

Luciana Monticelli de Melo

Sustentabilidade Inteligente

Otimização da Edificação com o uso de Algoritmos Genéticos

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-graduação em Métodos de Apoio à Decisão do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Dr. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco

Rio de Janeiro
Março de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



Luciana Monticelli de Melo

Sustentabilidade Inteligente

Otimização da Edificação com o uso de Algoritmos Genéticos

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Métodos de Apoio à Decisão do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Marcos Martins Borges

UFJF

Dra. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Dra. Karla Tereza Figueiredo Leite

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de Março de 2009

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

Luciana Monticelli de Melo

Graduou-se em Arquitetura e Urbanismo na Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, 1997.

Ficha Catalográfica

Melo, Luciana Monticelli de

Sustentabilidade Inteligente : Otimização da Edificação com o uso de Algoritmos Genéticos / Luciana Monticelli de Melo; orientador: Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco. — 2009.

76 f.: il.(color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Computação Evolucionária. 3. Algoritmos Genéticos. 4. Simulador de Energia EnergyPlus. 5. Sustentabilidade. 6. Eficiência Energética. I. Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais e meu irmão, pelo incentivo e por serem sempre exemplos a se
seguir.
Ao André, pela paciência, carinho, ajuda e ensinamentos.

Agradecimentos

Ao meu orientador Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco, pelo apoio, pelo incentivo, pelas idéias empreendedoras e pelo suporte para o desenvolvimento deste trabalho ao longo destes dois anos.

À Capes e à PUC–Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus colegas da PUC–Rio.

Aos meus pais, irmão e família.

Aos professores Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco e Marley Vellasco, que me ofereceram a oportunidade desta cooperação.

Aos amigos do laboratório de Inteligência Computacional Aplicada - ICA, pelo apoio moral.

Ao André, por tudo.

Resumo

Melo, Luciana Monticelli de; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti. **Sustentabilidade Inteligente**. Rio de Janeiro, 2009. 76p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O crescente consumo de energia é preocupante, principalmente pelo uso de sistemas de condicionamento de ar e de iluminação artificial. Nas edificações modernas, os projetos arquitetônicos vêm negligenciando os fatores que proporcionam o conforto ambiental. Baseando-se nos conceitos da arquitetura sustentável, esta dissertação propõe e modela um sistema que otimiza os parâmetros da edificação que influenciarão no consumo de energia elétrica, nos custos com a construção e na emissão de poluentes pela edificação. Propõe-se um modelo de algoritmos genéticos que, juntamente com um programa de simulação de energia, EnergyPlus, constitui o modelo evolucionário desenvolvido neste trabalho. Este modelo otimiza parâmetros como: dimensionamento de aberturas e de pé-direito; orientação da edificação; condicionamento do ar; disposição de árvores no entorno da edificação; etc. O modelo evolucionário tem sua ação e eficácia testados em estudo de casos – edificações desenhadas por projetista –, em que se alteram: espessura das paredes, altura de pé direito, largura de janelas, orientação quanto ao Norte geográfico, localização de elementos sombreantes (árvores), uso ou não de bloqueadores solares. Estes fatores influenciarão no conforto térmico da edificação e, conseqüentemente, no consumo elétrico dos sistemas de condicionamento de ar e de iluminação artificial, que por sua vez, influenciam os parâmetros que se pretende otimizar. Os resultados obtidos mostram que as otimizações feitas pelo modelo evolucionário foram efetivas, minimizando o consumo de energia pelos sistemas de condicionamento de ar e de iluminação artificial em comparação com os resultados obtidos com as edificações originais fornecidas pelo projetista.

Palavras-chave

Computação evolucionária; algoritmos genéticos; simulador de energia EnergyPlus; sustentabilidade; eficiência energética.

Abstract

Melo, Luciana Monticelli de; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti (Advisor). **Buildings Energy Efficiency–Building Optimization using Genetic Algorithms**. Rio de Janeiro, 2009. 76p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The continuous rising on energy consumption is a concerning issue, especially regarding the use of air conditioning systems and artificial lighting. In modern buildings, architectural designs are neglecting the factors that provide environmental comfort in a natural way. Based on concepts of sustainable architecture, this work proposes and models a system that optimizes the parameters of a building that influence the consumption of electricity, the costs with the building itself, and the emission of pollutants by these buildings. For this purpose a genetic algorithm model is proposed, which works together with an energy simulation program called EnergyPlus, both comprising the evolutionary model developed in this work. This model is able to optimize parameters like: dimensions of windows and ceiling height; orientation of a building; air conditioning; location of trees around a building; etc. The evolutionary model has its efficiency tested in case studies – buildings originally designed by a designer –, and the following specifications provided by the designer have been changed by the evolutionary model: wall thickness, ceiling height, windows width, building orientation, location of elements that perform shading function (trees), the use (or not) of sun blockers. These factors influence the building's heat comfort and therefore the energy consumption of air conditioning systems and artificial lighting which, in turn, influence the parameters that are meant to be optimized. The results show that the optimizations made by the evolutionary model were effective, minimizing the energy consumption for air conditioning systems and artificial light in comparison with the results obtained with the original buildings provided by the designer.

Keywords

Evolutionary computation; genetic algorithms; EnergyPlus energy simulator; sustainability; energy efficiency.

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Motivação	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Contribuições	13
1.4	Descrição do Trabalho	14
1.5	Organização do Trabalho	15
2	Fundamentos Teóricos	16
2.1	Algoritmos Genéticos	16
2.2	Simulador de Energia EnergyPlus (EP)	27
2.3	Sustentabilidade, Conforto Térmico e Eficiência Energética	29
2.4	Etapas de um projeto arquitetônico que prioriza a eficiência energética	39
3	Modelo Evolucionário para Sustentabilidade Inteligente	42
3.1	Objetivos da Otimização	44
3.2	Cromossomo do Modelo Ideal	45
4	Estudo de casos	48
4.1	Definição do Cromossomo	48
4.2	Função de Avaliação	50
4.3	Esquema da otimização	50
4.4	Estudo de Caso 1	51
4.5	Estudo de Caso 2	61
4.6	Resultados Comparativos	69
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	72
5.1	Conclusões	72
5.2	Trabalhos Futuros	73
	Referências Bibliográficas	74

Lista de figuras

1.1	Esquema do funcionamento do modelo	15
2.1	Ciclo do Algoritmo Genético	20
2.2	<i>Crossover Uniforme</i>	25
2.3	Gerenciador de Simulação Integrada	30
2.4	Condução, radiação, convecção	34
2.5	Consumo de energia por equipamentos em uma residência	36
2.6	Absorção, Reflexão e Transmissão da radiação solar por um vidro	39
2.7	Esquema de projeto	40
3.1	Estrutura do modelo proposto.	42
4.1	Parâmetros otimizados pelo cromossomo do modelo ideal – Casa Kaufmann (ou Casa da Cascata) – Projeto de Frank Lloyd Wright, 1936	49
4.2	Definição do Cromossomo	49
4.3	Otimização	51
4.4	Casa Original – Estudo de Caso 1 – Perspectiva	52
4.5	Casa Original – Estudo de Caso 1 – Planta Baixa	53
4.6	Teste 1 – Perspectiva	54
4.7	Teste 1 – Planta Baixa	55
4.8	Resultado Teste 1 – Algoritmo Genético e Busca Aleatória	55
4.9	Teste 2 – Perspectiva	57
4.10	Teste 2 – Planta Baixa	57
4.11	Teste 3 – Perspectiva	59
4.12	Teste 3 – Planta Baixa	59
4.13	Teste 4 – Perspectiva	61
4.14	Teste 4 – Planta Baixa	62
4.15	Casa Original – Estudo de Caso 2 – Perspectiva	63
4.16	Casa Original – Estudo de Caso 2 – Planta Baixa	63
4.17	Casa Original com Àrvore – Estudo de Caso 2 – Planta Baixa	64
4.18	Casa Original com Àrvore – Estudo de Caso 2 – Planta Baixa	64
4.19	Teste 5 – Perspectiva	65
4.20	Teste 5 – Planta Baixa	66
4.21	Teste 6 – Perspectiva	67
4.22	Teste 6 – Planta Baixa	68
4.23	Teste 7 – Perspectiva	69
4.24	Teste 7 – Planta Baixa	70

Lista de tabelas

2.1	Representação na base 2	21
2.2	Atividades e Calor Sensível	35
2.3	Níveis de Iluminação	38
4.1	Valores médios de consumo – Teste 1	55
4.2	Valores médios de consumo – Teste 2	57
4.3	Valores médios de consumo – Teste 3	59
4.4	Valores médios de consumo – Teste 4	60
4.5	Valores médios de consumo – Teste 5	65
4.6	Valores médios de consumo – Teste 6	67
4.7	Valores médios de consumo – Teste 7	69
4.8	Valores médios de consumo – Resultados Comparativos	70

1

Introdução

1.1

Motivação

O consumo de energia elétrica vem crescendo ao longo dos anos, crescimento este que teve seu ponto culminante após a Segunda Guerra Mundial, causado pela expansão das técnicas construtivas e pela abundância de combustível barato. Os novos edifícios, por sua vez, eram caixas de vidro em que não havia preocupações com o consumo de energia. O *International Style*, estilo arquitetônico das décadas de 1920 e 1930, que primava pela arquitetura funcionalista e cujo estilo era facilmente adaptável a todos os países, foi banalizado. Fatores importantes como o conforto térmico e acústico e a iluminação natural passaram a ser deixados de lado, uma vez que os mesmos passaram a ser oferecidos através do uso de condicionadores de ar e de iluminação artificial, sem sequer procurar adaptar a construção ao seu entorno. Preocupações ecológicas também não eram relevantes.

Porém, na década de 70, houve um grande aumento no preço do petróleo, causando a primeira crise de energia. Surgiram ramos na arquitetura compostos por alguns arquitetos preocupados com o alto consumo de energia e com a desconsideração referente às questões de conforto. Tais ramos são (Corbella2003):

1. “Arquitetura Solar”, que objetivava incorporar a energia solar às edificações;
2. “Arquitetura Bioclimática”, que buscava integrar a edificação ao clima local, revalorizando as questões outrora esquecidas de conforto ambiental – que abrange conforto térmico, acústico e luminoso;
3. “A Arquitetura Sustentável”, que é “a continuidade mais natural da Bioclimática, considerando também a integração do edifício à totalidade do meio ambiente, de forma a torná-lo parte de um conjunto maior. É a arquitetura que quer criar prédios objetivando o aumento da qualidade de vida do ser humano no ambiente construído e no seu entorno, integrando as características da vida e do clima locais, consumindo a menor quantidade de energia compatível com o conforto ambiental, para legar um mundo menos poluído para as futuras gerações.”

A arquitetura sustentável avalia a energia que é consumida nos sistemas de climatização e iluminação artificial das edificações, estuda novas tecnologias para a sustentabilidade ambiental, incluindo materiais e técnicas construtivas, conforto ambiental, eficiência energética, recursos para a construção e operação da edificação. Estes pontos são levantados e abordados de forma a auxiliarem na proposição de construções que causem o menor impacto ambiental possível, economizando energia elétrica, aproveitando a insolação, a ventilação e a iluminação natural, e o uso de materiais construtivos de forma mais consciente.

Vários trabalhos foram feitos na área de arquitetura sustentável, como por exemplo, em (Meier2002), em que os autores definem os critérios do que é um edifício eficiente em termos de energia. Em (Gligor2006), são feitas considerações sobre os fatores que levam a um consumo otimizado de energia. Em (Pereira2005), o autor mostra quais os parâmetros de uma construção que têm impacto direto na eficiência energética de uma edificação.

Neste trabalho, pretende-se eliminar o processo de tentativa e erro, por parte do projetista, na definição de parâmetros que devem ser considerados no desenvolvimento de um projeto arquitetônico. Para resolver esta questão, faz-se uso de algoritmos genéticos para se encontrar a melhor configuração para estes parâmetros. Desta forma, busca-se solucionar o problema de custo computacional e de tempo despendido no processo de definição dos parâmetros necessários para a obtenção da melhor solução. Para este fim, utiliza-se um simulador de energia, o EnergyPlus, que é um software desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos – Eficiência Energética e Energia Renovável (U. S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy). Desenvolvendo um modelo que utiliza o simulador de energia EnergyPlus e algoritmos genéticos, busca-se uma solução que prime por: 1) diminuir o consumo de energia de uma edificação; 2) diminuir o custo com materiais de construção; 3) fornecer melhor solução de localização e orientação de uma edificação em um determinado terreno; 4) fornecer um melhor dimensionamento de aberturas (janelas/portas); 5) fornecer um melhor dimensionamento do pé-direito; 6) fornecer uma melhor especificação de materiais de construção; 7) fornecer uma melhor solução referente a sistemas de condicionamento de ar (para aquecimento ou refrigeração); 8) estudar a melhor distribuição de árvores no entorno da edificação (Barbedo2005, Ooka2008) que, por sua vez, funcionam como anteparo à edificação no que concerne à insolação.

1.2

Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo que utiliza Algoritmos Genéticos juntamente com um simulador de cálculo de energia, o EnergyPlus, que

seja capaz de solucionar as seguintes questões:

- tempo despendido no processo de definição dos parâmetros a serem utilizados no simulador;
- alto consumo de energia em uma edificação;
- dimensionamento de aberturas (janelas);
- alto custo de materiais de construção;
- localização e orientação da edificação no terreno;
- dimensionamento de pé-direito visando melhor ventilação;
- condicionamento de ar;
- especificação de materiais;
- disposição, tamanho e número de árvores no entorno da construção.

Para comprovar a eficiência do método desenvolvido, o mesmo será aplicado em estudo de casos.

1.3

Contribuições

Este trabalho oferece uma alternativa para o projeto de uma edificação que possa apresentar benefícios ambientais e ao próprio usuário, tais como:

- melhor aproveitamento da ventilação natural;
- melhor aproveitamento da iluminação natural, por um período mais longo do dia, em relação às edificações tradicionais;
- custo construtivo reduzido;
- melhor dimensionamento e funcionalidade das aberturas (janelas e portas);
- melhor disposição da edificação no terreno, tirando proveito da insolação e do movimento do sol ao longo do ano;
- diminuição do consumo de energia.

1.4

Descrição do Trabalho

O objetivo fundamental deste trabalho é propor e modelar um sistema para otimizar os parâmetros de uma construção com o intuito de minimizar os custos ambientais, de energia e da própria construção. Esta otimização se dá através de algoritmos genéticos (AG), que interagem com um sistema de simulação, o EnergyPlus (EP), que realiza os cálculos necessários para se medir a qualidade das soluções propostas pelo AG.

A pesquisa para o desenvolvimento deste trabalho está estruturada de acordo com os seguintes passos: 1) levantamento do material teórico sobre os temas referentes a conforto ambiental (com maior ênfase ao conforto térmico), arquitetura sustentável, sustentabilidade e eficiência energética; 2) estudo sobre o funcionamento do simulador de energia EnergyPlus; 3) definição do modelo evolucionário; 4) interação entre o simulador e o modelo evolucionário, desenvolvendo um modelo genérico; 5) aplicação do modelo genérico em estudo de casos para que se possa verificar sua eficácia.

O estudo dos temas sobre conforto ambiental (Cruz1974, Cruz1982, Frota2000, Romero2001), arquitetura sustentável (Corbella2003, Gonçalves2006, SueRoaf2006), sustentabilidade (Afonso2006, Agenda1994, Cunha2006) e eficiência energética (Caldas2008, Conner2009, Lamberts1997) consistiu no levantamento de material teórico sobre o assunto, além de material referente ao estudo das soluções arquitetônicas (Brown2007, Montenegro1996, Romero2001, SueRoaf2006) que se pode adotar para resolver os problemas de edificações cujo conforto térmico, sustentabilidade e eficiência energética tenham sido negligenciados.

O estudo do funcionamento do simulador EnergyPlus, baseado em seu manual (Energy2008) fornecido juntamente com o software, permitiu que a definição dos parâmetros e dados necessários para uma correta simulação fosse realizada.

A definição do modelo do algoritmo genético consistiu na definição da representação do cromossomo, da função de avaliação e dos operadores genéticos.

A otimização pode se dar com relação ao consumo de eletricidade seja para iluminação, refrigeração ou aquecimento.

A função de avaliação é o próprio simulador EnergyPlus. Na figura 1.1 apresenta-se um esquema do funcionamento do modelo, para que se tenha uma noção inicial do mesmo. Após modelado o cromossomo, o algoritmo genético, a partir deste cromossomo, cria um arquivo texto que apresenta toda a configuração da construção, incluindo as espessuras das paredes e o dimensionamento das janelas, e gera um arquivo, no formato .idf, que é lido pelo simulador EnergyPlus. Após

ler o arquivo .idf, o EnergyPlus realiza a simulação, gerando vários arquivos de relatórios. Um destes arquivos apresenta o consumo de energia para aquecimento e resfriamento da edificação estudada. De posse destes valores, o AG utilizará este arquivo gerado. Essa é a avaliação do cromossomo.

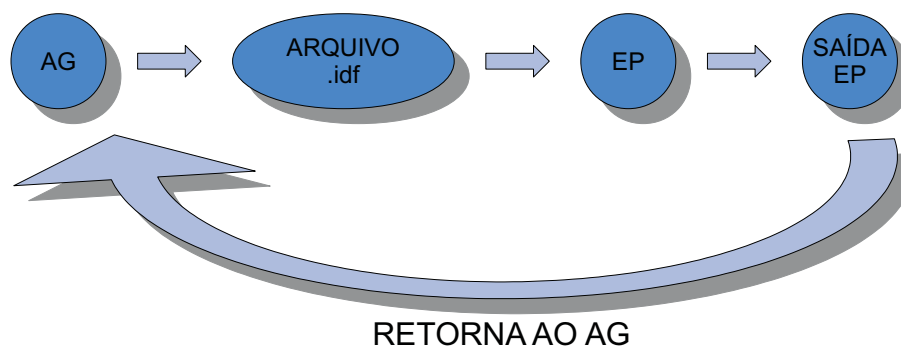


Figura 1.1: Esquema do funcionamento do modelo

Os operadores genéticos utilizados são os operadores de crossover e de mutação.

O estudo de casos auxilia na exemplificação prática da atuação do simulador com o algoritmo genético, baseado nos conceitos de conforto térmico, sustentabilidade e eficiência energética, em que estes conhecimentos são aplicados, e os resultados obtidos são analisados e comparados com a busca aleatória.

1.5

Organização do Trabalho

Esta dissertação está dividida da seguinte forma:

- O capítulo 2 descreve os fundamentos teóricos que auxiliaram no desenvolvimento do trabalho, em que se dará especial atenção aos temas referentes aos algoritmos genéticos, ao simulador EnergyPlus, aos princípios de sustentabilidade, eficiência energética e conforto térmico.
- O capítulo 3 descreve o modelo ideal que utiliza toda a potencialidade do simulador e apresenta as possíveis variáveis constituintes do cromossomo.
- O capítulo 4 descreve o modelo desenvolvido para este trabalho e estudo de casos em que este modelo é aplicado e se faz as devidas ponderações sobre os resultados obtidos.
- O capítulo 5 descreve as conclusões provindas dos resultados obtidos e sugere os possíveis trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos dentro do tema desta tese.

2

Fundamentos Teóricos

2.1

Algoritmos Genéticos

Idéias sobre a evolução não surgiram apenas com Darwin. São anteriores a ele. Algumas delas, como a descendência comum e transmutação entre as espécies, existem desde o século VI a.C. À medida em que o conhecimento biológico desenvolveu-se no século XVIII, as idéias evolutivas afluíram e tornaram-se públicas, principalmente por Darwin, em 1796. Charles Darwin formulou sua idéia sobre a seleção natural em 1838. Ao final de 1859 publicou “On the Origin of Species” (Sobre a Origem das Espécies), onde explicava, de forma detalhada, o processo de seleção natural e apresentava evidências que davam credibilidade e aceitação à teoria sobre como se dava a ocorrência da evolução (Darwin2006).

Para Darwin, as variações em organismos de uma mesma espécie não eram meras imperfeições, mas, sim, o material a partir do qual a seleção poderia atuar. A seleção natural continua sendo o ponto central da teoria evolutiva atual, embora se saiba que não é o único processo pelo qual as características de uma população podem mudar.

Existem quatro explicações plausíveis para as variações em uma espécie: influências ambientais, mutação, recombinação e seleção natural.

Influências ambientais: a exposição a diferentes fatores ambientais pode produzir diferenças entre indivíduos, ocorrendo através das manifestações genéticas (fenótipo – características observáveis de um organismo) e não por alterações genéticas (genótipo).

Mutação: pode ser definida como um evento que dá origem a alterações qualitativas ou quantitativas no material genético. As mutações são aleatórias e raras.

Recombinação: é a combinação de genes durante o processo de meiose ¹, para formação dos gametas. É responsável pela singularidade de cada indivíduo

¹Meiose: tipo de divisão celular que ocorre somente nas células da linhagem germinativa e apenas uma vez numa geração. Resulta na formação de células reprodutivas (gametas).

de uma mesma espécie. A probabilidade de que dois indivíduos da mesma irmandade sejam iguais é praticamente zero.

Seleção natural: é a melhor explicação para a adaptação e especialização dos seres vivos. Segundo a teoria da evolução, a base para que a seleção possa atuar são as recombinações genéticas e as mutações, pois possibilitam a variabilidade genética. A seleção natural é o processo chave que age sobre a casualidade da mutação e seleciona as características apropriadas para melhorar a adaptação dos organismos. Desta forma, hereditariamente, as características favoráveis tornam-se mais comuns em gerações sucessivas de uma população que se reproduz, e as características desfavoráveis tornam-se menos comuns. Indivíduos com fenótipos favoráveis estão mais aptos a sobreviver e reproduzir-se do que aqueles que não os possuem. Se esses fenótipos apresentam uma base genética, então o genótipo associado ao fenótipo favorável terá sua frequência aumentada na geração seguinte e assim, sucessivamente. Como resultado deste processo estão as adaptações de alguns organismos em nichos ecológicos particulares e, eventualmente, o surgimento de novas espécies.

Com o intuito de imitar o mecanismo de evolução biológica para solucionar problemas em diversas áreas, em especial problemas de otimização, alguns pesquisadores, nas décadas de 60 e 70, lançaram diferentes abordagens algorítmicas que compõem a chamada Computação Evolucionária (Back1997, Davis1991, Eiben2003). Seus principais representantes são as estratégias evolucionárias, a programação evolucionária e os algoritmos genéticos (Goldberg1989, Linden2006, Mitchell1996), sendo este último a técnica utilizada neste trabalho. A computação evolucionária vê o mecanismo de evolução como conceito base para a solução de problemas computacionais difíceis, como, por exemplo, os que requerem buscas em um espaço de soluções muito grande. A idéia em todos esses sistemas envolve uma população de possíveis soluções para um dado problema, que evolui ao longo do processo através do uso dos operadores inspirados nos mecanismos da genética e da seleção natural.

Uma vez que o processo de seleção natural produz soluções tão eficientes, a idéia dos algoritmos genéticos (AG's), introduzidos por *John Holland* em 1975, em seu trabalho *Adaptation in Natural and Artificial Systems* (Holland1975), é simular este processo.

Toda tarefa abstrata a ser completada com sucesso pode ser considerada como solução de um problema que pode ser definido como uma busca em um espaço de possíveis soluções. Dado que o objetivo é encontrar a “melhor” solução, pode-se considerar esta tarefa como um processo de otimização. Se o espaço for pequeno,

os métodos clássicos de busca exaustiva são suficientes; caso o espaço seja grande, técnicas inteligentes artificiais devem ser empregadas. Os Algoritmos Genéticos (GAs – Genetic Algorithms) estão entre estas técnicas; são algoritmos estocásticos cujos métodos de busca são baseados na herança genética e na evolução Darwiniana.

A terminologia usada ao se tratar de Algoritmos Genéticos é oriunda da genética natural. Pode-se falar sobre *indivíduos* (ou *genótipos*, *estruturas*) em uma população. Estes indivíduos podem ser chamados de *strings* ou *cromossomos*. Os cromossomos são feitos de unidades, os *genes* (ou *caracteres*) arranjados em sucessão linear. Cada gene controla a herança de uma ou várias características. Genes de certas características estão localizados em certos pontos do cromossomo, chamados de *locus* (*string positions*). Toda característica de um indivíduo pode se manifestar de forma diferente e, neste caso, o gene pode assumir diferentes estados, chamados *alelos* (*feature values*).

Cada genótipo representa uma solução potencial ao problema. O processo de evolução percorre a população de cromossomos em uma busca através do espaço de possíveis soluções. Tal processo busca tirar proveito da melhor solução (*exploit*) e explorar (*explore*) o espaço de busca. A busca aleatória é um exemplo típico de estratégia que explora o espaço de busca não se preocupando em tirar melhor proveito das regiões mais promissoras do espaço de busca.

Os GAs são mais robustos do que os demais métodos de busca existentes, pois pertencem à classe dos algoritmos probabilísticos e combinam elementos de busca direta e de busca estocástica. Outra característica importante é que eles mantêm uma população das soluções possíveis, enquanto outros métodos processam um único ponto do espaço de busca.

Um algoritmo genético, como qualquer programa evolucionário, deve ter os seguintes componentes:

- uma representação genética para as possíveis soluções do problema;
- um modo de criar a população inicial para as possíveis soluções;
- uma função de avaliação que se aplique a todo o ambiente, classificando as soluções em relação à sua aptidão;
- operadores genéticos que alterem a composição dos descendentes;
- valores para os vários parâmetros que o algoritmo genético utiliza, como por exemplo, o tamanho da população, a probabilidade de aplicar operadores genéticos, etc.

Ou seja, a cada indivíduo da população é associada uma avaliação que determina a qualidade daquele indivíduo, ou seja, a qualidade da solução candidata ao problema. Em geral, quando o problema em questão é um problema de otimização, a função de aptidão corresponde à função objetivo do problema (à função que

se quer otimizar). A função objetivo fornece uma medida de qualidade em relação ao problema e a função de aptidão transforma essa medida em uma grandeza que representa a oportunidade de reprodução. Como operadores genéticos, existem a recombinação ou *crossover*, onde os indivíduos de uma população se recombina geneticamente, gerando novos indivíduos que herdam parte dos genes do indivíduo pai_1 e parte dos genes do indivíduo pai_2 , sendo este processo um dos passos mais importantes no mecanismo evolucionário dos algoritmos genéticos. Outro operador é a mutação, que consiste em pequenas alterações nos genes dos novos indivíduos gerados e garante uma boa exploração de todo o espaço de busca, além de evitar que uma região deste espaço seja abandonada, uma vez que durante o processo evolucionário dos AG's pode ocorrer de alguns alelos desaparecerem da população. É ela que garante a variabilidade da população, podendo ao acaso encontrar soluções muito boas ou regiões do espaço de busca onde se encontram ótimas soluções.

Cada iteração do processo evolucionário dos AG's, onde os novos indivíduos gerados pela recombinação são inseridos em uma nova população, é chamada de geração. Cada população é, portanto, identificada pela sua geração e, após várias gerações, existe uma grande probabilidade de que a população seja composta por indivíduos bem adaptados ao ambiente, ou seja, composta por boas soluções para o problema no qual o AG é aplicado.

Para ilustrar o funcionamento do AG, apresenta-se abaixo um pseudo-código genérico capaz de englobar a maioria dos AG's existentes.

ALGORITMO GENÉTICO GENÉRICO

Início

Inicialize a população de cromossomos (geração $i = 1$)

Avalie os indivíduos na população

Repita (processo evolucionário)

Selecione indivíduos para reprodução

Aplique operadores de crossover e mutação

Avalie indivíduos gerados na população

Selecione indivíduos para sobreviver (geração $i = i+1$)

Até critério de parada

Fim

Este funcionamento também pode ser visto de forma gráfica, como a apresentada na figura 2.1. Neste exemplo, tem-se que o cromossomo representa números reais e sua função de avaliação é a equação: $x + y + z$, que mostra o ciclo do AG.

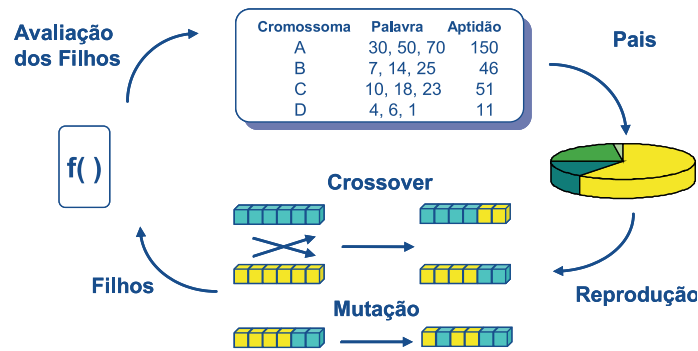


Figura 2.1: Ciclo do Algoritmo Genético

2.1.1

Funcionamento de um Algoritmo Genético

O funcionamento de um algoritmo genético pode ser explicado seguindo os seguintes passos:

1º Passo – Definição das possíveis soluções

Como o AG trabalha com a codificação das possíveis soluções, primeiramente deve-se **definir** um esquema que represente as mesmas. Esta codificação é uma função que associa os elementos do espaço de fenótipos (espaço de busca – possível solução) aos elementos do espaço de genótipos (codificação da solução). A codificação pode ser binária ou real (trabalha com domínios contínuos). O fenótipo resulta da interação do genótipo com o ambiente. Por exemplo, se duas pessoas têm os mesmos tipos de alelos (genótipos) para pigmentação da pele e uma delas tomar sol com mais frequência que a outra, suas tonalidades de pele (fenótipo) serão diferentes.

2º Passo – Codificação das soluções

A **codificação** é uma das fases mais importantes na definição de um algoritmo genético e é o fator que pode significar o sucesso ou o fracasso do mesmo. Existem dois tipos de codificações. O primeiro tipo refere-se às codificações binárias (forma de codificação mais tradicional), introduzida por John Holland (Holland1975), porém nem sempre é a melhor. Neste tipo de codificação, os alelos pertencem ao conjunto $\{0, 1\}$. Sendo l o comprimento do cromossomo, tem-se 2^l cadeias de bits possíveis. A codificação é a regra que irá associar estas cadeias binárias a uma solução que pode ser uma variável inteira, real, etc. No caso de variáveis inteiras, adota-se a representação na base 2 (binária). A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre o valor inteiro e sua representação binária.

O segundo tipo de codificação refere-se às codificações reais, para variáveis reais, que trabalham com domínios contínuos onde cada cromossomo é um vetor

Valor Inteiro	Representação Binária
0	000
1	001
2	010
3	011
4	100
5	101
6	110
7	111

Tabela 2.1: Representação na base 2

pertencente a $\mathcal{R}^n$. As vantagens da representação real são: permitir que conhecimentos prévios sobre o problema sejam incorporados com mais facilidade, permitir o uso de cromossomos de menor comprimento gerando, ganhos significativos de memória, além de poder fazer uso de processamento da máquina no caso de operações aritméticas, gerando uma melhora no desempenho. Em contrapartida, torna-se necessário o ajuste da inicialização da população e a utilização de operadores de *crossover* e *mutação*.

Estas codificações, binária e real, são aplicadas em problemas de otimização convencional. Existem outras codificações que se adequam a outros tipos de problema. Um exemplo são os problemas de otimização combinatória ou permutação, onde o objetivo é encontrar uma permutação ótima dos elementos de um dado conjunto. O exemplo mais famoso de otimização combinatória é o problema do caixeiro viajante, no qual deve-se otimizar o roteiro de uma viagem através de uma seqüência de cidades. Também existem aplicações de algoritmos genéticos na otimização de redes neurais, na determinação de regras em data mining, na análise de imagens, cada um com um tipo de codificação que seja mais apropriado ao problema, os quais não são discutidos por estarem fora do escopo deste trabalho.

3º Passo – Inicialização da população

A inicialização da população se dá, geralmente, de forma aleatória. Um algoritmo gerador de números pseudo-aleatórios utiliza uma “semente” para sortear estes números. Nos AG’s é comum utilizar diferentes valores de sementes, obtendo-se sempre uma nova população inicial. Caso se conheça, a priori, soluções aproximadas ou contendo algum tipo de informação sobre o problema, pode-se “semear” a população inicial com os indivíduos que representam estas soluções, para garantir que essa região do espaço de busca seja explorada pelo algoritmo genético. Na representação binária, por exemplo, existe a possibilidade de se inicializar a metade da população de maneira aleatória e a outra metade de acordo com a primeira invertendo-se os bits, o que garante que cada posição do cromossomo tenha um

representante na população com os alelos 0 e 1. É importante que a população inicial contenha indivíduos bem diversificados, pois a diversidade garante que a população contenha soluções candidatas distribuídas por todo o espaço de busca. Em geral, quanto maior a população, maior será a representação do espaço de busca na população. No entanto, deve-se analisar criteriosamente o tamanho da população, pois este influi no custo computacional associado, tanto em memória quanto em desempenho.

4º Passo – Avaliação da população

Consiste em calcular a **aptidão** de cada indivíduo através da função de aptidão. A aptidão é uma nota, uma medida numérica de qualidade, associada a cada indivíduo da população e indica o quão adaptado ao ambiente ele está. Esta nota é fornecida pela função de aptidão f_a que, assim como a codificação, é totalmente dependente do problema e base do processo de seleção que é fundamental para o bom funcionamento dos AG's. É também uma etapa crítica do processo evolucionário, uma vez que avaliará cada indivíduo da população em cada geração. A função de aptidão deve ser escolhida de maneira que possa fornecer indicações sobre a localização de boas soluções dentro do espaço de busca. Em problemas de otimização, a função de aptidão está intimamente ligada à função objetivo f_o que se deseja maximizar ou minimizar.

Uma das dificuldades no processo de definição da função de aptidão é quando há necessidade de lidar com restrições. O ideal é que somente soluções factíveis possam ser geradas, mas na prática isso nem sempre é possível. Para contornar esse problema, várias estratégias costumam ser adotadas. A mais simples é eliminar os indivíduos inválidos em cada geração. Embora de fácil implementação, essa estratégia pode desperdiçar material genético potencialmente útil, uma vez que esses indivíduos, apesar de infactíveis, possam estar próximos de ótimas soluções. Uma outra estratégia seria a penalização, onde os indivíduos que violam uma restrição têm sua aptidão decrescida de uma quantidade que, em geral, é proporcional à gravidade de violação. Existem outras estratégias, que variam de acordo com o problema, mas estas acima citadas são as mais usuais.

5º Passo – Esquemas de seleção

Seguindo a analogia com o processo de seleção natural dos seres vivos, os algoritmos genéticos selecionam os indivíduos (cromossomos) mais aptos da população (aqueles com uma alta aptidão) para gerar os cromossomos filhos na população da nova geração, isto é, os cromossomos com melhor aptidão possuem uma maior probabilidade de serem escolhidos para reprodução. Este processo de escolha dos indivíduos é chamado de esquema ou método de seleção.

Um método de seleção muito usado é o Método da Roleta, onde indivíduos de uma geração são escolhidos para fazer parte da próxima geração, através de um sorteio de roleta. Neste método, cada indivíduo da população é representado na roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Seja f_i a função aptidão do i -ésimo indivíduo de uma população de n indivíduos. A sua probabilidade de vir a ser selecionado para reprodução é dada por p_i onde:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (2-1)$$

Assim, aos indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da roleta, enquanto aos de aptidão mais baixa é dada uma porção relativamente menor da roleta. Finalmente, a roleta é girada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, e são escolhidos, como indivíduos que participarão da próxima geração, aqueles sorteados na roleta.

Outro método importante que deve ser citado, é o Método de Seleção por Torneio. Este é um dos esquemas de seleção mais simples de implementação. Neste esquema, sorteia-se aleatoriamente t ($t > 1$) indivíduos da população. A idéia é promover um torneio entre esse grupo de indivíduos e, aquele que vencer, será selecionado para reprodução, sendo os demais descartados. Esse torneio é baseado na comparação do valor da aptidão dos indivíduos sorteados e, aquele com o maior valor de aptidão, é o vencedor. Normalmente, utiliza-se $t = 2$ ou $t = 3$. Esse esquema de seleção costuma encontrar bons resultados, além de ser, particularmente, adequado às aplicações em que a análise de qualidade de um indivíduo depende dos demais. Este método de seleção é interessante, pois reduz as chances de convergência prematura e de estagnação na busca pelo ótimo. Também não possui restrições em relação à função de aptidão, necessitando apenas que se possua habilidade de comparação.

6º Passo – Operadores Genéticos

Após o processo de seleção, os indivíduos escolhidos são chamados de genitores, pois são os “pais” dos indivíduos da nova geração. Durante o processo evolucionário, o algoritmo tenta criar novas e melhores soluções candidatas (indivíduos mais aptos) a partir de soluções selecionadas (os indivíduos genitores). Para isto, ele utiliza os operadores genéticos de *crossover* e mutação. São importantes operadores, pois guiam a busca dos AG's, a fim de explorar regiões ainda desconhecidas no espaço de busca. Eles são necessários para que a população se diversifique, sem perder as características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores.

O operador genético de recombinação ou *crossover* pode ser aplicado a

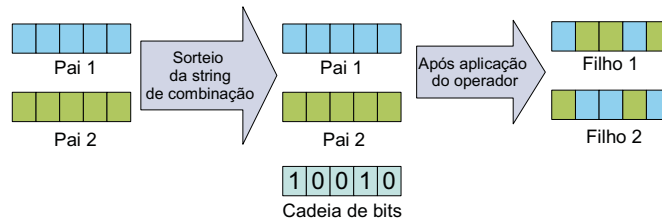
um número n de indivíduos, mas o mais comum é ele ser aplicado a um par de cromossomos, mantendo a analogia com a natureza para gerar um ou dois indivíduos na nova geração. A cada par de cromossomos selecionados, o *crossover* é aplicado com uma dada probabilidade chamada de taxa de *crossover*, representada por P_c . Após a escolha do par de indivíduos genitores, gera-se um número pseudo-aleatório no intervalo $[0, 1]$. Caso esse valor seja menor ou igual à taxa de *crossover* P_c , o operador de *crossover* é aplicado ao par de indivíduos “pais”, fazendo uma recombinação de seus materiais genéticos para gerar os indivíduos “filhos” que irão preencher a população da próxima geração. Caso contrário, os indivíduos “pais” são copiados sem qualquer alteração para os indivíduos “filhos” (o que faz com que algumas soluções sejam preservadas durante as gerações).

Da mesma forma que o operador de *crossover*, o operador de mutação é aplicado com uma dada probabilidade, a qual é chamada de taxa de mutação, representada por P_m . O operador genético de mutação garante que nenhuma porção do espaço de busca seja abandonada por consequência da eliminação de alguns alelos durante o processo evolucionário. Normalmente, este operador genético atua sobre um único indivíduo, realizando pequenas alterações nos alelos do seu cromossomo. Deste modo, a mutação ajuda a manter a diversidade da população, o que reflete em uma boa exploração do espaço de busca. A mutação gera novos indivíduos que podem pertencer a regiões com grande potencial no espaço de busca. Geralmente, utiliza-se uma taxa de mutação pequena, pois a mutação é considerada um operador genético secundário. Na literatura, encontra-se sugestões para se fazer a taxa de mutação P_m aproximadamente igual a $1/l$, sendo l o comprimento do cromossomo.

Os operadores genéticos de *crossover* mais importantes são:

Crossover Uniforme: Tipo de *crossover* em que é introduzida uma máscara, uma cadeia de bits do mesmo tamanho dos cromossomos. Esta máscara é percorrida bit a bit, verificando se ocorrerá troca ou não de material genético naquela posição. Se em uma dada posição na máscara é encontrado o bit 1, os materiais genéticos dos pais são trocados nos filhos; caso contrário eles são copiados sem haver a troca. Isto é, ao se encontrar o bit 1 em uma posição na máscara, o $filho_1$ recebe o gen daquela posição do pai_2 ; caso contrário, ao se encontrar o bit 0, o $filho_1$ recebe o gen daquela posição do pai_1 . O mesmo ocorre com o indivíduo $filho_2$, só que de maneira invertida, recebendo o gen do pai_1 se for o bit 1 ou do pai_2 se for o bit 0 que se encontra em uma dada posição da máscara. A figura 2.2 ilustra como se dá o *crossover* uniforme (Back1997).

Crossover Aritmético: No *crossover* aritmético, dois filhos são gerados. Cada

Figura 2.2: *Crossover Uniforme*

alelo dos genes dos filhos é dado por:

$$a_{f1_i} = \beta a_{p1_i} + (1 - \beta) a_{p2_i}$$

$$a_{f2_i} = \beta a_{p2_i} + (1 - \beta) a_{p1_i}$$

onde β é um número, no intervalo $[0,1]$, que pode ser escolhido aleatoriamente em uma distribuição uniforme no intervalo (Back1997).

Crossover de Média: No *crossover* de média, é produzido apenas um filho, cujo alelo dos genes é dado pela média dos alelos dos genes dos pais. Se dois cromossomos são promissores, a média de seus valores reais pode levar a uma melhor solução. Sejam o pai_1 e o pai_2 representados, respectivamente, por $P_1(x_1, y_1)$ e $P_2(x_2, y_2)$. O filho, F_1 , será representado pelo seguinte cromossomo: $F_1 = (\frac{x_1+x_2}{2}, \frac{y_1+y_2}{2})$.

Os operadores genéticos de mutação mais importantes são:

Mutação Creep: Na mutação *creep*, adiciona-se ao gene um pequeno número aleatório obtido de uma distribuição normal (média zero e desvio padrão pequeno). A taxa de mutação *creep* pode ser relativamente alta, uma vez que é usada apenas para explorar localmente o espaço de busca (Back1997).

Mutação Aleatória ou Mutação Randômica: Neste caso, substitui-se um gene, caso este gene passe no teste de probabilidade, por um outro valor sorteado com probabilidade uniforme no intervalo permitido pelo problema, diga-se intervalo $[a, b]$:

$$a_{f_i} = random(a, b)$$

Mutação Uniforme: Seleciona aleatoriamente uma variável x_k e lhe atribui um valor uniforme aleatório de um intervalo (L_k, U_k) , que representa os limites inferior e superior de x_k , respectivamente (Back1997): Pai: $x = (x_1, ..., x_k, ..., x_n)$
Filho: $= x' = (x_1, ..., x'_k, ..., x_n)$, onde $x'_k \in (L_k, U_k)$

Outras propostas de operadores genéticos de mutação podem ser vistas em (Herrera1998).

7º Passo – Substituição

Depois de gerados, os novos indivíduos precisam ser inseridos na população adotando-se uma estratégia de substituição. Em geral, adota-se uma política de substituir uma parcela dos piores indivíduos da população pelos indivíduos que foram criados através dos operadores de crossover e mutação (algoritmo genético com steady-state).

8º Passo – Critério de Parada

O processo evolucionário dos AG's é condicionado a um critério de parada, uma vez que os algoritmos genéticos não páram espontaneamente quando encontram uma boa solução. Portanto, basta estipular que o critério de parada seja dado por um número fixo de gerações definidas a priori, isto é, após um número de gerações criadas, interrompendo o algoritmo. Quando o problema é bem conhecido, uma outra estratégia é estipular que o critério de parada seja estabelecido por uma boa solução. Isto é, quando uma solução considerada boa for encontrada, o algoritmo pára. Existe também a possibilidade de estipular o critério de parada de acordo com a convergência, isto é, quando os indivíduos da população estiverem todos muito parecidos, significa que o problema convergiu e, portanto, o processo pode ser interrompido.

9º Passo – Parâmetros de Controle

Sua correta configuração influencia na eficiência e no desempenho dos AGs. Os parâmetros mais básicos são:

- tamanho da população – corresponde ao número de indivíduos presentes em cada população e geralmente é constante durante toda a evolução. Como foi dito anteriormente, quanto maior, mais chances de representação do espaço de busca terá a população. No entanto, o tamanho da população tem um custo computacional associado, tanto em memória quanto em desempenho. Por outro lado, uma população pequena fornece uma pequena cobertura do espaço de busca, o que pode acarretar do algoritmo convergir para um ótimo local ainda distante de um ótimo global. Uma opção é relacionar o tamanho da população com o tamanho do cromossomo, portanto, quanto maior for o cromossomo maior deverá ser o tamanho da população, visando propiciar uma diversidade razoável dentro do espaço de busca. Na literatura, é comum encontrar tamanhos de população na faixa de 20 a 100 cromossomos, mas pode-se assumir valores bem maiores dependendo do problema e da aplicação;

- taxa de *crossover* – como visto anteriormente, a taxa de *crossover* indica a probabilidade de ocorrer ou não o *crossover* entre os indivíduos selecionados da população para reprodução. O valor desta taxa corresponde ao número de novas estruturas a serem introduzidas na população. Se a taxa for muito alta, pode ocorrer perdas de variabilidade dentro da população, uma vez que esta variabilidade é fornecida pelo operador de mutação. Em contrapartida, se ela for muito baixa, pode tornar a convergência do algoritmo muito lenta, provocando a estagnação da busca. É comum utilizar a taxa de *crossover* entre 0,5 e 0,95. Porém, este valor dependerá do tipo de operador e do tipo de problema ao qual ele será aplicado;
- taxa de mutação – como visto anteriormente, a taxa de mutação indica a probabilidade de ocorrer mutação nos novos indivíduos gerados. A mutação garante a variabilidade da população, podendo, ao acaso, encontrar soluções muito boas ou regiões do espaço de busca onde se encontram soluções ótimas. Entretanto, uma taxa de mutação alta pode tornar a busca aleatória dentro do espaço de busca. Sugere-se fazer a taxa de mutação inversamente proporcional ao tamanho do cromossomo, isto é, P_m ser aproximadamente igual a $1/l$ sendo l o comprimento do cromossomo. Como todos os parâmetros apresentados, a taxa de mutação dependerá da aplicação. Contudo, na literatura, é comum utilizar a taxa de mutação entre 0,001 e 0,1.

2.2

Simulador de Energia EnergyPlus (EP)

O EnergyPlus é um simulador de energia, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos – Eficiência Energética e Energia Renovável (*U.S. Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy*).

Como ponto de partida para o estudo deste simulador, introduz-se a definição de simulação em computação e de simulação térmica. A simulação, na computação, consiste em empregar técnicas matemáticas em computadores com o propósito de imitar um processo ou operação do mundo real. Desta forma, para ser realizada uma simulação, é necessário construir um modelo computacional que corresponda à situação real que se deseja simular. Por sua vez, a simulação térmica de um edifício pode ser definida como um modelo computacional dos processos energéticos dentro de uma edificação que visam prover um ambiente térmico confortável aos seus ocupantes. O EnergyPlus é um exemplo deste tipo de simulador.

Os objetivos da simulação térmica em uma edificação são: 1) calcular as cargas que geralmente são usadas na determinação dos tamanhos de equipamentos, tais como aquecedores, ventiladores e refrigeradores; e 2) análise de energia, em

que auxilia na avaliação do custo da energia da edificação em longos períodos de tempo.

A importância da simulação está no fato de que as edificações consomem, nos Estados Unidos, por exemplo, por volta de 1/3 de toda a energia consumida nacionalmente em um ano. A maior parte deste consumo está na manutenção das condições térmicas internas da edificação e na iluminação artificial. Ao utilizar a simulação, esta auxilia na redução do consumo de energia nas edificações da seguinte forma: permite que se modele uma edificação antes de sua execução ou antes de alguma reforma em edificação já existente; permite a investigação dos diferentes tipos de energia alternativa; é menos custosa e consome menos tempo do que os processos de tentativa e erro, pois as edificações são diferentes umas das outras, não sendo possível o uso de uma solução padrão.

O EnergyPlus (EP), portanto, é um simulador que está integrado à edificação e simula um sistema HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning). Além disso, baseia-se nas melhores características dos programas BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) e DOE-2, ambos ferramentas de simulação de cargas e de energia, respectivamente.

Como o sistema HVAC é de suma importância para o funcionamento do EnergyPlus, apresenta-se uma descrição mais detalhada do mesmo para que se tenha um entendimento melhor sobre o tema. O sistema HVAC é um sistema de controle que baseia-se nos princípios da termodinâmica, da mecânica dos fluidos e nas relações de troca de calor. Seus objetivos são: promover o conforto térmico, regulando a temperatura de determinado ambiente; manter a qualidade do ar interno de forma aceitável (umidade); e prover um custo razoável para sua instalação, operação e manutenção.

Quanto ao *Heating*, os sistemas de calefação são utilizados em climas frios visando manter certo aquecimento nas edificações. Pode ser constituído por aquecedores, fornalhas, tubulação resistente ao calor, seja para água quente, vapor ou ar. A calefação também pode ser obtida através de aquecedores elétricos.

Quanto ao *Ventilating*, há a troca do ar em um ambiente, seja com o exterior, seja para circulação interna do ar, visando remover umidade excessiva, odores desagradáveis, fumaças, poeira e ácaros. É constituído por dois métodos: métodos mecânicos, que visam controlar a qualidade interna do ar, utilizando meios como a exaustão mecânica, por exemplo; e os métodos naturais, caracterizando-se pelo uso de janelas operacionais.

Quanto ao *Air-conditioning*, sistemas de condicionamento de ar trabalham baseando-se na definição de que frio é a ausência de calor. Assim, para remover o calor de algo, basta prover um meio que seja mais frio. O calor pode ser removido através dos processos de radiação, convecção e condução.

Além destas características, é um sistema que pode reduzir muitos dos impactos ambientais produzidos pelas edificações. Quando bem elaborados, promovem as condições de conforto interior para seus ocupantes de forma a minimizar o consumo de energia não-renovável e a emissão de poluentes nas águas e no ar. A forma de se garantir que o uso das fontes não-renováveis de energia diminua é fazer uso de um bom projeto arquitetônico que controle a captação de energia solar e tome partido das formas de calor passivas, da iluminação e ventilação naturais e das condições de arejamento e resfriamento que a edificação possa vir a ter, evitando, ao máximo, o uso de sistemas mecânicos que consomem energia e, conseqüentemente, fazem com que haja um custo monetário ao usuário do ambiente.

Após esta breve ilustração sobre o sistema HVAC, volta-se a apresentar o simulador EnergyPlus e seu funcionamento. Baseando-se na descrição da edificação, pelo usuário, sob a perspectiva das características físicas e dos seus sistemas mecânicos, o EP calcula as cargas para aquecimento e resfriamento que são necessárias para manter os índices de conforto térmico na edificação e o consumo de energia necessário para este fim.

É importante ressaltar que o EP não é um substituto ao arquiteto ou ao engenheiro, pois depende destes para definição de parâmetros, para a informação dos dados que serão utilizados na simulação e, o mais importante, para a análise e interpretação dos resultados obtidos.

Na figura 2.3, apresenta-se o gerenciador de simulação integrada, onde há completa integração de simulação entre cargas, sistemas e plantas, o que permite que haja um controle das interações entre todos os loops de simulação, desde um nível sub-horário até o período selecionado pelo usuário (dia, mês, estação do ano, ano ou vários anos). As ações dos módulos individuais de simulação são determinadas pelo gerenciador que instrui os módulos individuais para executar certas ações: inicializar, simular, gravar resultados ou emitir relatórios.

Com esta breve noção do funcionamento do simulador EP, pode-se comprovar a utilidade do mesmo para o desenvolvimento deste trabalho, sempre tendo como foco a redução do consumo de energia de uma edificação e os meios necessários para se manter o melhor conforto térmico para o usuário desta edificação através do cálculo das cargas necessárias para a manutenção seja do aquecimento ou do resfriamento da mesma.

2.3

Sustentabilidade, Conforto Térmico e Eficiência Energética



Figura 2.3: Gerenciador de Simulação Integrada (Energy2008)

2.3.1

Sustentabilidade

No Relatório Brundtland ou Relatório Nosso Futuro Comum, de 1987, produzido pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), da Organização das Nações Unidas, foi definida a conceituação mais aceita sobre *desenvolvimento sustentável*, que é o desenvolvimento que atende às necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade de as futuras gerações terem suas próprias necessidades atendidas. Este relatório reafirma a visão crítica do modelo de desenvolvimento adotado pelos países industrializados, reproduzido pelas nações em desenvolvimento, e ressalta os riscos do uso excessivo dos recursos naturais sem considerar a capacidade de suporte dos ecossistemas.

Em 1992, a conferência Rio-92 contou com o princípio da cooperação entre as nações, segundo o qual os problemas globais do planeta devem ser tratados com a participação de todos os países, o que culminou com a criação de acordos como a Agenda 21 e a Declaração do Rio. A Agenda 21 é um plano de ação da Organização das Nações Unidas (ONU) para o início do século 21, em que os países membros presentes no Rio de Janeiro comprometeram-se a pautar suas políticas econômicas, sociais e ambientais com base no conceito do desenvolvimento sustentável. Já a Declaração do Rio, por sua vez, reafirma princípios aprovados em Estocolmo-72, sobre sua “Declaração sobre o Ambiente Humano”. Esta apresenta critérios e princípios comuns aos povos do mundo para preservar e melhorar o ambiente humano; e busca estabelecer uma parceria global mediante a criação de novos níveis

de cooperação entre os Estados, respeitando os interesses de cada um e protegendo a integridade global do meio ambiente. Reforça orientações importantes de outras negociações internacionais na área ambiental e estabelece uma forte conexão entre a pobreza mundial e a degradação do planeta. Contém, entre outros, o importante princípio das “responsabilidades comuns, mas diferenciadas” dos Estados, segundo o qual todos os países compartilham os mesmos objetivos e metas para reduzir a degradação ambiental, mas apresentam diferentes capacidades e recursos para alcançá-los (Agenda1994).

Em 1997, o Protocolo de Kyoto foi aprovado no Japão e estabelece que os países desenvolvidos devem reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa em pelo menos 5,2% em relação aos níveis apresentados em 1990. Essa meta global deverá ser atingida no período de 2008 a 2012 e implica, entre outras coisas, que os países devem buscar formas alternativas de energia, uma vez que combustíveis fósseis, como o petróleo, são os principais causadores do efeito estufa. Os países em desenvolvimento, como o Brasil, não têm compromissos de redução na emissão de gases. O governo brasileiro ratificou o protocolo em julho de 2002 (UNFCCC2008).

Em 2002, a Rio+10, ou Eco-2002, ocorreu em Johannesburgo, na África do Sul, com o objetivo de discutir e avaliar os acertos e falhas nas ações relativas ao meio ambiente mundial, nos últimos dez anos. O acesso a energia limpa e renovável, efeito estufa, conservação da biodiversidade, proteção e uso das fontes de água, acesso à água potável, saneamento e controle de substâncias químicas nocivas foram alguns dos temas debatidos.

Nas décadas de 80 e 90 a sustentabilidade e suas questões passaram a ser vistas com mais cuidado pela arquitetura internacional, uma vez que as preocupações com a crise energética, o crescimento populacional, o crescimento das cidades, o impacto ambiental tornam-se mais iminentes. Até então, a arquitetura havia deixado de lado questões como conforto térmico e economia de energia e apostava nos benefícios tecnológicos para climatizar as edificações, não importando os custos monetários ou ambientais.

Desta forma, a arquitetura sustentável passou a concentrar-se na criação de uma harmonia entre a obra final, o seu processo de construção e o meio ambiente, buscando evitar, em cada um dos passos, agressões desnecessárias ao ambiente, otimizando processos de construção, reduzindo os resíduos resultantes e diminuindo o consumo energético do edifício. Buscou ainda que a construção atinja um nível de conforto térmico e de qualidade do ar adequado, reduzindo assim a necessidade de utilização de sistemas de ventilação ou aquecimento artificiais.

A edificação ambientalmente sustentável deve apresentar uma correta aplicação dos conceitos arquitetônicos, dos fundamentos de conforto ambiental (que abrange os confortos térmico, acústico e luminoso), das técnicas construtivas e da

operação predial e com a devida eficiência energética. Uma arquitetura de baixo impacto ambiental busca soluções para lidar com as condições ambientais locais, levando em consideração a temperatura do ar, a umidade, a radiação solar, os ventos e ruídos, a qualidade do ar e o aproveitamento da luz natural.

Há uma diferenciação entre os conceitos de “edifício inteligente” e “edifício sustentável”. O primeiro, tem maior enfoque na eficiência energética e no uso da tecnologia, enquanto o segundo visa o menor impacto ambiental e menor dependência tecnológica (Gonçalves2006). Pode-se dizer que este trabalho visa não apenas uma arquitetura sustentável, mas também a eficiência energética, tornando-se a hibridização de ambos os conceitos acima descritos, sendo aqui nomeado como Sustentabilidade Inteligente.

2.3.2

Conforto Térmico

Um indivíduo tem sensação de conforto quando as trocas de calor entre ele e o ambiente ocorrem sem maior esforço. Se o indivíduo passa a ter sensação de frio ou de calor, seu organismo está perdendo mais calor ou menos calor que o necessário para a manutenção da homeotermia (temperatura constante e em torno de 37°C). O calor é dissipado através dos mecanismos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente, seja por trocas secas (calor sensível) – condução, convecção ou radiação; seja por trocas úmidas (calor latente) – evaporação.

Para se manter a homeotermia (Q), o balanço térmico dado pela equação abaixo deve ser igual a zero.

$$Q = M \pm R \pm C - E \quad (2-2)$$

Onde:

Q → refere-se ao balanço térmico ou Homeotermia;

M → refere-se à quantidade de energia proveniente do metabolismo;

E → refere-se à quantidade de energia proveniente da evaporação;

C → refere-se à quantidade de energia proveniente da convecção e da condução;

R → refere-se à quantidade de energia proveniente da radiação.

Para proporcionar ao indivíduo esta sensação de conforto no meio em que ele vive, “a Arquitetura, como uma de suas funções, deve oferecer condições térmicas compatíveis ao conforto térmico humano no interior dos edifícios, sejam quais forem as condições climáticas externas” (Frota2000). Estas condições climáticas exercem influência no conforto térmico e estão listadas abaixo. Para a arquitetura, os quatro primeiros itens são os mais relevantes:

- oscilação da temperatura, tanto diária quanto anual;

- umidade relativa;
- precipitações;
- radiação solar;
- nebulosidade do céu;
- sentido dos ventos;
- latitude e altitude;
- velocidade do ar;
- vegetação;
- permeabilidade do solo;
- águas superficiais e subterrâneas;
- topografia;
- características locais;
- presença humana;
- construções realizadas pelo homem.

Entender o conceito de trocas térmicas é a base para se compreender o comportamento térmico das edificações, o clima e a relação do organismo humano com o ambiente térmico. “Quando ocorre uma diferença de temperatura entre duas regiões do espaço, esta tende a desaparecer, espontaneamente, pela passagem de calor de uma região para outra” (Frota2000).

As trocas térmicas entre os corpos podem ser de dois tipos. O primeiro tipo se dá pela diferença entre as temperaturas dos corpos, onde os mais “quentes” perdem calor e os mais “frios” o ganham. Este tipo de troca de calor é denominado “troca seca”. O segundo tipo pode se dar pela mudança de estado de agregação: envolve a água, quando passa do estado líquido para vapor e vice-versa. Este tipo de troca de calor é denominado de “troca úmida”.

As trocas secas possuem os seguintes mecanismos:

- convecção → É a passagem do calor de uma zona a outra de um fluido, devido ao movimento relativo das suas partículas, provocado pela diferença de pressão originada da diferença de temperatura e de densidade do fluido em questão.
- condução → É a troca de calor entre dois corpos que estão em contato entre si, pelo movimento intermolecular entre eles.
- radiação → É uma forma de troca de calor entre dois corpos que mantêm certa distância entre si.

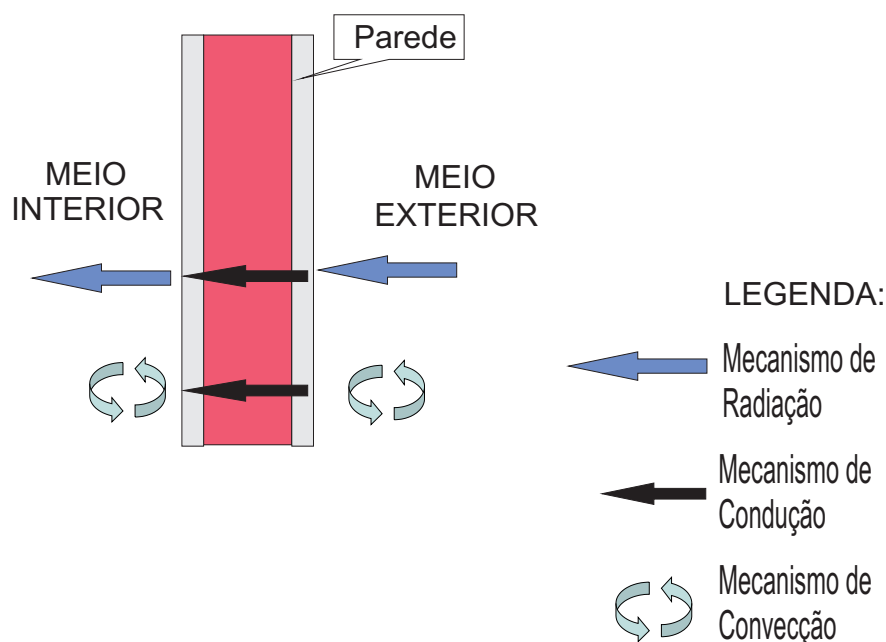


Figura 2.4: Condução, radiação, convecção

Na figura 2.4 estão representados estes mecanismos e seu comportamento com relação a um ambiente externo e a um interno, separados por uma parede de alvenaria.

As trocas úmidas possuem os seguintes mecanismos:

- evaporação → É a mudança do estado líquido para vapor.
- condensação → É a mudança do estado gasoso do vapor d'água presente no ar para o estado líquido. Se o ar, saturado de vapor d'água, entra em contato com uma superfície cuja temperatura está abaixo do seu ponto de orvalho, ² o excesso de vapor se condensa sobre a superfície.

Através deste conhecimento básico, pode-se passar para a explicação de como são determinadas as cargas térmicas geradas no interior de uma edificação, fator este de grande importância no desenvolvimento do partido arquitetônico e que deve levar em consideração as exigências funcionais e humanas para os diversos tipos de clima.

Segundo (Frota2000), influenciam nas cargas térmicas internas da uma edificação: a presença humana, a iluminação artificial, motores e equipamentos, processos industriais e o calor solar, todos atuando como fontes de calor. Para este trabalho, são importantes a presença humana, a iluminação artificial e o calor solar, explicados a seguir.

A presença humana influencia quanto ao calor que o ser humano pode dissipar no ambiente dependendo da atividade que o mesmo exerce. Para o cálculo do ganho

²É a temperatura em que se encontra o ar, quando seu grau higrométrico se eleva a 100%.

de calor, considera-se apenas o calor sensível. Para ilustrar, a tabela 2.2 apresenta os valores de calor sensível para as diferentes atividades que podem ser executadas pelo homem.

Calor Sensível produzido pela atividade humana	
ATIVIDADE	CALOR SENSÍVEL (W)
durante o sono (basal)	40
sentado, em repouso	63
em pé, em repouso	63
escritório (atividade moderada)	65
em pé, trabalho leve	65
andando	75
trabalho leve, em bancada	80
descendo escada	140

Tabela 2.2: Atividades e Calor Sensível

Quanto à iluminação artificial, a conversão de energia elétrica em luz gera calor sensível que é dissipado: por radiação, às superfícies circundantes; por condução, através dos materiais adjacentes; por convecção, pelo ar.

Por último, quanto ao ganho de calor solar, este se dá em função da intensidade da radiação solar incidente e das características térmicas dos materiais. A intensidade da radiação solar incidente sobre as superfícies pode ser calculada por fórmulas, em função da latitude, da data, da altitude, da orientação do plano de incidência, a nebulosidade, a poluição do ar, entre outros. Somente os quatro primeiros itens são levados em conta pelo simulador EnergyPlus.

Além destes fatores, deve-se analisar também a carga térmica referente à ventilação. A ventilação renova o ar ambiente, e com isto pode haver ganho ou perda de calor conforme a temperatura externa esteja maior ou menor que a interna, respectivamente. A equação abaixo determina qual a carga térmica transferida pela ventilação (Frota2000), ao ambiente:

$$Q_{vent} = 0,35.N.V.\Delta T \quad (2-3)$$

Onde:

$0,35 \text{ (W/m}^3\text{C)}$ → equivale ao calor específico x densidade do ar;

N (número de renovações por hora) → equivale à taxa de renovação horária do ar do recinto;

$V \text{ (m}^3\text{)}$ → equivale ao volume do ambiente;

$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$ → equivale à diferença de temperatura do ar interno e externo.

Recapitulando, para se desenvolver um projeto arquitetônico ideal ao clima em que será inserido e às necessidades dos seus usuários, principalmente quanto ao conforto térmico, pode-se adotar os seguintes passos para o seu desenvolvimento:

- conhecer o clima do local, principalmente a temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a radiação solar, os ventos e as chuvas, levando-se em conta também o microclima específico da área em que a edificação está ou será implantada;
- escolher os dados climáticos para o projeto do ambiente térmico;
- adotar o partido arquitetônico que melhor se adequa ao clima e às funções do edifício;
- realizar avaliação quantitativa do desempenho térmico da edificação.

Tais passos foram seguidos neste trabalho, norteados pelo desenvolvimento do processo de otimização dos parâmetros no simulador e fornecendo o embasamento teórico para a análise dos resultados obtidos, em termos arquitetônicos.

2.3.3

Eficiência Energética

A eficiência energética pode ser entendida como “a obtenção de um serviço com baixo dispêndio de energia. (...) Um edifício é mais eficiente energeticamente que outro quando proporciona as mesmas condições ambientais com menor consumo de energia” (Lamberts1997). Geladeiras, chuveiros e lâmpadas são os equipamentos que mais consomem energia elétrica em uma residência, se não se levar em conta os sistemas de condicionamento de ar. As porcentagens de consumo de cada um destes equipamentos podem ser vistas na figura 2.5.

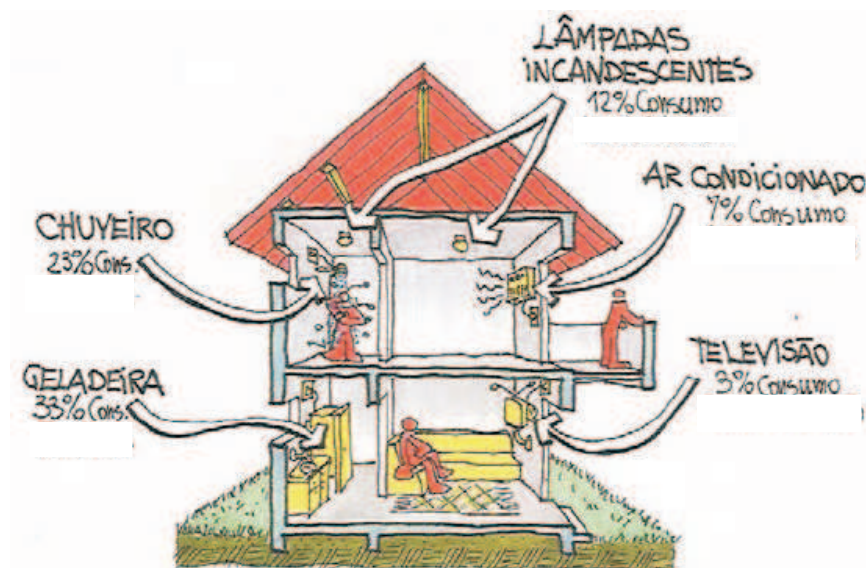


Figura 2.5: Consumo de energia por equipamentos em uma residência (Lamberts1997)

O consumo de energia no Brasil é muito alto, mas pode ser reduzido com um bom projeto arquitetônico, uma correta especificação de materiais construtivos (suas

propriedades e adequação ao projeto) e de equipamentos. Influenciam na eficiência energética de uma edificação as variáveis climáticas, as variáveis humanas e as variáveis arquitetônicas.

– Variáveis climáticas mais importantes:

- radiação solar, que contribui para o ganho térmico da edificação, seja pela radiação direta (parcela que atinge diretamente a Terra e cuja intensidade depende da altitude solar e do ângulo de incidência dos raios solares em relação à superfície receptora), seja pela radiação difusa (parte da radiação sofre um espalhamento, tendo sua direção alterada – quanto mais nublado o céu, maior a parcela difusa), seja pela radiação refletida pelo solo e pelo entorno, seja pela radiação térmica emitida pelo solo aquecido ou pelo céu, ou pelo próprio edifício. Além de ser fonte de calor, a radiação solar é também fonte de luz natural;
- temperatura, que pode ser influenciada pelo tipo de solo, pela topografia, pela altitude e pela vegetação presentes nas proximidades da região em que se encontra a edificação;
- vento, cujas condições podem ser alteradas pela presença de vegetação, outras edificações e anteparos naturais ou artificiais;
- umidade, que pode ser aumentada se houver, próximo à edificação, um lago, uma fonte ou espelhos d'água e vegetações.

– Variáveis Humanas:

- conforto térmico, já comentado na seção anterior;
- conforto visual, que consiste em uma boa iluminação para que o ser humano desenvolva suas tarefas visuais com o máximo de acuidade e precisão visual e com o menor esforço. A qualidade e a quantidade de iluminação em um ambiente deve estar adequada e em conformidade com a fonte de luz, seja ela natural ou artificial.

Segundo (Lamberts1997), os níveis de iluminação necessários para alguns ambientes são apresentados na tabela 2.3, para melhor entendimento:

– Variáveis Arquitetônicas:

Interagem com o meio ambiente e com o homem. São elas:

- Forma → interfere sobre os fluxos de ar no interior e exterior e na quantidade de luz e calor solar que um edifício recebe;
- Função → interage com a forma e com a eficiência energética do edifício;

Nível de iluminação para diversos ambientes		
CLASSIF.	NÍVEL DE ILUMINAÇÃO	TAREFA
Baixa	100 a 200 lux	circulação, leitura, refeição
Média	300 a 500 lux	leitura/escrita de documentos com alto contraste
Alta	500 a 1000 lux	leitura/escrita de documentos com fontes pequenas e baixo contraste, desenho técnico

Tabela 2.3: Níveis de Iluminação

- Tipos de fechamento → Existem os fechamentos opacos (por exemplo, paredes) e os fechamentos transparentes (por exemplo, janelas, clarabóias, etc) que constituem o envelope construtivo por onde ocorrem as trocas de energia (luz ou calor) entre os meios interior e exterior de uma edificação. Nos fechamentos opacos a transmissão de calor se dará quando houver diferença de temperatura entre as superfícies interior e exterior, e o sentido do fluxo de calor será da superfície mais quente para a mais fria. Já os fechamentos transparentes são os elementos principais de ganho e perda térmica em uma edificação. O principal fator é a radiação, pois sua parcela é diretamente transmitida para o interior e depende da transmissividade do vidro. Desta forma, a orientação, o tamanho e o tipo de vidro podem alterar a condução de calor pela abertura (uma janela, por exemplo). Com relação ao tamanho, quanto maior a abertura, maior a quantidade de calor que pode entrar ou sair do ambiente. Quanto à orientação, as fachadas são influenciadas pela trajetória do sol na abóbada celeste, pela altura e azimute solar e pelo ângulo de incidência da radiação solar. Quanto ao tipo de vidro, deve-se saber primeiramente que o vidro é bom condutor de calor, mas pode absorver, refletir ou transmitir a radiação solar incidente para o interior, dependendo da sua absorvidade (α), refletividade (ρ) e transmissividade (τ), conforme pode ser observado na figura 2.6, onde as setas vermelhas indicam a radiação solar.
- Sistemas de condicionamento (climatização e iluminação): Com relação aos sistemas de iluminação artificial, deve haver uma complementaridade entre a luz artificial e a natural. A climatização artificial, por sua vez, pode exercer tanto a função de resfriamento quanto de aquecimento em um ambiente ou edificação. Os sistemas mais comuns são a ventilação mecânica, sistemas de aquecimento e sistemas de resfriamento. A ventilação mecânica se dá por exaustão (há pressão negativa que suga o ar quente ou impuro para o ambiente externo) ou através de venti-

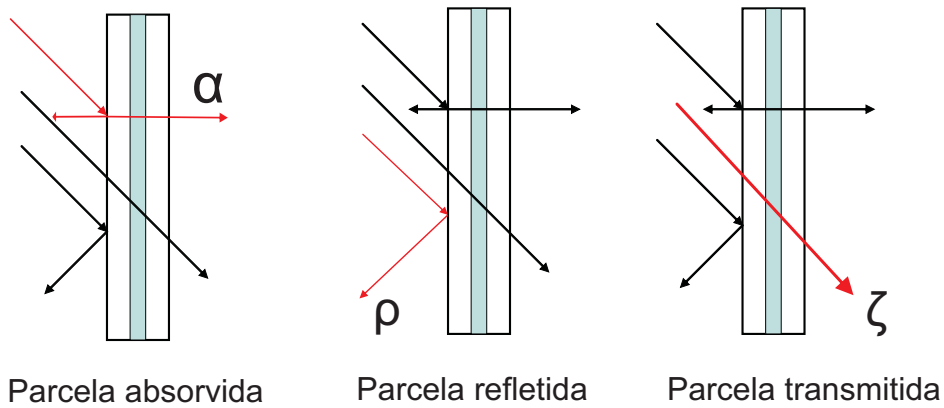


Figura 2.6: Absorção, Reflexão e Transmissão da radiação solar por um vidro

ladores. O aquecimento de um ambiente ou edificação pode ser do tipo local ou direto, como lareiras ou fogões a lenha, ou ser do tipo elétrico, em que a corrente elétrica passa por uma resistência e emite calor por convecção ou por radiação. O resfriamento, por sua vez, se dá através do ar condicionado, com o qual se controla a temperatura, umidade, pureza e distribuição do ar ao ambiente. Os tipos mais comuns são: ar condicionado de janela, minicentraís de pequeno porte, minicentraís do tipo multisplit, auto contido, refrigerador e fan-coil.

Aplicando os conhecimentos das variáveis climáticas, humanas e arquitetônicas de forma harmônica e visando a eficiência energética, deve-se identificar, numa edificação, onde está sendo gasta a maior parte da energia e verificar como atuar para diminuir este consumo. Pode-se racionalizar o consumo de energia em um edifício reduzindo o consumo com iluminação artificial, condicionamento de ar e aquecimento de água. Para tanto, na concepção do projeto, deve-se dar preferência a sistemas naturais de condicionamento e iluminação, usar sistemas artificiais mais eficientes e, sempre que possível, integrar ambos os sistemas artificial e natural.

2.4

Etapas de um projeto arquitetônico que prioriza a eficiência energética

Quando se trata de uma arquitetura residencial, onde se busca conforto térmico, redução de consumo de energia e aplicação de estratégias bioclimáticas, pode-se seguir o esquema da figura 2.7, para o desenvolvimento de um projeto arquitetônico. Este esquema se baseia em (Lamberts1997) e foi adaptado a este trabalho, com o acréscimo da etapa de *otimização* à etapa de simulação. A seguir, descreve-se as etapas deste esquema.

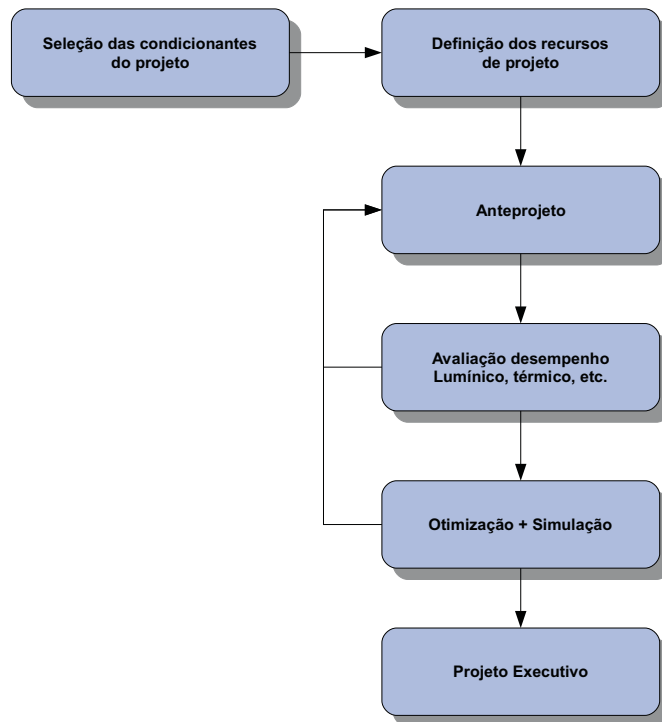


Figura 2.7: Esquema de projeto

A primeira etapa a ser cumprida quando se busca realizar um bom projeto arquitetônico está relacionada com a seleção dos fatores condicionantes do projeto, que podem ser:

- programa de necessidades
- funcionalidade
- implantação
- legislação vigente
- conforto ambiental
- circulação
- coberturas

A etapa seguinte refere-se à definição dos recursos do projeto, que dizem respeito a qual o tipo de material estará disponível, qual capital será aplicado na construção, etc. As três etapas seguintes: anteprojeto, avaliação de desempenho e otimização mais simulação, são desenvolvidas conjuntamente, pois as decisões tomadas em uma delas influencia as demais; portanto, são trabalhadas ao mesmo tempo até que a solução mais próxima do desejado seja alcançada. A etapa do anteprojeto é formada por desenhos representativos, visando aprovação, por parte do cliente/usuário, das soluções formais e funcionais fornecidas pelo projetista. Enquanto não se alcança a solução ideal, à medida em que se desenvolve o anteprojeto, avaliações do desempenho da edificação quanto ao conforto térmico e quanto à iluminação são

consideradas. Acrescenta-se a esta análise o processo de simulação, que neste trabalho se dá através do uso do simulador EnergyPlus já exposto anteriormente e, diferenciando-se de todos os processos até então desenvolvidos, utiliza-se os algoritmos genéticos para otimização. Finalizadas as três fases, o projetista já dispõe da solução ideal, dando sequência ao projeto executivo, onde serão trabalhados os detalhes da construção, desenhos em escalas convenientes, demonstrando com precisão as dimensões e formatos da edificação, sua cobertura, aberturas, fechamentos, etc.

A implementação deste tipo de esquema para o desenvolvimento de um projeto arquitetônico permite que se chegue o mais próximo possível de uma edificação ideal, em que todos os conceitos de sustentabilidade, conforto e eficiência energética sejam atingidos.

3

Modelo Evolucionário para Sustentabilidade Inteligente

Este capítulo introduz um modelo evolucionário para a otimização dos parâmetros de uma construção de modo a minimizar o impacto da mesma sobre os custos ambientais, de construção e de consumo de energia. Com este objetivo em mente, propõe-se um modelo genérico que integre um método de otimização baseado em algoritmos genéticos a um sistema de simulação capaz de fazer os cálculos necessários para se atender aos objetivos que se pretende alcançar.

O modelo proposto neste trabalho é mostrado na figura 3.1.

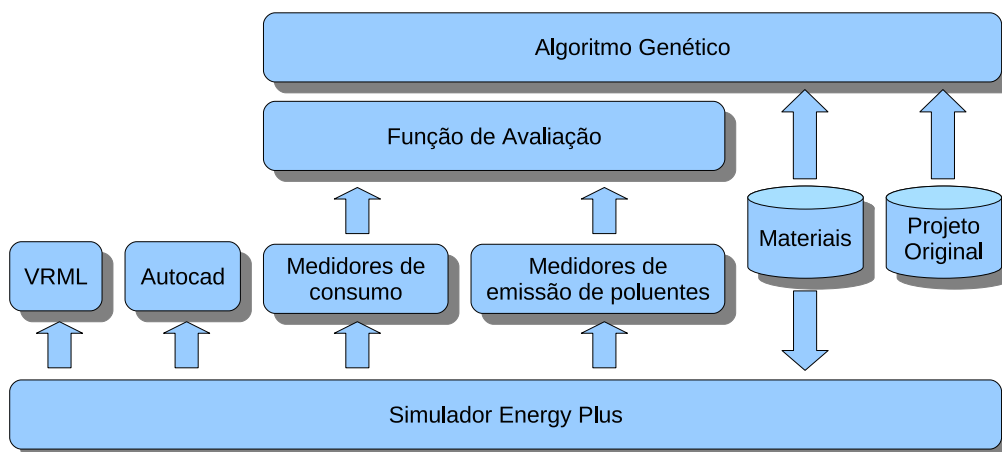


Figura 3.1: Estrutura do modelo proposto.

O algoritmo genético é responsável por ler as informações sobre os materiais que podem ser usados em um projeto, bem como o projeto original fornecido pelo usuário do sistema. Estes dados são usados pelo AG para criar os indivíduos que serão avaliados pela função de avaliação. Esta função fornece o projeto completo, que está codificado dentro de cada indivíduo da população do algoritmo genético, para o EnergyPlus que, por sua vez, executa uma simulação completa fornecendo como saída medições de consumo de eletricidade e de emissão de poluentes. Estes dados são então usados pela função de avaliação para calcular um único valor de avaliação para o indivíduo que foi simulado.

Ao final do processo de otimização, pode-se fazer com que o EnergyPlus gere arquivos para o Autocad e arquivos VRML (Virtual Reality Modelling Language) que podem ser visualizados externamente por programas adequados para este fim.

Deste modo, para se alcançar os objetivos definidos por este modelo, faz-se necessário definir:

- Quais as medidas ou métricas que o EnergyPlus é capaz de fornecer e que se deseja otimizar?
- Quais os parâmetros relacionados a uma construção que têm impacto direto nas medidas ou métricas mencionadas e que, portanto, devem ser manipulados pelo algoritmo genético?

A primeira pergunta está relacionada diretamente com a própria arquitetura e características do EnergyPlus. Considerando-se então que o foco deste trabalho encontra-se na otimização do custo ambiental e do custo financeiro, pode-se listar os seguintes itens como possíveis candidatos a serem usados como objetivos da função de avaliação:

- Consumo de eletricidade para iluminação;
- Consumo de eletricidade para refrigeração;
- Consumo de eletricidade para aquecimento;
- Emissão de poluentes derivados do uso de combustíveis para geração de eletricidade;
- Custo do material para construção da edificação.

Além destes itens principais, pode-se também otimizar alguns itens secundários:

- Taxa de aquecimento ou resfriamento de um ou mais cômodos;
- Ganho de calor por radiação, convecção ou calor latente;
- Temperatura média dentro de um ou mais cômodos.

A segunda pergunta está relacionada aos parâmetros físicos de uma construção, que influenciam nas métricas citadas acima, e que podem ser otimizadas por um algoritmo genético. Constituem o cromossomo do modelo ideal, que será visto na seção 3.2, e tem relação com:

- orientação – localização geográfica;
- janelas – tipo de vidro, altura e largura, uso ou não de bloqueadores;
- paredes – espessura e tipo de material;

- árvores – posicionamento, definição de quantidade e de espécie;
- lâmpadas – posicionamento, quantidade, potência.

A próxima seção descreve cada um dos possíveis objetivos que podem ser usados na função de avaliação.

3.1

Objetivos da Otimização

3.1.1

Consumo de eletricidade para iluminação

Para cada cômodo da edificação, o projetista pode especificar um valor de incidência luminosa (em *lux* ou *lumens/m²*) desejada para um ou dois pontos dentro deste cômodo (por exemplo, qual a incidência luminosa desejada sobre uma escrivaninha). A partir deste valor de incidência luminosa e utilizando-se uma tabela que relaciona os tipos de lâmpada, o consumo em watts dessa lâmpada e a saída em *lumens* que essa mesma lâmpada produz, é possível fornecer ao EnergyPlus qual o consumo de uma lâmpada capaz de fornecer a incidência luminosa desejada no caso de total ausência de qualquer outra fonte de luz dentro do cômodo em questão. Com esta informação, o EnergyPlus é capaz de calcular então a influência de outras fontes luminosas e regular através de um *dimmer* qual a potência que está sendo efetivamente utilizada.

3.1.2

Consumo de eletricidade para refrigeração

O EnergyPlus é capaz de simular diversos tipos diferentes de equipamentos de ventilação e refrigeração. A maior parte destas simulações trabalha com equipamentos que funcionam utilizando *setpoints* que determinam a partir de qual temperatura dentro do cômodo refrigerado o equipamento de refrigeração deve ser acionado.

3.1.3

Consumo de eletricidade para aquecimento

Do mesmo modo que para o consumo de eletricidade relativo à refrigeração, o EnergyPlus também é capaz de simular diversos tipos de equipamentos para aquecimento. Estes equipamentos também trabalham com *setpoints* que determinam a partir de qual temperatura dentro do cômodo aquecido eles devem ser acionados.

3.1.4

Emissão de poluentes

O EnergyPlus é capaz de simular a quantidade de poluentes lançados no meio ambiente decorrentes dos processos de geração de energia. Entre outros tipos de poluentes destacam-se:

- Dióxido de carbono – CO_2
- Monóxido de carbono – CO
- Metano – CH_4
- Óxidos de nitrogênio – NO_x

3.1.5

Custo de materiais para construção

É possível fazer com que o EnergyPlus gere valores de custo para a construção de uma determinada edificação. Desta maneira, é possível calcular, por exemplo, em quanto tempo haverá um retorno do investimento na construção com a economia de energia ao se utilizar materiais mais caros, mas mais adequados para um menor consumo de energia.

Com a definição dos objetivos que se pode otimizar, a próxima etapa consiste em definir quais os parâmetros que têm impacto sobre estes objetivos e que, portanto, devem fazer parte do cromossomo no algoritmo genético. A seção 3.2 trata da definição destes parâmetros.

3.2

Cromossomo do Modelo Ideal

O cromossomo do modelo ideal é aquele capaz de compreender os vários parâmetros de uma edificação, que podem ser otimizados.

Em um processo de otimização busca-se minimizar uma função de várias variáveis que poderia ser representada da seguinte forma: $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \dots, x_n)$, cujo valor tem que ser o menor possível, onde $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \dots, x_n)$ são as variáveis da função. Estas variáveis devem, de algum modo, estar relacionadas aos objetivos que se quer minimizar, de modo que a manipulação dos valores destas variáveis permita que se altere o valor destes objetivos. Alguns dos parâmetros que podem influenciar os objetivos são:

- Espessura de uma parede – a espessura da parede está diretamente relacionada a transmissividade de radiação térmica, tanto do exterior da construção para o interior, quanto do interior para o exterior. Pode-se definir uma espessura mínima desejada e uma espessura máxima para que o algoritmo possa encontrar o melhor valor dentro desta faixa;

- Tipo de material de uma parede – uma parede (tanto interna como externa) pode ser construída a partir de um ou mais materiais diferentes. A escolha dos materiais e a disposição dos mesmos em camadas também pode ser otimizada pelo algoritmo genético;
- Altura da parede (pé-direito) – a altura do pé-direito está intimamente relacionada à circulação de ar no interior da construção e ao volume de ar que se necessita para aquecer ou resfriar um determinado cômodo. Os valores mínimos e máximos desejáveis para o pé-direito podem ser fornecidos para o algoritmo genético para que o mesmo faça a otimização desta altura;
- Altura de uma janela – a altura de uma janela tem impacto na capacidade de ventilação, na quantidade de iluminação e na quantidade de radiação térmica que entra no cômodo. Fixando-se a altura do peitoril da janela, pode-se definir uma altura mínima e máxima que se deseja e permitir que o algoritmo genético faça a otimização deste parâmetro;
- Largura de uma janela – do mesmo modo que a altura da janela, a largura tem impacto na capacidade de ventilação, na quantidade de iluminação e na quantidade de radiação térmica que entra no cômodo. A otimização deste parâmetro pode ser feita determinando-se o percentual mínimo e máximo que a janela pode ocupar em relação a largura total da parede onde a janela está posicionada;
- Tipo de vidro – do mesmo modo que uma parede, o vidro das janelas pode ser feito de diferentes materiais, espessuras e camadas. Estes parâmetros também podem ser otimizados pelo algoritmo genético;
- Orientação da edificação em relação ao norte geográfico – a orientação de uma edificação em relação ao norte geográfico tem papel importante pois ajuda a definir quais cômodos recebem luz do sol pela manhã e quais recebem luz do sol no período da tarde. Isto tem impacto direto na iluminação dos cômodos e na necessidade de refrigeração e aquecimento dos cômodos;
- Posicionamento de árvores em relação à edificação – as árvores oferecem uma proteção natural quanto ao calor gerado pela luz do sol. Por outro lado, bloqueiam a entrada de luz solar e podem fazer com que seja necessário acender luzes no interior dos cômodos. A otimização da posição das árvores dentro do terreno da construção bem como o tipo de árvore, pode ajudar a encontrar a melhor disposição possível para minimizar os custos de refrigeração e iluminação;
- Posicionamento de lâmpadas em um ambiente – o EnergyPlus permite que, para cada cômodo, se defina até dois pontos onde se deseja fazer uma medição da intensidade luminosa. A partir desta definição o EnergyPlus calcula qual

a intensidade que os pontos de luz devem ter para fornecer a intensidade desejada. No caso em que se define dois pontos de medição de luz, pode ser interessante otimizar a posição do ponto de luz de forma a se obter a configuração mais econômica possível.

É possível definir ainda outros parâmetros que podem ser otimizados visando minimizar o consumo de energia elétrica e aumentar o conforto térmico para o usuário da construção. No entanto, os parâmetros relacionados anteriormente são os que estão mais fortemente relacionados com os possíveis objetivos que se quer minimizar no processo de otimização.

4

Estudo de casos

Este capítulo apresenta estudo de casos para averiguar a eficácia do modelo definido no capítulo 3. Para provar que os conceitos funcionam e que o método é viável, decidiu-se otimizar os seguintes parâmetros:

- otimizar a altura do pé direito da edificação (altura da parede), seguindo as restrições quanto ao valor mínimo e máximo que a mesma pode ter;
- otimizar a espessura dos materiais que constituem as paredes, seguindo restrições quanto aos valores máximo e mínimo que os mesmos podem ter;
- otimizar a largura de uma janela, que deve atender a um percentual mínimo e máximo com relação à largura total da parede em que está inserida;
- otimizar a localização de árvores no entorno da edificação, uma vez que funcionam como anteparos para a radiação solar e a iluminação;
- otimizar a orientação da edificação em relação ao norte geográfico;
- associar o uso de bloqueadores solares internos e sua influência no consumo de energia pelos sistemas de condicionamento de ar e iluminação artificial.

A figura 4.1 ilustra quais os parâmetros que serão otimizados pelo modelo proposto.

Considerando os objetivos anteriormente citados, o passo seguinte é a definição do cromossomo.

4.1

Definição do Cromossomo

Como já explicitado na seção 2.1, o cromossomo é constituído de genes, e cada um representa uma variável que se quer otimizar. O cromossomo que é utilizado neste trabalho é formado pelos seguintes genes:

Orientação da Construção: 1 gene define a orientação da casa em relação ao Norte geográfico, cuja angulação pode variar entre 0 e 359 graus;

Janelas: 1 gene para o percentual da largura total da parede que a janela irá ocupar (número entre 0 e 1);

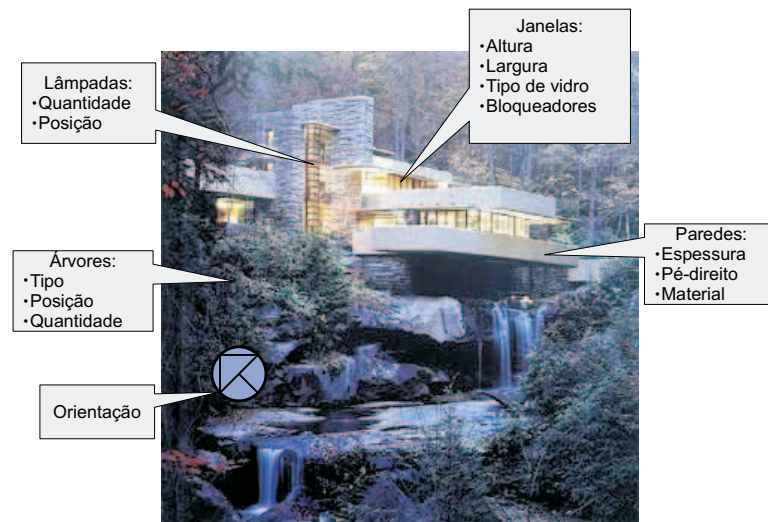


Figura 4.1: Parâmetros otimizados pelo cromossomo do modelo ideal – Casa Kaufmann (ou Casa da Cascata) – Projeto de Frank Lloyd Wright, 1936

Pé direito: 1 gene, com restrição para valores mínimo e máximo;

Árvores: 2 genes com as coordenadas da árvore;

Espessura das Paredes: 1 gene para a espessura de cada um dos materiais que compõe as paredes.

Bloqueadores: 1 gene diferente para cada bloqueador de janela, com índice de transmissividade variando entre 0 e 1.

De forma esquemática, o cromossomo pode ser representado como é demonstrado na figura 4.2.

GENES						
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
X_1	Orientação da construção ($0 < \alpha < 359^\circ$)					
X_2	Largura da janela (0 a 1)					
X_3	Pé direito					
X_4	Árvore (coordenada X – relativa ao proj. original)					
X_5	Árvore (coordenada Y – relativa ao proj. original)					
X_6	Espessura dos materiais das paredes					
X_7	Bloqueadores (transmissividade de 0 a 1)					

Figura 4.2: Definição do Cromossomo

Para se realizar a avaliação, o otimizador gera um arquivo de entrada para o EnergyPlus e requisita que o mesmo faça os cálculos necessários para o consumo de energia elétrica relativo ao uso de iluminação e em sistemas de aquecimento e

refrigeração. Neste trabalho, estes cálculos são feitos com base em dados meteorológicos da cidade do Rio de Janeiro coletados pela Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization region and Country – WMO). Os dados meteorológicos usados pelo EnergyPlus estão em formato de texto, baseado no formato meteorológico do TMY (Typical Meteorological Year 2). No caso do Brasil, são utilizados dados típicos recolhidos de hora em hora, anualmente. Estes dados estão disponíveis através do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), projeto este financiado pelo Programa Ambiental das Nações Unidas.

4.2

Função de Avaliação

Como dito anteriormente, a função de avaliação tem como objetivo calcular a aptidão dos indivíduos da população em relação ao ambiente em que ele está inserido.

No estudo de casos deste trabalho, utilizou-se dois tipos de função de avaliação, dependentes do tipo de problema estudado. Visando sempre a redução do consumo de energia em uma edificação, o primeiro problema estudado utiliza uma função de avaliação definida para uma situação em que se deseja diminuir o consumo de energia por condicionamento de ar. Neste caso, a função de avaliação é dada pela equação abaixo:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{365} h_i}{365} \quad (4-1)$$

O segundo problema estudado também visa reduzir o consumo de energia, porém através de sistemas de condicionamento de ar e do uso de iluminação artificial. Para este problema, adota-se a função de avaliação dada pela equação que segue abaixo:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{365} h_i + l_i}{365} \quad (4-2)$$

4.3

Esquema da otimização

A figura 4.3 representa, de forma esquemática, o que está sendo otimizado no estudo de casos analisado neste trabalho.

Como já dito anteriormente, é possível otimizar duas questões importantes levantadas neste trabalho: o consumo de energia e o nível de emissão de poluentes. Entretanto, neste estudo de casos, apenas o consumo de energia será analisado,

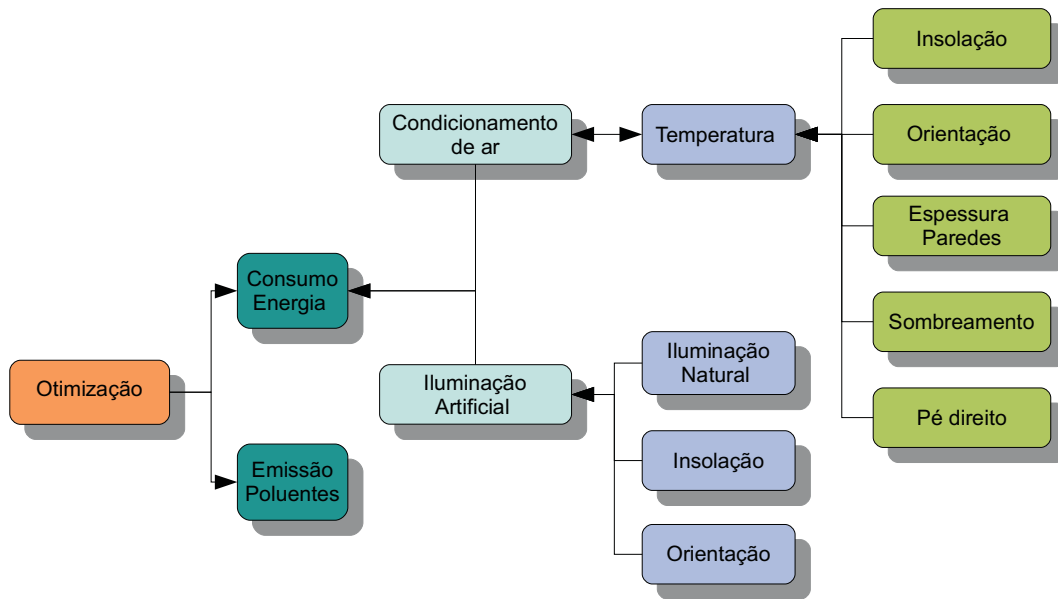


Figura 4.3: Otimização

já que a emissão de poluentes é fortemente influenciada pelo consumo de energia elétrica. O consumo de energia é influenciado diretamente pelo sistema de condicionamento de ar e pelo uso de iluminação artificial. O funcionamento do sistema de condicionamento de ar está intimamente ligado à temperatura do ambiente, que pode ser influenciada pelos seguintes fatores: radiação solar incidente sobre a edificação (insolação); orientação da edificação; espessura das paredes; sombreamento por anteparos e dimensionamento do pé direito. A necessidade da iluminação artificial, por sua vez, está intimamente ligada à iluminação natural, à insolação e à orientação da edificação.

4.4

Estudo de Caso 1

A edificação original, conforme pode ser visto nas figuras 4.4 e 4.5, foi utilizada como desenho base para a realização de quatro testes. O círculo no centro do desenho representa o ponto de medição da intensidade da luz. A medição da intensidade de luz é feita com fotosensores e o sistema de iluminação funciona da seguinte maneira: o projetista deve fornecer uma especificação de lâmpada que seja capaz de prover iluminação suficiente neste ponto de medição quando utilizada em sua capacidade máxima e quando nenhuma outra fonte de luz estiver disponível. Quando outras fontes de iluminação se tornam disponíveis (em geral, a luz do sol através de uma janela), o EnergyPlus simula o uso de *dimmers* para diminuir a iluminação artificial e, conseqüentemente, o consumo de energia elétrica.

A construção apresentada é simples, tratando-se de uma área quadrada de dimensões 3,0 m x 3,0 m. O projetista define, para este desenho, que o mesmo é

constituído de 3 janelas e 1 porta. As janelas têm dimensões 1,0 m x 1,0 m (largura x altura), definidas previamente pelo projetista. A porta tem dimensões 1,0 m x 2,10 m (largura x altura), também definidas pelo projetista. Esta construção possui um sistema de condicionamento de ar, cujo funcionamento está baseado nos seguintes critérios:

- o sistema é acionado, visando aquecer o ambiente, se a temperatura interna da edificação atingir 10 °C;
- o sistema é acionado, visando resfriar o ambiente, se a temperatura interna da edificação atingir 25 °C.

Considerando que os dados climáticos utilizados para a simulação são referentes à cidade do Rio de Janeiro, Brasil, deve-se ter em mente que, no verão, a incidência solar se dá na fachada Sul da edificação original, por aproximadamente duas semanas do ano. Nas demais estações do ano, a insolação incide, na maior parte do ano, nas fachadas Leste, Norte e Oeste.

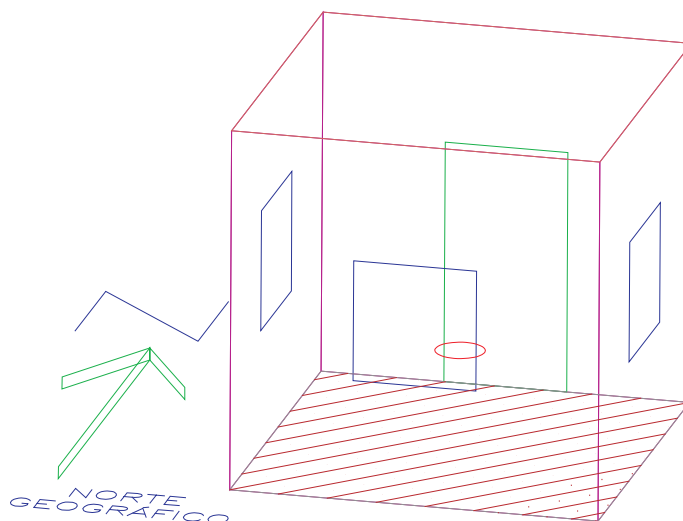


Figura 4.4: Casa Original – Estudo de Caso 1 – Perspectiva

Foram realizados 4 testes onde, para cada um, foram consideradas diferentes características para a otimização, que serão descritas a seguir.

Para os testes 01, 02, 03 e 04, os parâmetros do AG foram definidos da seguinte forma:

- Taxa de steady state = 20%;
- Operadores genéticos utilizados, para uma taxa de *Crossover* de 80% e taxa de mutação de 10%:

Crossover Atitmético;

Crossover Uniforme;

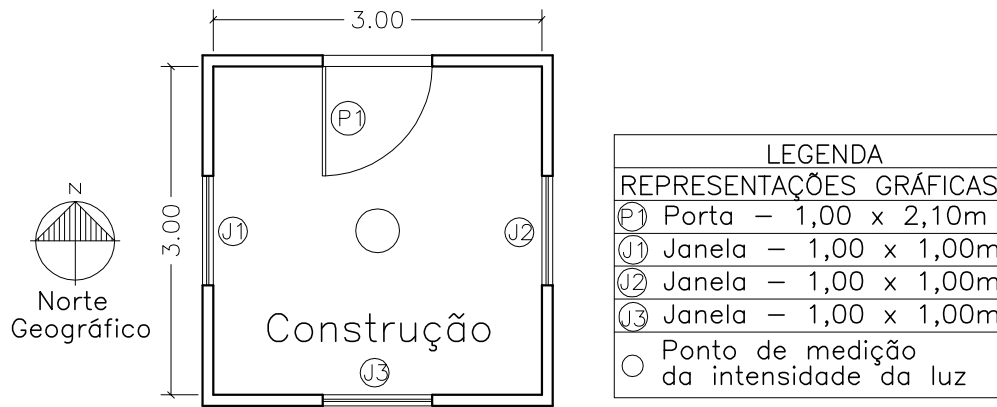


Figura 4.5: Casa Original – Estudo de Caso 1 – Planta Baixa

Mutação Creep;

Mutação Uniforme;

- População Inicial = 50 indivíduos;
- Número de Gerações = 50;
- Média de 10 experimentos.

O projeto final, que foi gerado pelo modelo, representa o melhor indivíduo, da última geração, do melhor experimento.

4.4.1

Teste 1

No teste 1, o objetivo é minimizar o custo do sistema HVAC. O teste é realizado sem o uso de bloqueadores solares para as janelas. A potência especificada para as lâmpadas é de 100W. Para este teste, não há restrições para o uso da iluminação artificial, pois a preocupação do AG está na redução de consumo de energia elétrica pelo sistema de condicionamento de ar.

O modelo evolucionário gerou, como resultado, os desenhos que podem ser vistos nas figuras 4.6 e 4.7.

Analisando o desenho gerado pelo modelo evolucionário, faz-se as seguintes análises:

1. a edificação sofreu modificação em relação à sua orientação geográfica, sendo rotacionada em aproximadamente 90°, de forma que a incidência solar fosse minimizada. Como o Rio de Janeiro fica sobre a linha do trópico, a maior parte da radiação solar incide no Leste, Oeste e Norte. Desta maneira, o sistema manteve a janela de maior abertura orientada na direção Sul;
2. o tamanho das janelas foi otimizado, de forma a minimizar a entrada de calor no ambiente. As janelas das fachadas Leste (que recebe o sol matinal) e Norte,

são mínimas. A porta, por ser opaca e não permitir a entrada de calor de forma relevante, foi posicionada na fachada Oeste, que recebe a maior incidência solar, evitando assim que haja substancial entrada de calor no ambiente. A fachada Sul, que recebe pouca insolação, apresenta uma janela com largura um pouco maior que as demais;

3. arquitetonicamente, as janelas das fachadas Leste e Norte seriam dispensáveis, pelo fato de suas dimensões não proporcionarem nenhum benefício estético e funcional.

Nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, e 4.8, apresenta-se os valores médios de consumo em kW/dia. Os dados das colunas “Luz”, “HVAC” e “AG Total” representam o consumo de energia da edificação otimizada, referente ao sistema de iluminação artificial (Luz), ao sistema de condicionamento de ar (HVAC) e ao consumo total por estes dois sistemas (AG Total). Os dados das colunas “Ref. Luz”, “Ref. HVAC” e “Ref. Total”, representam o consumo da edificação original, desenvolvida pelo projetista, também quanto ao sistema de iluminação artificial, de condicionamento de ar e consumo total, respectivamente. Os dados da coluna “Dif.%”, representam a diferença entre o consumo dos dois sistemas.

Para o teste 1, a edificação otimizada teve seu consumo de energia reduzido em 14,82%, com relação à edificação original, conforme pode ser visto na tabela 4.1.

A figura 4.8 mostra um gráfico comparativo entre a busca aleatória e o algoritmo genético. Este gráfico mostra que o AG consegue resultados melhores do que um algoritmo de busca ingênuo.

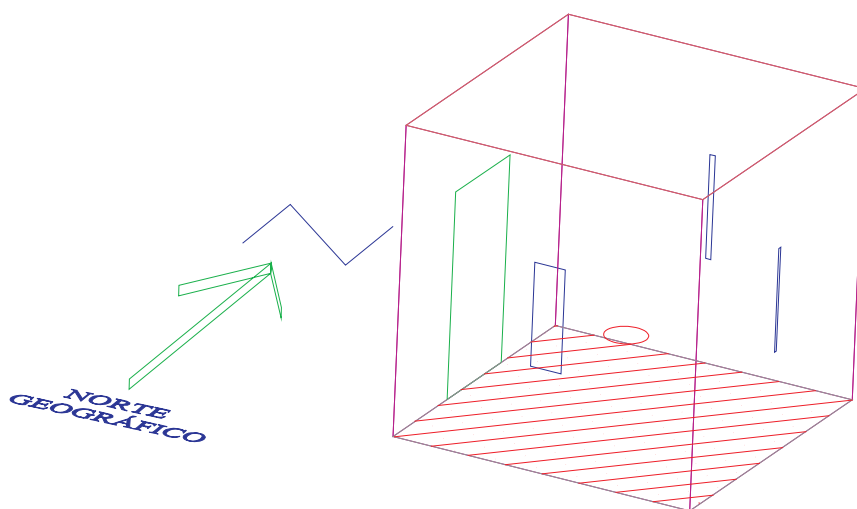


Figura 4.6: Teste 1 – Perspectiva

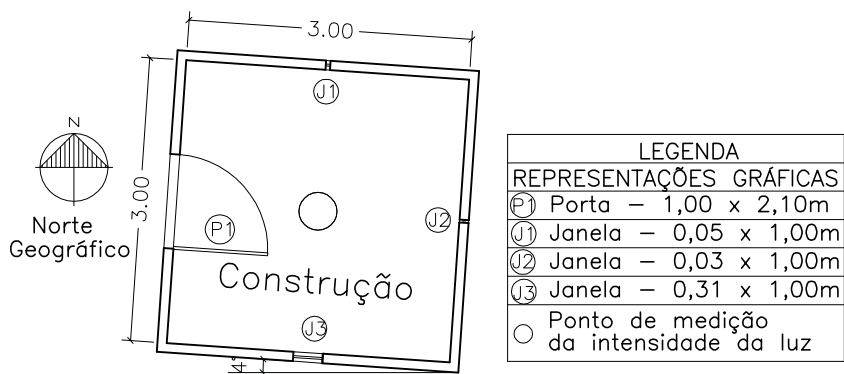


Figura 4.7: Teste 1 – Planta Baixa

Valores médios de consumo (kW/dia)							
Teste	Luz	HVAC	AG Total	Ref. Luz	Ref. HVAC	Ref. Total	Dif.(%)
1	3.61	1.44	5.05	3.17	2.76	5.93	14.82

Tabela 4.1: Valores médios de consumo – Teste 1

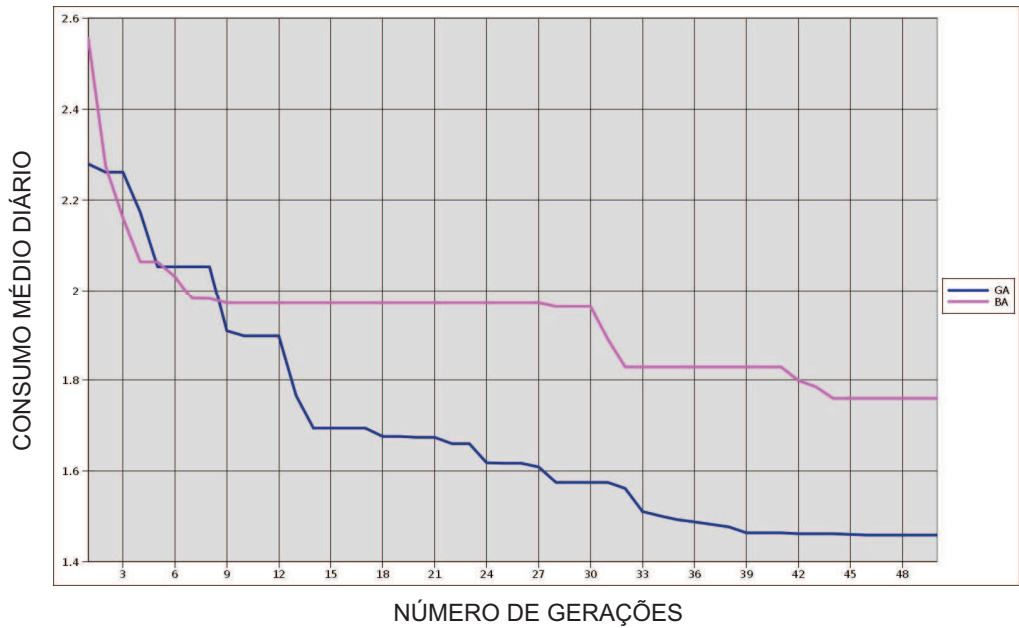


Figura 4.8: Resultado Teste 1 – Algoritmo Genético e Busca Aleatória

4.4.2

Teste 2

No teste 2, o objetivo é minimizar o consumo do sistema HVAC e o consumo com iluminação artificial. Este objetivo é conflitante, pois ao se dar preferência a um sistema, o outro sairá prejudicado. Este teste também é realizado sem o uso de bloqueadores nas janelas. A potência da lâmpada utilizada é de 100W.

O modelo evolucionário gerou, como resultado, os desenhos que podem ser vistos nas figuras 4.9 e 4.10.

Analizando o desenho gerado pelo modelo evolucionário, faz-se as seguintes análises:

1. a edificação sofreu pequena modificação em relação à sua orientação geográfica, uma vez que o AG busca otimizar a insolação nas fachadas, A rotação se deu em aproximadamente 12° , de forma que a radiação solar fosse minimizada, mas que se aproveitasse ao máximo a iluminação natural, principalmente no final do dia, adiando ao máximo a necessidade de se optar pelo uso da iluminação artificial;
2. o tamanho das janelas foi otimizado, de forma a minimizar, ao máximo, a entrada de calor no ambiente pelas janelas das fachadas Leste (que recebe o sol matinal) e Oeste (que recebe o Sol na maior parte da tarde). Ao mesmo tempo que evita a entrada de calor, diminui a entrada de luz natural. A porta, por ser opaca e não permitir a entrada de calor e nem da luz natural de forma relevante, foi mantida na fachada Norte. A fachada Sul, apesar de receber pouca insolação, permite que se aproveite por mais tempo (mais horas do dia) a luz natural, evitando que se tenha que acender as luzes da casa muito cedo. Portanto, o AG permite a entrada de luz, sem prejuízo quanto à entrada de calor.
3. arquitetonicamente, a janela da fachada Leste seria dispensável, por sua dimensão não proporcionar nenhum benefício estético e funcional, uma vez que não auxilia na iluminação natural nem prejudica o conforto térmico.

Na tabela 4.2, apresenta-se os valores médios de consumo, em kW/dia, para o teste 2. Neste teste, a edificação otimizada teve seu consumo de energia reduzido em 13,93%, com relação à edificação original. Comparando-se os resultados do teste 1 com os do teste 2, pode-se perceber que o AG continua dando preferência à economia com o sistema de condicionamento de ar.

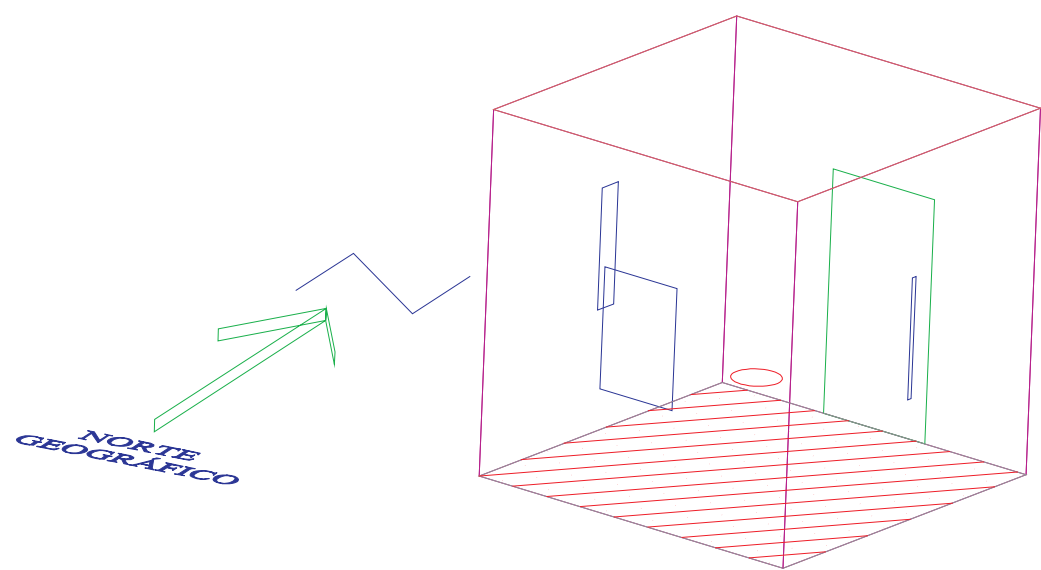


Figura 4.9: Teste 2 – Perspectiva

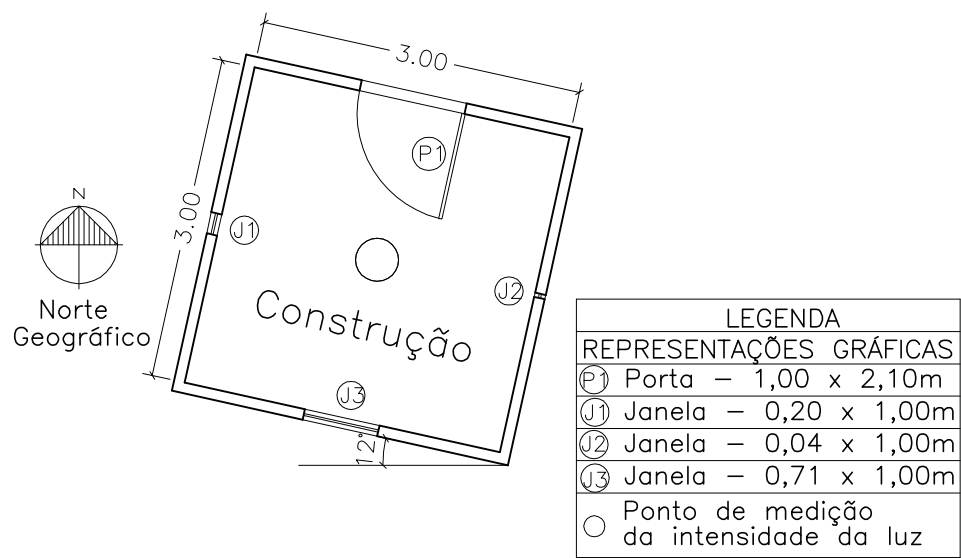


Figura 4.10: Teste 2 – Planta Baixa

Valores médios de consumo (kW/dia)							
Teste	Luz	HVAC	AG Total	Ref. Luz	Ref. HVAC	Ref. Total	Dif.(%)
2	3.30	1.80	5.10	3.17	2.76	5.93	13.93

Tabela 4.2: Valores médios de consumo – Teste 2

4.4.3

Teste 3

No teste 3, o objetivo é minimizar o custo do sistema HVAC. O teste é realizado com o uso de bloqueadores solares nas janelas, como por exemplo, cortinas. A potência da lâmpada utilizada é de 100W. Como o objetivo do AG é minimizar o custo do sistema HVAC, ele tem liberdade para utilizar a iluminação artificial.

O modelo evolucionário gerou, como resultado, os desenhos que podem ser vistos nas figuras 4.11 e 4.12.

Analisando o desenho gerado pelo modelo evolucionário, faz-se as seguintes análises:

1. a edificação sofreu modificação em relação à sua orientação geográfica, sendo rotacionada em aproximadamente 98°;
2. com o uso de bloqueadores, reduz-se a incidência solar, uma vez que a transmissividade do vidro, que é alta, é compensada pela baixa transmissividade do bloqueador, reduzindo a entrada de calor no ambiente. O AG, portanto, controla os bloqueadores (otimiza a transmissividade), de forma a permitir entrada de luz e regular entrada de calor. Neste teste, o tamanho das janelas foi otimizado de forma que a janela da fachada Norte seja mínima, para evitar a entrada de calor, uma vez que a incidência solar nesta fachada se dá em longo período do dia, conforme a movimentação solar. A porta foi posicionada na fachada Oeste, que também recebe grande incidência solar, evitando assim que haja substancial entrada de calor no ambiente. A fachada Sul, que recebe pouca insolação, apresenta uma janela maior, pois o controle dos bloqueadores evita a entrada de calor que prejudique a economia de energia pelo sistema; a fachada Leste, que recebe o Sol da manhã apresenta uma janela cuja largura é maior do que a da fachada Norte, por sofrer menor influência da incidência solar, em termos de calor.
3. arquitetonicamente, a janela da fachada Norte seria dispensável, por sua dimensão não proporcionar nenhum benefício estético e funcional.

Na tabela 4.3, apresenta-se os valores médios de consumo do teste 3. Para a edificação otimizada, houve redução no consumo de iluminação artificial e de condicionamento do ar, redução esta no valor de 26,45% em relação à edificação original.

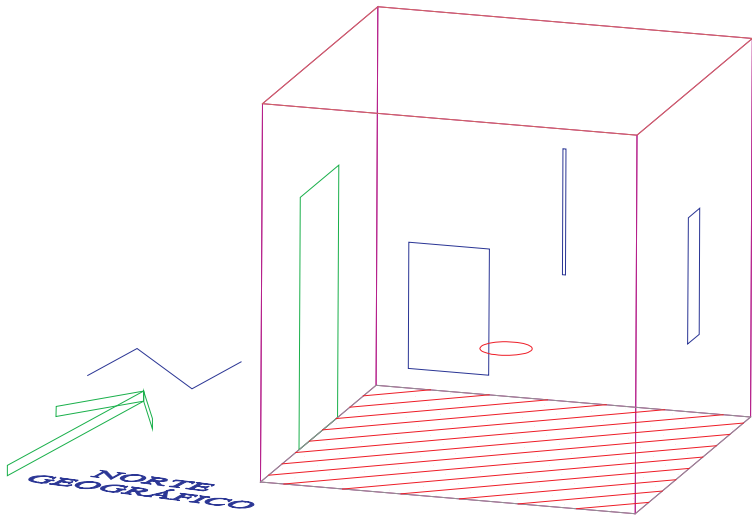


Figura 4.11: Teste 3 – Perspectiva

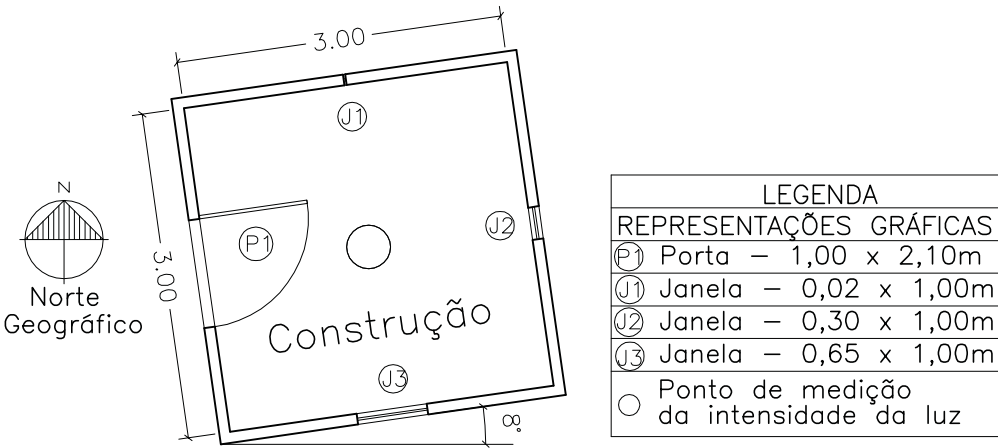


Figura 4.12: Teste 3 – Planta Baixa

Valores médios de consumo (kW/dia)							
Teste	Luz	HVAC	AG Total	Ref. Luz	Ref. HVAC	Ref. Total	Dif.(%)
3	3.55	1.65	5.20	4.39	2.69	7.08	26.45

Tabela 4.3: Valores médios de consumo – Teste 3

4.4.4**Teste 4**

No teste 4, o objetivo é minimizar o consumo do sistema HVAC e o consumo com iluminação artificial. Este teste também é realizado com o uso de bloqueadores. A potência da lâmpada utilizada é de 100W.

O modelo evolucionário gerou, como resultado, os desenhos que podem ser vistos nas figuras 4.13 e 4.14.

Analisando o desenho gerado pelo modelo evolucionário, faz-se as seguintes análises:

1. a edificação sofreu modificação em relação à sua orientação geográfica, sendo rotacionada em aproximadamente 250°;
2. com o uso de bloqueadores, reduz-se a incidência solar, porém a incidência da luz natural também é reduzida. O AG reduz ao mínimo as janelas das fachadas Norte e Sul, evitando a entrada de calor excessivo tanto no verão quanto no inverno. Na fachada Oeste, o AG otimiza a janela de forma a compensar a iluminação natural e a transmissividade do bloqueador solar, de forma a evitar a entrada excessiva de calor no ambiente.
3. arquitetonicamente, a janela da fachada Sul seria dispensável, por sua dimensão não proporcionar nenhum benefício estético e funcional.

A tabela 4.4 apresenta os valores médios de consumo para o teste 4. Como o teste 2, o teste 4 também visa o custo para os sistemas de iluminação artificial e de condicionamento de ar. O que difere o teste 4 do teste 2 é o uso de bloqueadores solares nas janelas. Comparando-se os resultados das edificações otimizada e original, pode-se perceber que a redução no consumo de energia foi de 25,12%, favorável à edificação otimizada.

Valores médios de consumo (kW/dia)							
Teste	Luz	HVAC	AG Total	Ref. Luz	Ref. HVAC	Ref. Total	Dif.(%)
4	3.33	1.97	5.30	4.39	2.69	7.08	25.12

Tabela 4.4: Valores médios de consumo – Teste 4

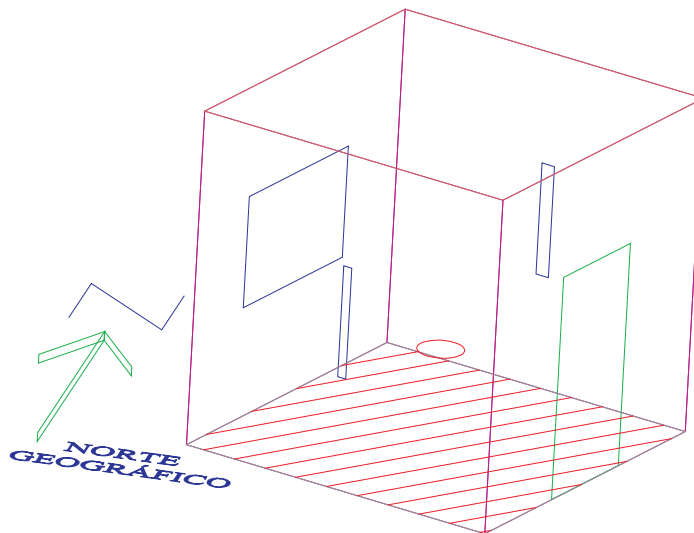


Figura 4.13: Teste 4 – Perspectiva

4.5

Estudo de Caso 2

A edificação original pode ser vista nas figuras 4.15 e 4.16, e na figuras 4.17 e 4.18, utilizadas como desenho base para a realização dos testes. As figuras 4.15 e 4.16 diferem das figuras 4.17 e 4.18 por possibilitarem a otimização de árvores no entorno da edificação. O círculo no centro do desenho representa o ponto de medição da intensidade da luz. A medição da intensidade de luz é feita como já explicado na seção 4.4.

Este desenho trata de uma casa mais complexa, com dimensões de 8,0 m x 6,0 m, onde o projetista define que a mesma é constituída por 1 banheiro, 1 quarto e 1 sala. As janelas estão dispostas da seguinte forma: 1 janela no banheiro, 2 janelas no quarto, 2 janelas na sala e 1 porta na sala funcionando como acesso (entrada/saída). As portas internas não influenciam nos cálculos de consumo. As dimensões originais das janelas foram definidas pelo projetista e têm as seguintes medidas: 1,00 m x 1,00 m (largura x altura). As portas também tiveram suas dimensões definidas pelo projetista: 1,00 m x 2,10 m (largura x altura). A potência das lâmpadas varia de acordo com o teste. Para o teste 5, foram utilizadas lâmpadas de 100W de potência. Para os testes 6 e 7 foram utilizadas lâmpadas de 15W de potência. A edificação possui um sistema de condicionamento de ar, cujo funcionamento está baseado nos mesmos critérios do estudo de caso 1:

- o sistema de aquecimento é acionado, se a temperatura interna da edificação atingir 10°C;
- o sistema de refrigeração é acionado, se a temperatura interna da edificação atingir 25°C;

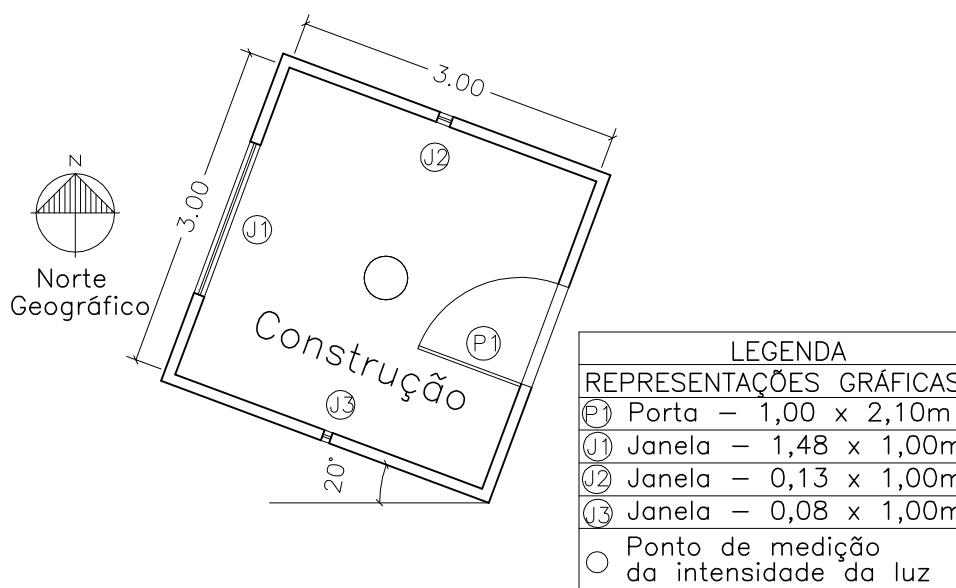


Figura 4.14: Teste 4 – Planta Baixa

O banheiro da edificação não tem termostatos e não tem sistema de aquecimento ou refrigeração disponíveis.

Foram realizados 3 testes. Para todos os testes (testes 01, 02, 03), os parâmetros do AG foram definidos da seguinte forma:

- Taxa de steady state = 20%;
- Operadores genéticos utilizados, para uma taxa de *Crossover* de 80% e taxa de mutação de 10%:

Crossover Atitmético;

Crossover Uniforme;

Mutação Creep;

Mutação Uniforme;

- População Inicial = 30 indivíduos;
- Número de Gerações = 40;
- Média de 10 experimentos.

O projeto final, que foi gerado pelo modelo, representa o melhor indivíduo, da última geração, do melhor experimento.

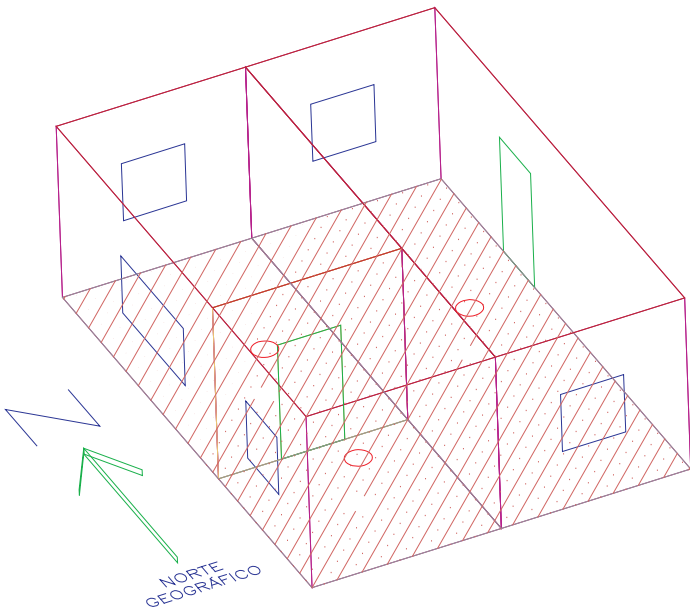


Figura 4.15: Casa Original – Estudo de Caso 2 – Perspectiva

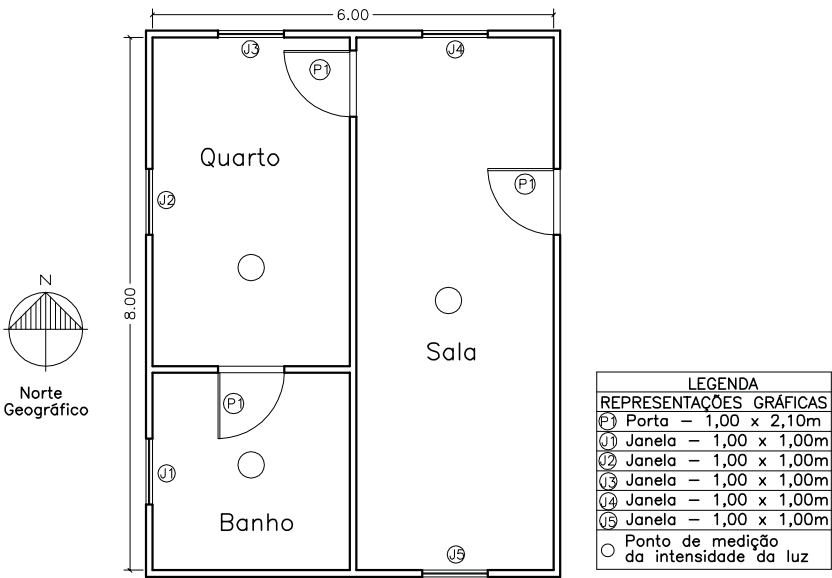


Figura 4.16: Casa Original – Estudo de Caso 2 – Planta Baixa

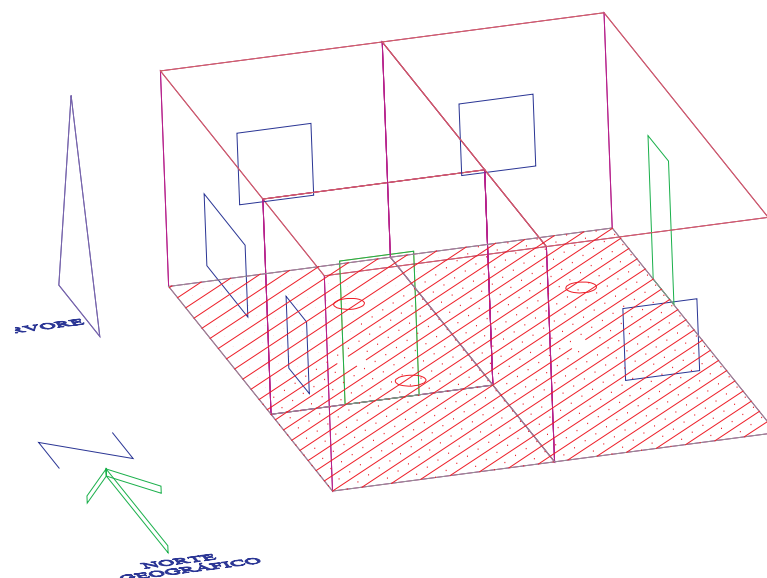


Figura 4.17: Casa Original com Árvore – Estudo de Caso 2 – Planta Baixa

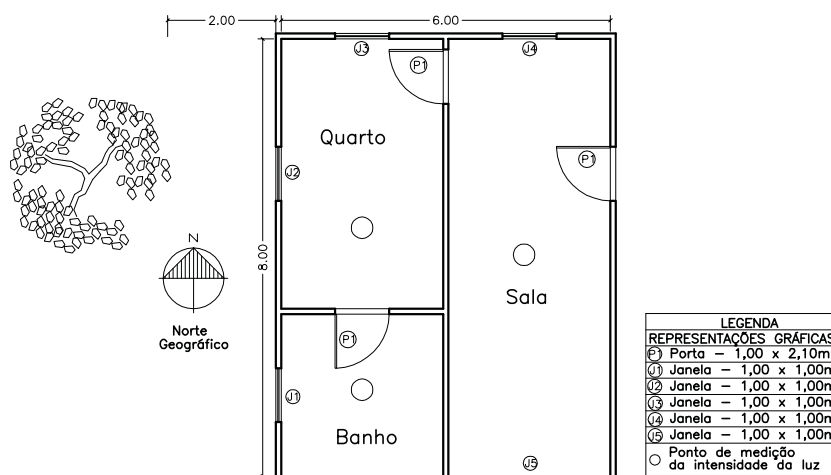


Figura 4.18: Casa Original com Árvore – Estudo de Caso 2 – Planta Baixa

4.5.1 Teste 5

No teste 5, o objetivo é minimizar o consumo do sistema HVAC e o consumo com iluminação artificial. Este teste é realizado sem o uso de bloqueadores. Foram utilizadas lâmpadas de 100W.

O modelo evolucionário gerou, como resultado, os desenhos que podem ser vistos nas figuras 4.19 e 4.20.

Analisando o desenho gerado pelo modelo evolucionário, faz-se as seguintes análises:

1. a edificação sofreu modificação em relação à sua orientação geográfica, sendo rotacionada em aproximadamente 240°;

2. no banheiro, o AG privilegia ao máximo a iluminação natural, pois não há sistema de condicionamento de ar;
3. para o quarto, por ser um cômodo de permanência noturna, o AG otimiza as janelas, permitindo a iluminação natural no período da manhã e conforto térmico à noite;
4. para a sala, por ser um cômodo de permanência diurna, o AG dá preferência à iluminação natural. Portanto, otimiza as janelas da fachada Noroeste e da fachada Sudeste, diminuindo a entrada do calor na casa no período da manhã.
5. arquitetonicamente, as janelas da fachada Sudeste seriam dispensáveis, por sua dimensão não proporcionar nenhum benefício estético e funcional.
6. as portas internas não influenciam no cálculo do consumo de energia

A tabela 4.5 apresenta os valores de consumo para o teste 5. A edificação otimizada reduziu em 25,30% o consumo de energia, em relação à edificação original.

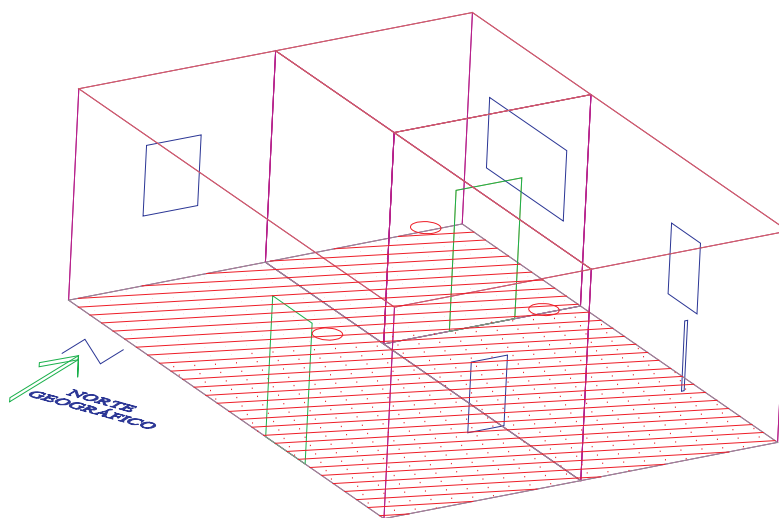


Figura 4.19: Teste 5 – Perspectiva

Valores médios de consumo (kW/dia)							
Teste	Luz	HVAC	AG Total	Ref. Luz	Ref. HVAC	Ref. Total	Dif.(%)
5	4.52	0.89	5.41	4.42	2.83	7.25	25.30

Tabela 4.5: Valores médios de consumo – Teste 5

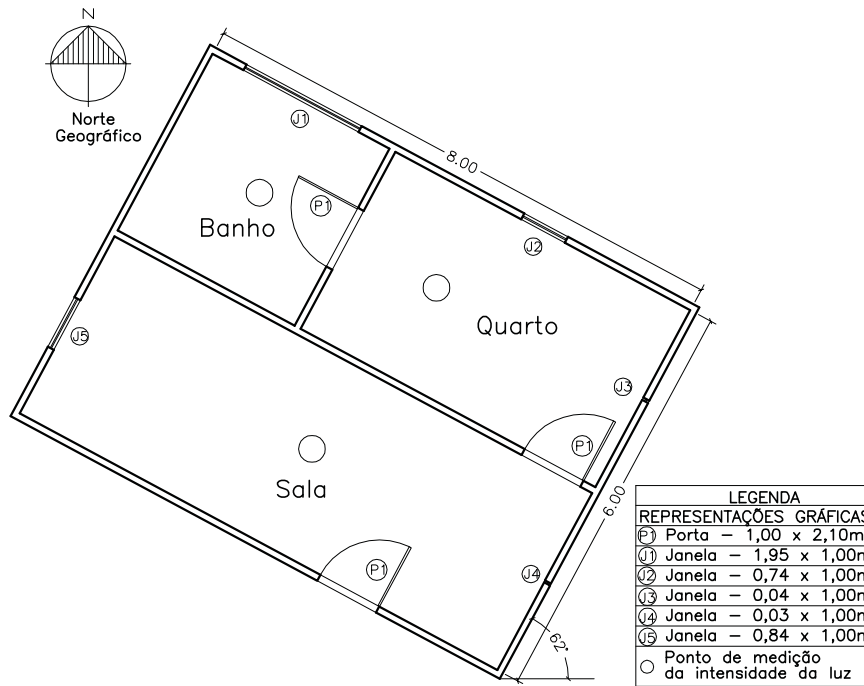


Figura 4.20: Teste 5 – Planta Baixa

4.5.2

Teste 6

No teste 6, o objetivo é minimizar o consumo do sistema HVAC e o consumo com iluminação artificial. Este teste é realizado sem o uso de bloqueadores. Foram utilizadas lâmpadas de 15W, pois este tipo de lâmpada consome menos energia que a de 100W para proporcionar a mesma iluminação de 50 lux. .

O modelo evolucionário gerou, como resultado, os desenhos que podem ser vistos nas figuras 4.21 e 4.22.

Analisando o desenho gerado pelo modelo evolucionário, faz-se as seguintes análises:

1. a edificação sofreu pequena modificação em relação à sua orientação geográfica, sendo rotacionada em 7°;
2. no quarto, o AG minimiza as janelas de forma evitar a entrada de calor, seja na fachada Norte, seja na fachada Oeste, dando preferência ao sistema HVAC, uma vez que, diminuindo a largura das janelas, diminui a entrada da iluminação natural neste cômodo;
3. na sala, como na fachada Sul a insolação se dá por poucas semanas, a janela desta fachada tem maior dimensão, não prejudicando o conforto térmico do ambiente e permitindo que haja iluminação natural através da mesma, por mais horas do dia. Na fachada Norte, o AG minimiza a janela de forma que entre o mínimo de calor possível;

4. no banheiro ocorre o mesmo que no teste anterior: o AG privilegia ao máximo a iluminação natural, pois não há sistema de condicionamento de ar, permitindo que a largura da janela seja de grande dimensão;
5. arquitetonicamente, as janelas da fachada Norte poderiam ser dispensadas, por sua dimensão não proporcionar nenhum benefício estético e funcional.
6. as portas internas não influenciam no cálculo do consumo de energia.

A tabela 4.6 apresenta os valores de consumo para o teste 6. A redução no consumo de energia entre as edificações otimizada e original foi de 74,21%.

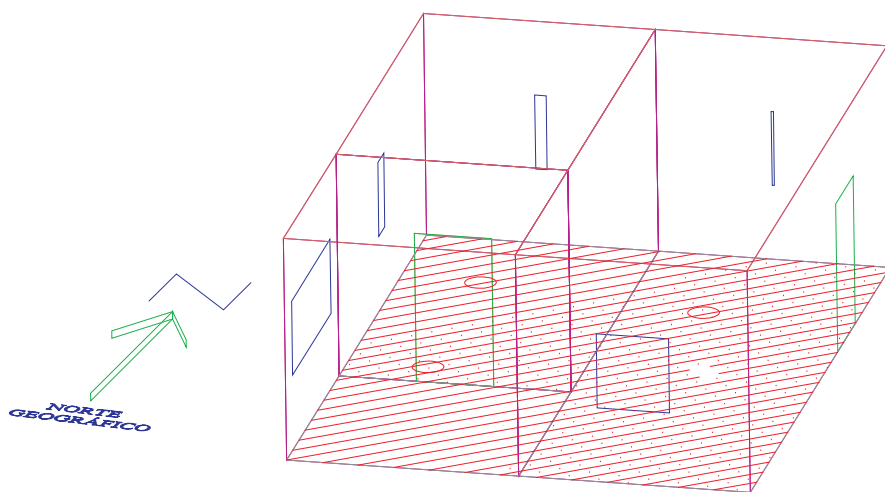


Figura 4.21: Teste 6 – Perspectiva

Valores médios de consumo (kW/dia)							
Teste	Luz	HVAC	AG Total	Ref. Luz	Ref. HVAC	Ref. Total	Dif.(%)
6	0.71	0.00	0.71	0.66	2.07	2.73	74.21

Tabela 4.6: Valores médios de consumo – Teste 6

4.5.3 Teste 7

No teste 7, o objetivo é minimizar o consumo do sistema HVAC e o consumo com iluminação artificial. Este teste é realizado sem o uso de bloqueadores. Porém, diversificando-o em relação ao teste anterior, utiliza-se uma árvore (elemento sombrente), para que seu posicionamento seja otimizado no entorno da edificação. Foram utilizadas lâmpadas de 15W, pois este tipo de lâmpada consome menos energia que a de 100W para proporcionar a mesma iluminação de 50 lux, conforme já dito anteriormente, no teste 6.

O modelo evolucionário gerou, como resultado, os desenhos que podem ser vistos nas figuras 4.23 e 4.24.

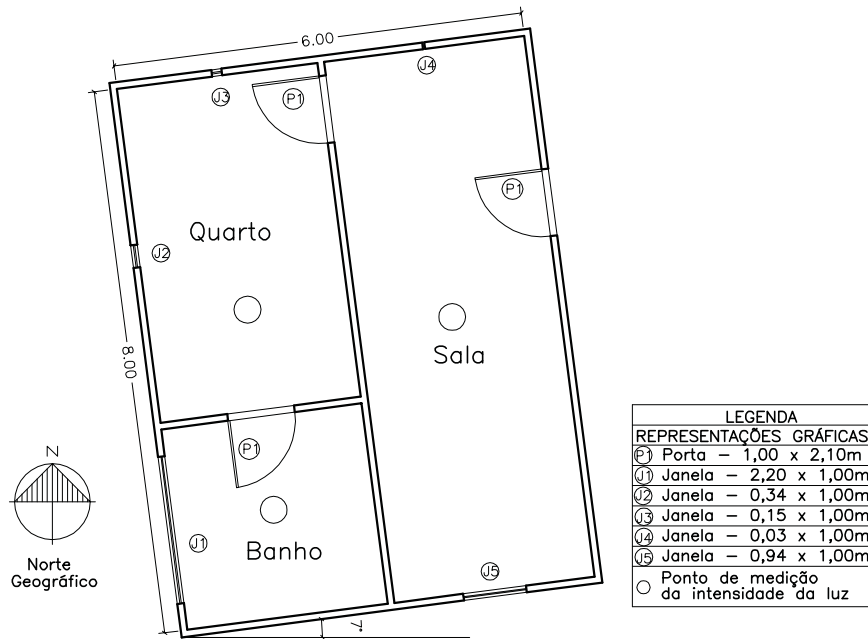


Figura 4.22: Teste 6 – Planta Baixa

Analisando o desenho gerado pelo modelo evolucionário, faz-se as seguintes análises:

1. a edificação sofreu uma modificação em relação à sua orientação geográfica, sendo rotacionada em aproximadamente 200°;
2. no quarto, na fachada Nordeste, o AG trata a janela de forma a dar preferência à iluminação natural permitindo que a mesma tenha maior largura. Porém, a janela da fachada Sudeste é minimizada pelo AG, evitando a entrada de calor, no verão.
3. na sala, na fachada Sudeste, o AG minimiza a janela para evitar a entrada de calor e posiciona o elemento sombreante (árvore) de forma a diminuir a incidência solar direta no cômodo, no verão. Na fachada Noroeste, o AG dá preferência à entrada de iluminação natural, uma vez que o cômodo é de permanência diurna, não realizando grandes alterações na dimensão da janela.
4. arquitetonicamente, as janelas da fachada Norte poderiam ser dispensadas, por sua dimensão não proporcionar nenhum benefício estético e funcional.
5. as portas internas não influenciam no cálculo do consumo de energia;
6. o posicionamento da árvore foi otimizado, passando a sombrear a janela da sala que está voltada para o Sudeste.

A tabela 4.7 apresenta os valores de consumo para o teste 7. A edificação otimizada reduziu em 65,23% o consumo de energia, em relação à edificação original.

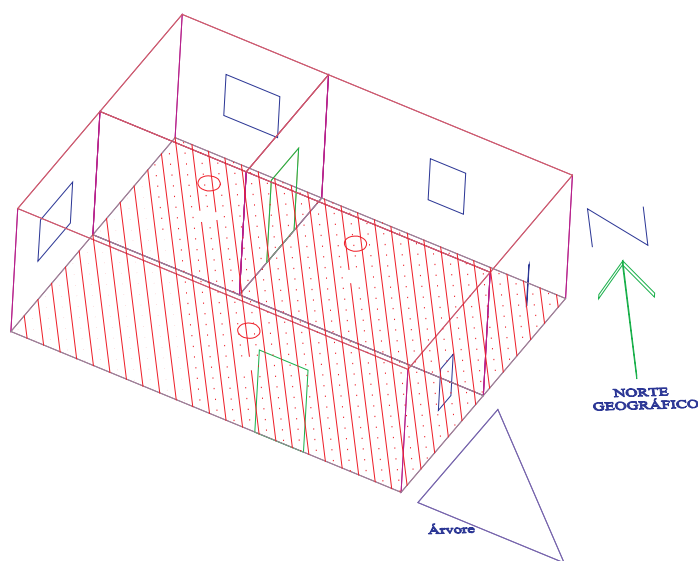


Figura 4.23: Teste 7 – Perspectiva

Valores médios de consumo (kW/dia)							
Teste	Luz	HVAC	AG Total	Ref. Luz	Ref. HVAC	Ref. Total	Dif.(%)
7	0.87	0.00	0.87	0.66	1.84	2.50	65.23

Tabela 4.7: Valores médios de consumo – Teste 7

4.6

Resultados Comparativos

Na tabela 4.8, apresenta-se todos os valores do consumo de energia de cada edificação testada, comparando o consumo das edificações originais, desenhadas por projetista e das edificações otimizadas pelo modelo proposto.

Analisando esta tabela, tem-se:

- Nos testes 1 e 2, o consumo de energia, na edificação original, é o mesmo, pois não há qualquer mudança no projeto da edificação para estes testes. Porém, quando se trata da edificação otimizada, no teste 1, pretende-se reduzir apenas o custo com o condicionamento de ar, sendo o custo com iluminação artificial livre. Portanto, pode-se notar um maior consumo com relação a este sistema. No teste 2, por sua vez, como o modelo deve levar em consideração os dois sistemas, há um aumento no consumo com o condicionamento de ar para que haja uma redução no consumo com a iluminação artificial.

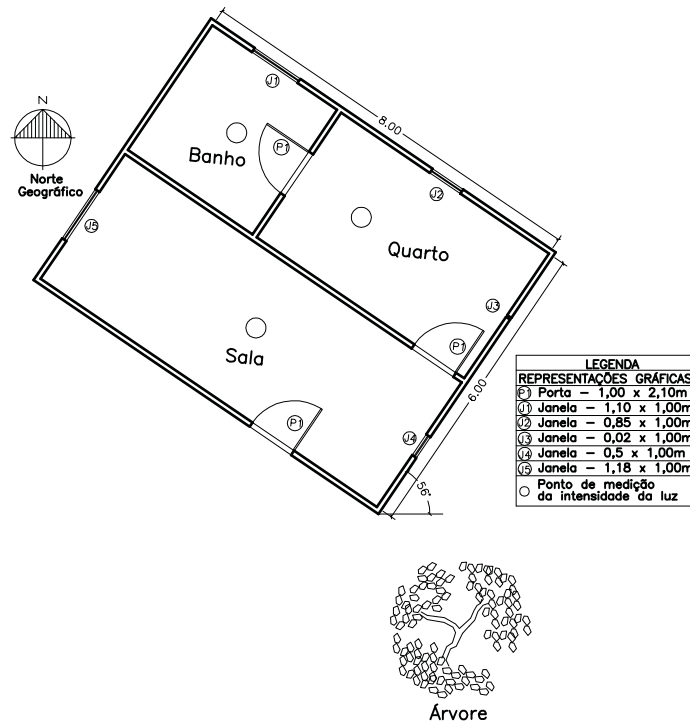


Figura 4.24: Teste 7 – Planta Baixa

Valores médios de consumo (kW/dia)							
Teste	Luz	HVAC	AG Total	Ref. Luz	Ref. HVAC	Ref. Total	Dif.(%)
1	3.61	1.44	5.05	3.17	2.76	5.93	14.82
2	3.30	1.80	5.10	3.17	2.76	5.93	13.93
3	3.55	1.65	5.20	4.39	2.69	7.08	26.45
4	3.33	1.97	5.30	4.39	2.69	7.08	25.12
5	4.52	0.89	5.41	4.42	2.83	7.25	25.30
6	0.71	0.00	0.71	0.66	2.07	2.73	74.21
7	0.87	0.00	0.87	0.66	1.84	2.50	65.23

Tabela 4.8: Valores médios de consumo – Resultados Comparativos

- Nos testes 3 e 4, há uma modificação na edificação original, através do uso de bloqueadores solares nas janelas. Pode-se notar que os valores no consumo diferem dos valores obtidos nos testes 1 e 2. Os bloqueadores auxiliam na redução do consumo com o sistema de condicionamento de ar, porém provocam um aumento do consumo com a iluminação artificial. Analisando os resultados obtidos na edificação otimizada, no teste 3, o AG consegue reduzir o consumo com o sistema de condicionamento de ar de forma considerável. Além disso, mesmo o custo com a iluminação artificial sendo livre, também há redução no consumo de energia deste sistema. No teste 4, como ocorreu no teste 2, há um aumento no consumo com o condicionamento de ar para que haja uma redução no consumo com a iluminação artificial, uma vez que o objetivo é otimizar ambos os sistemas, o que é alcançado com sucesso.

- No teste 5, utilizou-se uma edificação mais complexa. Neste caso, busca-se otimizar o consumo dos sistemas de iluminação artificial e de condicionamento de ar, ao mesmo tempo, porém não se faz uso de bloqueadores solares. Foram utilizadas lâmpadas de 100W nos cômodos. Comparando-se os resultados obtidos na edificação otimizada, com relação à edificação original, nota-se que houve grande redução no consumo de energia, principalmente com o sistema de condicionamento de ar.
- No teste 6, os objetivos são os mesmos do teste 5, mas neste caso, passa-se a utilizar lâmpadas de 15W, com a mesma capacidade de iluminação da lâmpada de 100W, porém, de forma mais econômica. Nota-se que o consumo de energia pelo sistema de iluminação artificial, na casa original, é bem menor do que o do teste 5. Quanto à edificação otimizada, o custo com o sistema de condicionamento de ar é nulo, ou seja, a otimização dos parâmetros pelo AG neste teste propiciou um conforto térmico tal que não foi utilizado o sistema de condicionamento de ar.
- No teste 7, os objetivos e a definição do tipo de lâmpada utilizada são os mesmos do teste 6. O que os diferencia é que, neste teste, acrescenta-se mais um parâmetro a ser otimizado, que é o posicionamento de um elemento sombreante (árvore), no entorno da edificação. Nota-se que o uso do elemento sombreante auxilia na diminuição da entrada de calor em um ambiente, pois há redução no consumo de energia pelo sistema de condicionamento de ar, analisando-se os resultados obtidos na edificação original. Com relação à edificação otimizada, percebe-se que o posicionamento do elemento sombreante teve grande influência no conforto térmico da edificação, permitindo que o sistema de condicionamento de ar não fosse acionado. Porém, pode-se perceber que tal elemento prejudica a entrada de iluminação natural, provocando um aumento no consumo de energia com o sistema de iluminação artificial.

Após analisar os testes realizados e seus respectivos resultados, aqueles obtidos pelas edificações otimizadas são bem melhores do que os das edificações desenvolvidas pelo projetista, ou seja, as casas otimizadas consomem menos energia com os sistemas de condicionamento de ar e/ou com os sistemas de iluminação artificial, mostrando a eficácia do modelo desenvolvido e constituindo-se em edificações com maior eficiência energética.

5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1

Conclusões

Utilizando o modelo evolucionário constituído pelo simulador de energia EnergyPlus e por algoritmos genéticos, foi feita a implementação deste modelo em estudo de casos para analisar o comportamento de algumas edificações com relação ao conforto ambiental e ao seu consumo de energia, influenciado pelos sistemas de condicionamento de ar e pelo uso da iluminação artificial.

O estudo de casos consistiu em dois tipos diferentes de edificações, nas quais foram abordadas diferentes características. No estudo de caso 1, foram realizados 4 testes para a mesma edificação, um modelo simples, originalmente desenhado por um projetista, que serviu de base para a atuação do modelo. O primeiro teste objetivava minimizar o custo do sistema HVAC. O teste 2 objetivava minimizar, além do custo com o sistema HVAC, o consumo de energia pela iluminação artificial. Nestes dois testes não foram utilizados bloqueadores solares nas janelas da edificação. No teste 3, o objetivo era minimizar o custo do sistema HVAC, utilizando bloqueadores solares nas janelas. Por fim, no teste 4, o objetivo era minimizar o consumo do sistema HVAC e o consumo com iluminação artificial, utilizando, também, bloqueadores solares. Nestes quatro testes, a potência da lâmpada da edificação foi especificada em 100W.

No estudo de caso 2, foram realizados 3 testes para a mesma edificação, um modelo mais complexo, com mais cômodos, originalmente desenhado por um projetista. Este desenho serviu de base para a atuação do modelo evolucionário. No teste 5, o objetivo era minimizar o consumo do sistema HVAC e o consumo com iluminação artificial, sem o uso de bloqueadores e com lâmpadas cuja potência foi especificada em 100W. O teste 6 é semelhante ao teste 5, modificando apenas a característica referente à potência das lâmpadas, agora especificadas em 15W. Para o teste 7, as especificações são idênticas à dos teste 6, porém utilizou-se também como um dos objetivos para otimização o posicionamento mais adequado de um elemento sombreante, como, por exemplo, a árvore que foi utilizada neste teste.

Para todos os sete testes os dados climáticos fornecidos ao simulador são da

cidade do Rio de Janeiro.

Após a implementação do modelo evolucionário, foram obtidos resultados gráficos, gerados pelo modelo, em que se pode observar as mudanças sugeridas pelo mesmo com o processo de otimização. O modelo apresenta resultados interessantes: modifica a orientação da casa em relação ao Norte geográfico, otimiza o tamanho das janelas e melhor dispõe árvores no entorno da edificação que funcionam como elemento sombreante.

Realizando análises sob o ponto de vista arquitetônico, algumas janelas otimizadas podem ser excluídas da edificação, uma vez que, funcionalmente e esteticamente, não exercem influência relevante na solução do problema.

Com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se perceber que o Algoritmo Genético teve uma atuação superior do que a Busca Aleatória, como pode ser observado na figura 4.8, o que demonstra a eficiência do modelo desenvolvido para atingir os objetivos desejados. Além disto, os resultados obtidos com as edificações otimizadas são melhores (apresentam menor consumo de energia) do que os resultados obtidos com as edificações originais, desenhadas por um projetista.

Os resultados positivos obtidos com o modelo evolucionário mostram a viabilidade do modelo proposto. A extensão do modelo para contemplar outros parâmetros pode trazer, portanto, outras melhorias nos resultados.

5.2

Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros é possível destacar alguns pontos importantes, que podem trazer novas possibilidades de aplicação para o modelo evolucionário, como:

- cálculo da quantidade, da potência e a sugestão da disposição de lâmpadas em um cômodo, conforme seja especificada a necessidade da intensidade luminosa no mesmo;
- cálculo da quantidade de poluentes que a edificação está emitindo no meio ambiente, quando há geração de energia;
- valorar o custo do material de uma construção civil;
- especificar os tipos de materiais usados na construção;
- implementar outros conceitos e tecnologias de eficiência energética em janelas, como o uso dos elementos arquitetônicos: *light shelves* (marquises), brises, películas absorventes de radiação solar, vidros duplos;
- implementar coletores solares, painéis fotovoltaicos;
- implementar soluções para aproveitar melhor a iluminação natural, como o uso de clarabóias e vidros prismáticos.

Referências Bibliográficas

- [Afonso2006] AFONSO, C. M.. **Sustentabilidade: caminho ou utopia?** Annablume, 1ª edition, 2006. 1.4
- [Agenda1994] LTD., E. B.. **Agenda 21: The Earth Summit Strategy to Save Our Planet.** Earth Press, 1994. 1.4, 2.3.1
- [Back1997] BACK, T.; FOGEL, D. B. ; MICHALEWICZ, Z.. **Handbook of Evolutionary Computation.** IOP Publishing Ltd. Bristol, UK, 1997. 2.1, 2.1.1, 2.1.1
- [Barbedo2005] BARBEDO, A. S. C.; BIANCHI, C. G.; KELLER, L. R.; ORTEGA, M. G. ; ORTEGA, S. E. H.. **Manual Técnico de Arborização Urbana.** Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente – Prefeitura de São Paulo, 2ª edition, 2005. 1.1
- [Brown2007] BROWN, G.; DEKAY, M.. **Sol, Vento e Luz – Estratégias para o Projeto de Arquitetura.** Bookman, 2ª edition, 2007. 1.4
- [Caldas2008] CALDAS, L.. **Generation of energy-efficient architecture solutions applying gene_arch: An evolution-based generative design system.** Advanced Engineering Informatics, 22(1):59–70, 2008. 1.4
- [Conner2009] MCLEAN-CONNER, P.. **Energy Efficiency: Principles and Practices.** PennWell Corp., 2009. 1.4
- [Corbella2003] CORBELL, O.; YANNAS, S.. **Em Busca de Uma Arquitetura Sustentável para os Trópicos - Conforto Ambiental.** Editora Revan, 1ª edition, 2003. 1.1, 1.4
- [Cruz1974] CRUZ, E.. **Física Aplicada à Construção – Conforto Térmico.** Edgard Blücher, 2ª edition, 1974. 1.4
- [Cruz1982] CRUZ, E.. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural.** Edgard Blücher, 2ª edition, 1982. 1.4
- [Cunha2006] CUNHA, E. C. N.. **Energia Elétrica e Sustentabilidade Aspectos Tecnológicos, Socioambientais e Legais.** Manole, 1ª edition, 2006. 1.4

- [Darwin2006] DARWIN, C.. **The Origin of Species**. SIGNET CLASSICS, 1^a edition, 2006. 2.1
- [Davis1991] DAVIS, L.. **Handbook of Genetic Algorithms**. Van Nostrand Reinhold Company, 1^a edition, 1991. 2.1
- [Eiben2003] EIBEN, A. E.; SMITH, J. E.. **Introduction to Evolutionary Computing**. Springer - Verlag, 2003. 2.1
- [Energy2008] OF ENERGY, U. D.. **EnergyPlus Manual**. University of Illinois, novembro 2008. 1.4, 2.3
- [Frota2000] FROTA, A. B.; SHIFFER, S. R.. **Manual de Conforto Térmico**. Studio Nobel, 5^a edition, 2000. 1.4, 2.3.2, 2.3.2, 2.3.2
- [Gligor2006] GLIGOR, A.; GRIF, H. ; OLTEAN, S.. **Considerations on an intelligent buildings management system for an optimized energy consumption**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, QUALITY AND TESTING, ROBOTICS, 2006, volumen 1, p. 280–284. IEEE, 2006. 1.1
- [Goldberg1989] GOLDBERG, D. E.. **Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning**. Addison-Wesley Professional, 1^a edition, Janeiro 1989. 2.1
- [Gonçalves2006] GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S.. **Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino**. Ambiente Construído – Revista On-line da ANTAC, 6(4):51–81, outubro 2006. 1.4, 2.3.1
- [Herrera1998] HERRERA, F.; LOZANO, M. ; VERDEGAY, J. L.. **Tackling real-coded genetic algorithms: Operators and tools for behavioural analysis**. Artificial Intelligence Review, 12(4):265–319, 1998. 2.1.1
- [Holland1975] HOLLAND, J. H.. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. MIT Press, 1975. 2.1, 2.1.1
- [Lamberts1997] LAMBERTS, R.; DUTRA, L. ; PEREIRA, F. O.. **Eficiência Energética na Arquitetura**. PW Editores, 1997. 1.4, 2.3.3, 2.5, 2.3.3, 2.4
- [Linden2006] LINDEN, R.. **Algoritmos Genéticos – Uma Importante ferramenta da Inteligência Computacional**. Brasport, 1^a edition, 2006. 2.1

- [Meier2002] MEIER, A.; OLOFSSON, T. ; LAMBERTS, R.. **What is an energy-efficient building?** In: THE IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO CONFERENCE, p. 7–10, 2002. 1.1
- [Mitchell1996] MITCHELL, M.. **An Introduction to Genetic Algorithms**. The MIT Press, Fevereiro 1996. 2.1
- [Montenegro1996] MONTENEGRO, G. A.. **Ventilação e Cobertas–Estudo Teórico, histórico e descontraído–A arquitetura tropical na prática**. Edgard Blücher Ltda., 4ª edition, 1996. 1.4
- [Ooka2008] OOKA, R.; CHEN, H. ; KATO, S.. **Study on optimum arrangement of trees for design of pleasant outdoor environment using multi-objective genetic algorithm and coupled simulation of convection, radiation and conduction**. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 96(10-11):1733–1748, 2008. 1.1
- [Pereira2005] PEREIRA, F. L.. **Determinação computacional da influência de parâmetros físicos no comportamento termoenergético de uma edificação**. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, junho 2005. 1.1
- [Romero2001] ROMERO, M. A. B.. **Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano**. Pro Editores, 2ª edition, 2001. 1.4
- [SueRoaf2006] SUE ROAF, M. F.; THOMAS, S.. **Ecohouse: A Casa Ambientalmente Sustentável**. Bookman, 2ª edition, 2006. 1.4
- [UNFCCC2008] UNFCCC. **Kyoto Protocol Reference Manual - On accounting of Emissions and Assigned Amount**. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2008. 2.3.1

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)