

## 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 afloraram 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 <sup>1</sup>, para formação dos gametas. É responsável pela singularidade de cada indivíduo

<sup>1</sup>Meiose: 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.

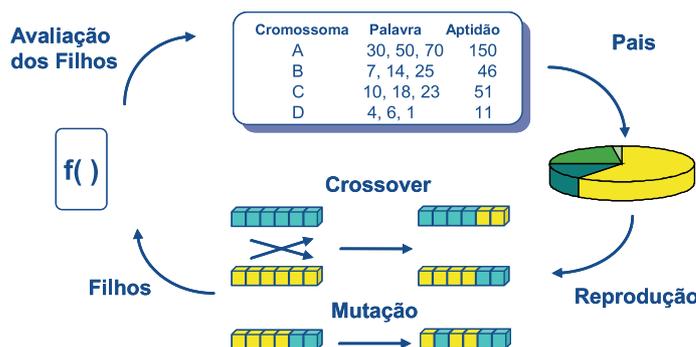


Figura 2.1: Ciclo do Algoritmo Genético

### 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 re-

presentante 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*<sub>1</sub> recebe o gen daquela posição do *pai*<sub>2</sub>; caso contrário, ao se encontrar o bit 0, o *filho*<sub>1</sub> recebe o gen daquela posição do *pai*<sub>1</sub>. O mesmo ocorre com o indivíduo *filho*<sub>2</sub>, só que de maneira invertida, recebendo o gen do *pai*<sub>1</sub> se for o bit 1 ou do *pai*<sub>2</sub> 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

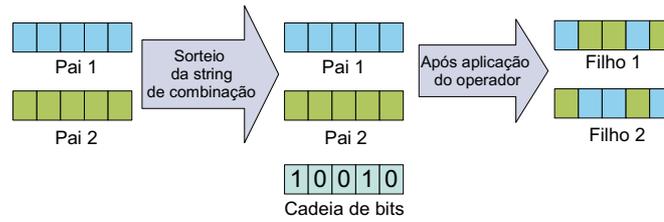


Figura 2.2: *Crossover Uniforme*

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  $\beta$  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:  $x = (x_1, \dots, x_k, \dots, x_n)$   
Filho:  $= x' = (x_1, \dots, x'_k, \dots, x_n)$ , 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.

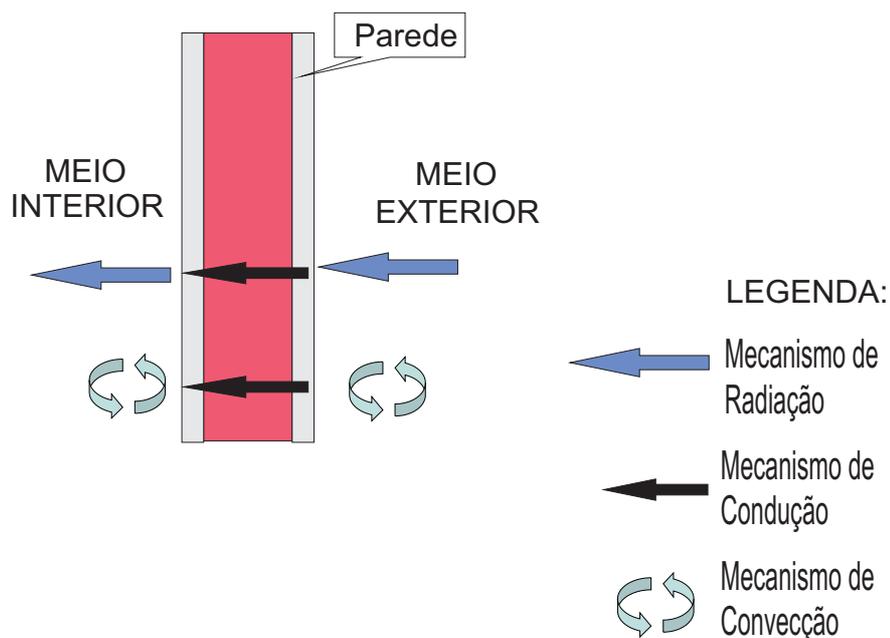


Figura 2.4: Condução, radiação, convecção

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,<sup>2</sup> 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

<sup>2</sup>É 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 ( $W/m^3 C$ ) → 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 ( $m^3$ ) → equivale ao volume do ambiente;

$\Delta T(^{\circ}C)$  → 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, norteando o desenvolvimento do processo de otimização dos parâmetros ao 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.

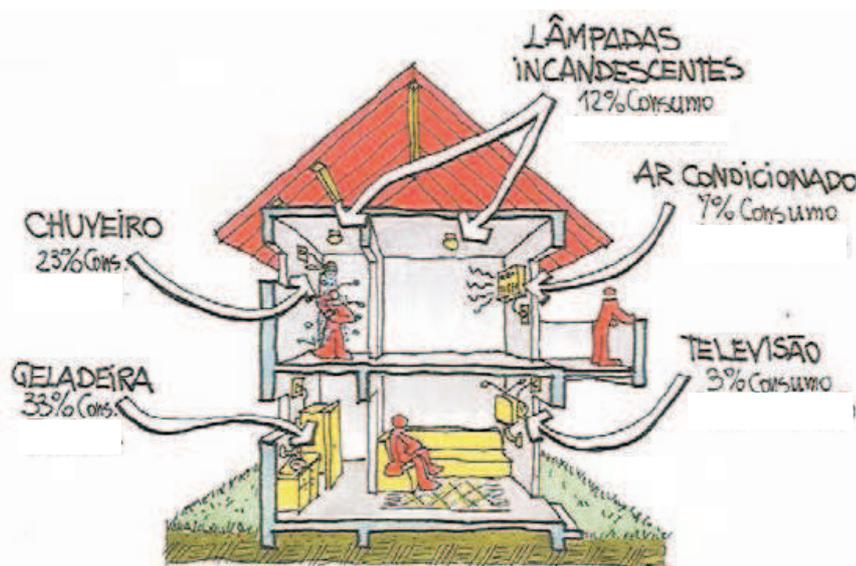


Figura 2.5: Consumo de energia por equipamentos em uma residência (Lamberts1997)

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 ( $\alpha$ ), refletividade ( $\rho$ ) e transmissividade ( $\tau$ ), 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 ventila-

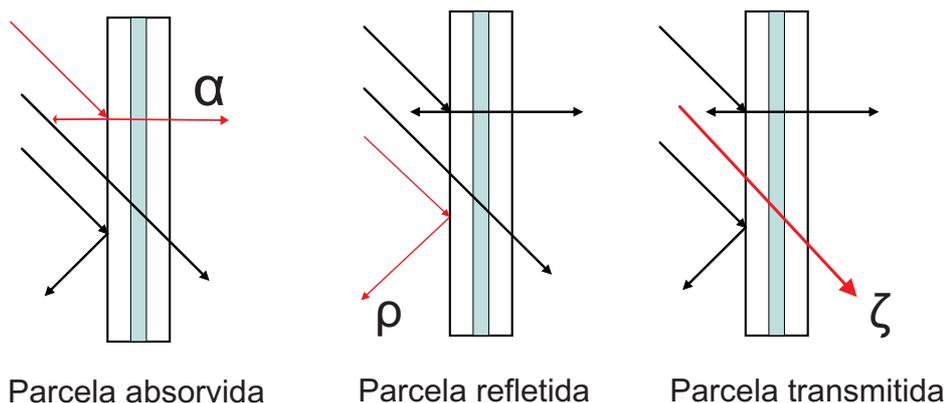


Figura 2.6: Absorção, Reflexão e Transmissão da radiação solar por um vidro

dores. 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 (Lamberts 1997) 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.

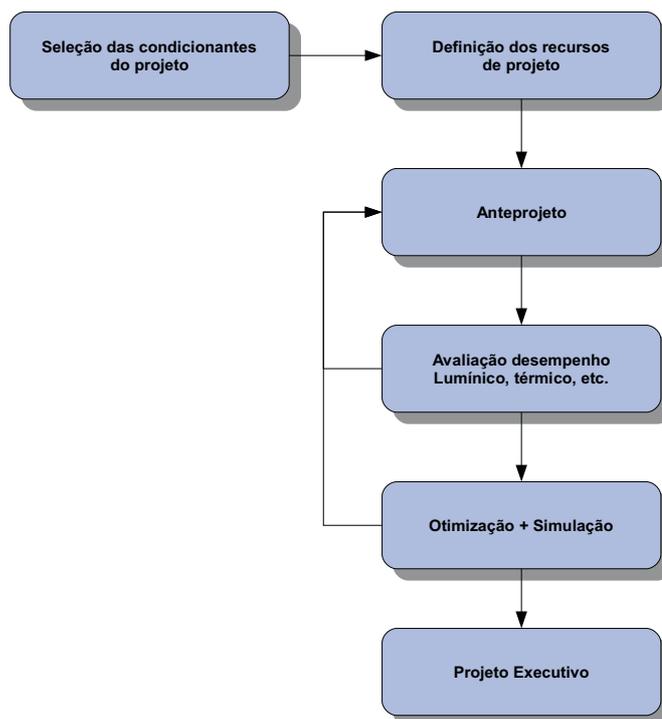


Figura 2.7: Esquema de projeto

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 seqüência 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.