN .....	15
EQUAÇÃO 3 - TEMPERATURA DE OPERAÇÃO - EXEMPLO.....	15
EQUAÇÃO 4 - PARÂMETROS DE LÂMPADAS INCANDESCENTES .....	17
EQUAÇÃO 5 - EXEMPLO - ILUMINAMENTO.....	22
EQUAÇÃO 6 - MÉTODO DOS LÚMENS .....	23
EQUAÇÃO 7 - LEI DE LAMBERT .....	24

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**

EQUAÇÃO 8 - ALTURA.....	24
EQUAÇÃO 9 - MÉTODO PONTO A PONTO .....	24
EQUAÇÃO 10 - ILUMINAMENTO MÉDIO .....	43
EQUAÇÃO 11 - UNIFORMIDADE.....	44
EQUAÇÃO 12 - CÁLCULO DO <i>FITNESS</i> .....	45

## **Bibliografia**

MOREIRA, Vinícius de Araújo; “Iluminação & Fotometria: teoria e aplicação”, Edgard Blücher, 1987

GARCIA JUNIOR, Ervaldo; “Luminotécnica”, Érica, 1996

GOLDBERG, David E.; “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.; 1989

RAWLINS, Gregory J. E.; “Foundations of Genetic Algorithms”, Morgan Kaufmann Publishers, 1991

BARCELLOS, João Carlos Holland; “Algoritmos Genéticos Adaptativos: Um estudo comparativo”; EPUSP – Dissertação de Mestrado; 200