

# Abordagem evolutiva para alocação ótima de eletrodutos em projetos de sistemas prediais elétricos

*An evolutionary approach for optimal allocation of conduits in electrical installation projects*

Lia Toledo Moreira Mota  
Alexandre de Assis Mota

## Resumo

**O**s projetos de sistemas prediais elétricos compreendem diversas etapas: análise inicial, previsão da carga, divisão em circuitos, determinação e localização de pontos de luz e força, alocação de eletrodutos, dimensionamento de condutores e da proteção, etc. Ao lado da segurança, prioritária em qualquer instalação, o custo total constitui fator determinante para o sucesso de um projeto. Nesse contexto, gastos com condutores e eletrodutos são, em geral, significativos em instalações residenciais e comerciais de pequeno e médio portes. Assim, a redução de gastos com esses elementos impacta diretamente na redução dos custos totais da instalação. Nesse sentido, este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento e a implementação de técnicas que permitem alocar, de forma subótima ou ótima, os eletrodutos dentro do projeto de uma instalação elétrica, visando à minimização dos custos relacionados a eles. A alocação dos eletrodutos foi feita a partir da implementação de um algoritmo evolutivo que, a partir de uma configuração inicial da disposição dos eletrodutos (denominada de “população inicial”), evolui para uma solução da sua localização, determinando a situação que proporciona a menor quantidade de gastos com eles. A partir da aplicação dessa metodologia, foram realizadas simulações em projetos de instalações reais que forneceram resultados bastante satisfatórios.

**Palavras-chave:** Alocação ótima. Eletrodutos. Sistemas prediais elétricos. Algoritmos evolutivos.

## Abstract

*An electrical installation project has several stages: initial analysis, load forecasting, specification of the circuits, lighting project, conduits allocation and protection devices dimensioning, among others. The success of the project is directly related to security, that corresponds to the priority aspect in any installation, and cost. In this context, the cost associated to conduits are very significant, specially in small-size and medium-size residential and commercial installations. Consequently, reduction on the cost related to these elements yield reduction on the total cost of the electrical installation. Hence, this work had the objective of developing techniques to allocate the conduits in an electrical installation project, aiming the minimization of cost. The optimal allocation of conduits is determined using an evolutionary algorithm that, starting from an initial population, evolves to sub-optimal and optimal feasible solutions. The method was tested through different simulations, yielding satisfactory results.*

**Keywords:** Optimal allocation. Conduits. Electrical installations. Evolutionary algorithms.

Lia Toledo Moreira Mota  
Indelmatec Engenharia  
Rua Joaquim de Almeida Petta,  
374  
Jardim Guarani  
Campinas - SP - Brasil  
CEP 13100-180  
Tel. : (19) 3252-3121  
E-mail: lmota@ieeee.org

Alexandre Assis Mota  
Centro de Ciências Exatas,  
Ambientais e de Tecnologias  
Pontifícia Universidade Católica  
de Campinas  
Rodovia D. Pedro I, km 136,  
Parque das Universidades  
Campinas - SP - Brasil  
CEP 13086-900  
Tel.: (19) 3756-7370  
E-mail: amota@puc-  
campinas.edu.br

Recebido em 07/01/08  
Aceito em 14/12/08

## Introdução

No projeto de um sistema predial de eletricidade, a etapa de alocação de eletrodutos é de fundamental importância, uma vez que contribui de forma significativa para o custo total da instalação, especialmente no projeto de residências e estabelecimentos comerciais de pequeno e médio portes. Usualmente, essa alocação é realizada a partir do bom senso do projetista, que tenta evitar que os eletrodutos percorram caminhos muito longos, o que encarece a instalação. Além disso, o projetista procura alocar os eletrodutos de forma que não formem curvas acentuadas, facilitando, posteriormente, a execução do projeto (CREDER, 1995).

Apesar do seu trabalho cuidadoso, o projetista nem sempre consegue chegar a uma boa solução para esse problema, o que pode acabar implicando custos adicionais e desnecessários relacionados ao projeto. Nesse contexto, este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento e a implementação de um método para a alocação ótima de eletrodutos dentro do projeto de um sistema predial de eletricidade, partindo da localização dos pontos de luz, prevista em etapa anterior pelo projetista. Para tanto, foi desenvolvido um algoritmo evolutivo que, a partir de uma configuração inicial da disposição dos eletrodutos, consegue atingir (evoluir para) uma solução associada à alocação ótima ou subótima deles. Essa solução está diretamente relacionada com a situação de menor gasto com a alocação dos eletrodutos, minimizando os custos associados à execução do projeto.

Muitos trabalhos relatam a utilização de técnicas de pesquisa operacional e inteligência artificial no projeto de sistemas prediais. Em especial, os algoritmos evolutivos, com destaque para os algoritmos genéticos (AGs), têm sido aplicados na resolução de problemas de diferentes naturezas. Nesse sentido, a referência (ABDULLAH; RICHARDSON; HANIF, 2001) trata do problema da alocação de sensores para o monitoramento de estruturas utilizando AGs, enquanto a referência (MAWDESLEYA; AL-JIBOUR, 2003) utiliza a mesma técnica para otimizar o projeto do canteiro de obras no que diz respeito ao posicionamento de equipamentos. As referências (HUANG; LAM, 1997) e (WENJIAN; LIHUA; SHUJIANG; YENG, 2005) apresentam o AG como método de solução para problemas relacionados à otimização de sistemas de HVAC (“Heating, Ventilation and Air-conditioning”). Já a referência (LEEA, 2007) trata da utilização de AGs para otimizar o condicionamento climático interno em construções.

Além disso, outros trabalhos relatam a aplicação de AGs à previsão da demanda residencial (NGA; SKITMOREB; WONG, 2008), à estimação de custos da construção (GWANG-HEE, 2004), ao projeto de edifícios sustentáveis (WANGA; ZMEUREANUA; RIVARDB, 2005), à avaliação do valor de mercado dos imóveis (GONZÁLEZ, FORMOSO, 2006), à otimização de redes de água (SILVA; REIS, 2002), dentre outras aplicações. Finalmente, a referência (ARCISZEWSKI; JONG, 2001) relata as tendências da pesquisa na área de computação evolutiva aplicada à Engenharia Civil.

Apesar de existirem muitas referências relacionadas à utilização de algoritmos evolutivos em sistemas prediais, a aplicação dessa técnica para a otimização de sistemas prediais de eletricidade, foco deste trabalho, apresenta-se como área de pesquisa ainda a ser desenvolvida. Nesse sentido, os resultados obtidos neste trabalho podem contribuir para o fortalecimento das pesquisas nessa área do conhecimento

## Formulação do problema de otimização

O problema abordado neste trabalho consiste na otimização da malha de eletrodutos para passagem de condutores de energia em um ambiente construído. Assim, tem-se como objetivo a determinação de uma solução ótima ou sub-ótima para o problema da alocação de eletrodutos em projetos de sistemas prediais de eletricidade, visando auxiliar os projetistas que nem sempre conseguem propor uma solução que minimize os custos associados a esses projetos. Em geral, para atingir esse objetivo, os projetistas tentam minimizar o comprimento total da malha de eletrodutos, pois os custos associados à malha de condutores, à mão de obra da instalação e à posterior manutenção podem ser expressos por relações que são diretamente proporcionais a esse comprimento.

Assim, esse problema pode ser caracterizado como um problema de otimização (minimização), cuja função objetivo corresponde ao comprimento da malha de eletrodutos. O problema pode, então, ser formulado como se seguir.

$$\begin{aligned} \min(f(x) = (c^T x)) \\ \text{s.a.} \\ Ax = b \end{aligned} \quad (1)$$

onde  $c$  é um vetor composto pelos comprimentos associados a cada eletroduto da malha;  $x$  é um vetor composto pelas potências elétricas que fluem por cada eletroduto;  $b$  é o vetor das potências de

cada ponto de luz e  $A$  é a matriz de incidência nó-ramo da malha elétrica do ambiente, considerando cada nó como um ponto de luz e cada ramo como um eletroduto.

Para exemplificar a formação da matriz  $A$  e dos vetores  $x$ ,  $b$  e  $c$ , considere a instalação elétrica do ambiente representado na Figura 1.

Observando-se essa figura, nota-se a presença de 4 pontos (incluindo o Quadro de Distribuição-QD) e 6 possibilidades para a alocação dos eletrodutos, ou seja, 6 eletrodutos “fictícios”. Esses eletrodutos são representados pela letra “ $e$ ” e por dois algarismos que indicam os nós de origem e destino, respectivamente, de cada eletroduto. Assim, o eletroduto  $e_{14}$  sai do ponto 1 e chega no ponto 4. Admitindo que o número de eletrodutos fictícios é dado por  $ne$  e o número de pontos é dado por  $np$ , os vetores  $x$ ,  $c$  e  $b$  e a matriz  $A$  possuem as seguintes dimensões:  $x_{[np \times 1]}$ ;  $c_{[ne \times 1]}$ ;  $b_{[np \times 1]}$ ;  $A_{[np \times ne]}$ .

Para o exemplo em análise:  $x_{[6 \times 1]}$ ;  $c_{[6 \times 1]}$ ;  $b_{[4 \times 1]}$ ;  $A_{[4 \times 6]}$ . Se a potência elétrica que flui do ponto  $k$  para o ponto  $m$  é dada por  $P_{km}$ ; a potência do ponto  $k$  é dada por  $P_k$ ; o comprimento do eletroduto  $e_{km}$  é dado por  $c_{km}$ ; então os vetores  $x$ ,  $b$  e  $c$  podem ser representados da seguinte maneira:

$$x = \begin{bmatrix} P_{12} \\ P_{13} \\ P_{14} \\ P_{23} \\ P_{24} \\ P_{34} \end{bmatrix}; b = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix}; c = \begin{bmatrix} c_{12} \\ c_{13} \\ c_{14} \\ c_{23} \\ c_{24} \\ c_{34} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A matriz  $A$  representa a incidência nó-ramo, ou seja, cada coluna representa um ramo ou um eletroduto da malha. Por exemplo, a primeira coluna está relacionada ao primeiro eletroduto da malha, o eletroduto  $e_{12}$ . Esse eletroduto sai do ponto 1 e chega ao ponto 2, assim, as linhas 1 e 2 da coluna 1 são marcadas, respectivamente por 1 (ponto de origem) e por  $-1$  (ponto de destino). As demais linhas dessa coluna são preenchidas com zero. Esse procedimento se repete para cada coluna, formando, então, a matriz completa, conforme representado a seguir para o exemplo em estudo:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Esse problema de otimização pode ser resolvido utilizando técnicas de otimização convencionais como, por exemplo, a solução sucessiva de problemas de programação linear ou a solução de um problema de programação não-linear (MOTA;

MOTA, 2007). Entretanto, este trabalho aborda a utilização de uma técnica de inteligência artificial (**algoritmos evolutivos**) para resolver o problema da alocação de eletrodutos em sistemas prediais de eletricidade. Os principais conceitos relacionados a essa técnica, bem como o algoritmo evolutivo apresentado nesse trabalho estão descritos nos itens que se seguem.

## Conceitos de computação evolutiva

De uma maneira geral, os algoritmos evolutivos correspondem a métodos e técnicas computacionais fundamentados em modelos naturais, ou seja, baseiam-se, conceitualmente, na simulação da evolução de sistemas via processo de seleção natural. A motivação para o desenvolvimento desses algoritmos surgiu de teorias pelas quais a natureza, por meio de seus recursos, otimiza seus mecanismos para resolver um ou mais problemas. Os algoritmos evolutivos manipulam as variáveis de um problema de otimização, através de operadores inspirados na evolução biológica, denominados operadores genéticos, que objetivam a busca pela solução ótima ou subótima de um problema. (RUSSEL; NORVIG, 2004).

Em especial, pode-se destacar que a computação evolutiva (CE) é “um ramo da ciência da computação que propõe um paradigma alternativo ao processamento de dados convencional. Este novo paradigma, diferentemente do convencional, não exige, para resolver um problema, o conhecimento prévio de uma maneira de encontrar uma solução” (BITTENCOURT, 2006). A CE está fundamentada em mecanismos evolutivos naturais, em que se destacam tanto a presença de auto-organização quanto de comportamentos adaptativos (GOLDBERG; HOLLAND, 1998), mecanismos esses que foram propostos por Charles Darwin em sua teoria da seleção natural. Essa teoria estabelece formalmente que a vida na Terra é resultado da seleção dos mais aptos, que, portanto, apresentam melhores chances de sobreviver e de se reproduzir.

A CE está centrada em conceitos fundamentais que viabilizam a simulação computacional da passagem de gerações, o que caracteriza a evolução natural como (BITTENCOURT, 2006):

(a) a criação de uma **população inicial** de soluções, o que determina um conjunto inicial de “indivíduos”. Cada indivíduo possui, na verdade, todas as informações (“genes”) que caracterizam uma possível solução ao problema proposto (cada indivíduo corresponde a uma possível solução para

o problema). Esse conjunto inicial pode ser gerado aleatoriamente por meio de sorteio randômico; e

(b) a criação de uma entidade matemática, denominada **função objetivo** de avaliação (função de *fitness*), através da qual será medida a aptidão de cada um dos indivíduos para enfrentar o problema proposto. É importante salientar que essa função não possui, necessariamente, o conhecimento sobre como encontrar uma solução para o problema, mas funciona, por exemplo, como uma “nota” que é dada para o desempenho de cada um dos indivíduos da população.

Existe, ainda, a necessidade da implementação de mecanismos de transformação (operadores) que serão aplicados à população atual para gerar os indivíduos de uma próxima geração. Os principais operadores são decorrentes de mecanismos naturais que ocorrem na teoria da evolução natural de Darwin:

(a) operador de seleção: faz a escolha de indivíduos para gerar descendência, através de reprodução assexuada (usando apenas um indivíduo) e/ou sexuada (usando um casal de indivíduos). Os indivíduos selecionados (possíveis soluções selecionadas) para se reproduzir serão os mais aptos, ou seja, que possuem um maior valor da função de fitness;

(b) operador de recombinação: determina o conjunto genético da descendência gerada pela seleção, através da troca de material genético entre os “pais” na abordagem de reprodução sexuada; e

(c) operador de mutação: realiza alterações aleatórias no material genético dos indivíduos da população, tanto na reprodução assexuada quanto na sexuada.

A partir da população inicial, esses operadores são aplicados para gerar a população subsequente (que corresponde à próxima geração de indivíduos, ou seja, ao próximo conjunto de possíveis soluções). Assim, entre duas gerações sucessivas, verifica-se o conceito de adaptação: conforme a população de indivíduos (o que corresponde ao conjunto de soluções) evolui, a função de avaliação (objetivo do problema) também evolui, na direção de soluções melhores e mais adaptadas. Conforme as gerações passam (repetindo todo o processo seqüencialmente), espera-se atingir a situação ideal pelo refinamento (evolução natural) da população (assim como acontece na natureza). Relatos na literatura têm demonstrado que, dado um número suficiente de gerações, a CE é sempre capaz de atingir o ponto ótimo mesmo para problemas de elevada complexidade (GOLDBERG; HOLLAND, 1998).

## Formulação do Algoritmo Evolutivo

De acordo com a referência (BÄCK, 1996), um Algoritmo Evolutivo (AE) pode ser definido como:

$$AE = (I, \Phi, \Omega, \Psi, s, t, \mu, \lambda) \quad (4)$$

onde:

$I$  corresponde ao espaço de indivíduos;

$\Phi: I \rightarrow R$  é a função de aptidão ou “fitness” que atribui valores reais associados a cada indivíduo;

$\mu$  corresponde ao número de indivíduos pais;

$\lambda$  corresponde ao número de indivíduos filhos;

$\Omega = \{\omega_{\theta_1}, \dots, \omega_{\theta_k} \mid \omega_{\theta_i}: I^\lambda \rightarrow I^\lambda\} \cup \{\omega_{s_0}: I^\mu \rightarrow I^\lambda\}$  corresponde a um conjunto de operadores genéticos  $\omega_{\theta_i}$  (mutação, recombinação) controlados, cada um, por parâmetros específicos definidos pelos conjuntos  $\theta_i \subset R$ ;

$s_{\theta_i}: (I^\lambda \cup I^{\mu+\lambda}) \rightarrow I^\mu$  corresponde ao operador de seleção;

$t: I^\mu \rightarrow \{\text{verdadeiro}, \text{falso}\}$  é o critério de parada do AE e

$\Psi = s \circ \omega_{\theta_1} \circ \dots \circ \omega_{\theta_k} \circ \omega_{s_0}$  corresponde à função de transição de geração que descreve o processo de transformar a população  $P$  na geração subsequente, através da aplicação de operadores genéticos e de seleção. Assim,  $P(t) = \{a_1(t), \dots, a_\mu(t)\}$  é a população da geração  $t$ , constituída pelos indivíduos  $a_i \in I$ .

Com base nessa formulação, pode-se definir as linhas gerais de um Algoritmo Evolutivo conforme se segue:

$t = 0$ ;

Inicializar  $P(0) = \{a_1(0), \dots, a_\mu(0)\}$ ;

Calcular  $P(0): \{\Phi(a_1(0)), \dots, \Phi(a_\mu(0))\}$ ;

Enquanto  $t(P(t)) \neq \text{verdadeiro}$  faça:

Recombinar:  $P'(t) = r_{\theta_i}(P(t))$

Mutar:  $P''(t) = m_{\theta_i}(P'(t))$

Calcular:  $P''(t): \{\Phi(a_1''(t)), \dots, \Phi(a_\mu''(t))\}$

Selecionar:  $P(t+1) = s_{\theta_i}(P''(t) \cup Q)$ , onde  $Q \in \{\emptyset, P(t)\}$

$t = t+1$ ;

Fim.

Esse algoritmo genérico pode ser aplicado aos mais variados tipos de problema. O item a seguir apresenta a aplicação dessa técnica ao problema abordado neste trabalho.

## O algoritmo evolutivo implementado

O problema abordado neste trabalho consiste na otimização da malha de eletrodutos elétricos para passagem de condutores de energia em um ambiente construído. Assim, tem-se como objetivo a determinação de uma solução ótima ou subótima para o problema da alocação de eletrodutos em projetos de sistemas prediais de eletricidade, visando auxiliar os projetistas, que nem sempre conseguem propor uma solução que minimize os

custos associados a esses projetos. Para investigar a aplicação proposta, utilizou-se a planta de um apartamento com o projeto de alocação dos pontos de luz previamente elaborado, conforme ilustra a Figura 1. Nessa figura, os pontos de luz estão graficamente representados pelos círculos.

Considerou-se que as possibilidades de passagem de eletrodutos nessa unidade podem se dar conforme ilustrado na Figura 2, onde cada eletroduto é representado por uma linha tracejada e uma letra maiúscula.

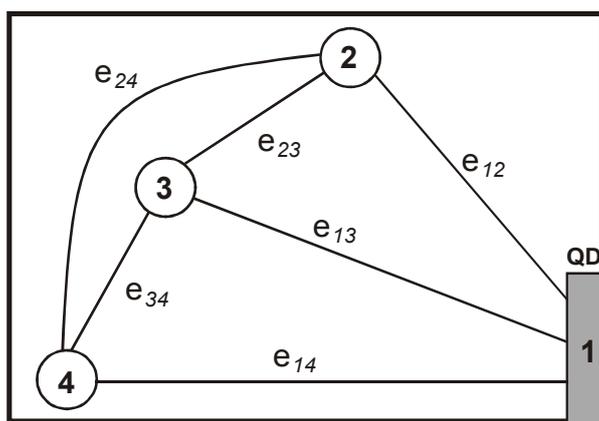


Figura 1 - Exemplo de Instalação

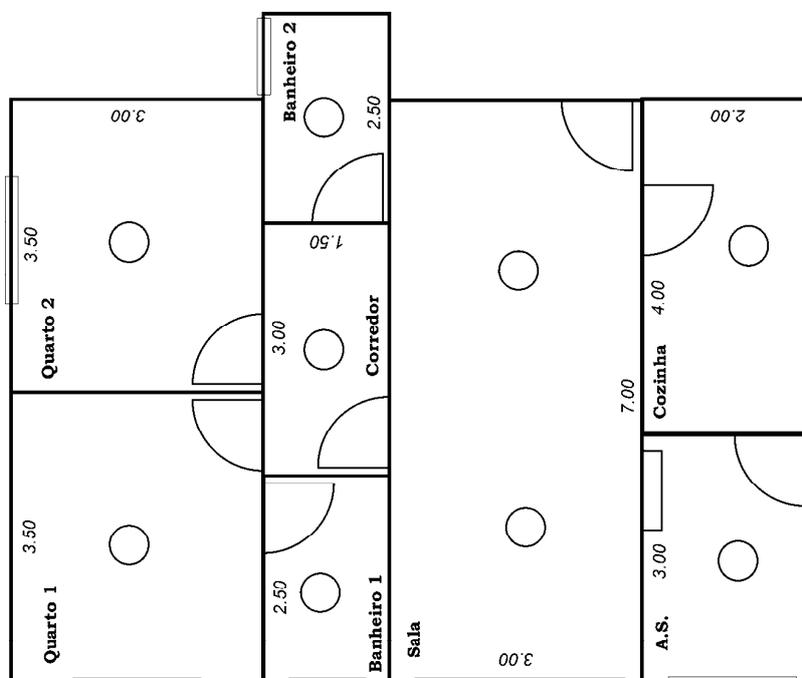


Figura 2 - Planta do apartamento utilizado para investigação da metodologia proposta

Conforme citado anteriormente, o principal objetivo deste trabalho consiste na determinação de uma solução ótima ou subótima para a alocação dos eletrodutos, visando à diminuição dos gastos relacionados à instalação elétrica como um todo. Em geral, para atingir esse objetivo, os projetistas tentam minimizar o comprimento total da malha de eletrodutos, pois os custos associados à malha de condutores, à mão-de-obra da instalação e à posterior manutenção podem ser expressos por relações que são diretamente proporcionais a esse comprimento. Por esse motivo, adotou-se como função objetivo, diretamente relacionada com a função de *fitness*, a minimização do comprimento da malha de eletrodutos. O valor dessa função é calculado a partir dos comprimentos dos eletrodutos, explicitados na Tabela 1.

O gene de cada indivíduo (possível solução) foi implementado por um vetor lógico booleano com 26 posições (de 0 a 25), conforme representado na Figura 3.

A presença de bit “1” na posição indica a presença do eletroduto correspondente (de A até Z) na solução do problema. Bit “0” indica a ausência do eletroduto correspondente àquela posição. A Figura 4 ilustra um exemplo hipotético de indivíduo que representa, na verdade, uma possível solução para o problema em estudo. Da análise dessa figura, nota-se que a solução é composta dos eletrodutos A, B, ..., X e Z (presença de bit “1”), não fazendo os eletrodutos C, D, ..., Y parte dessa solução (presença de bit “0”).

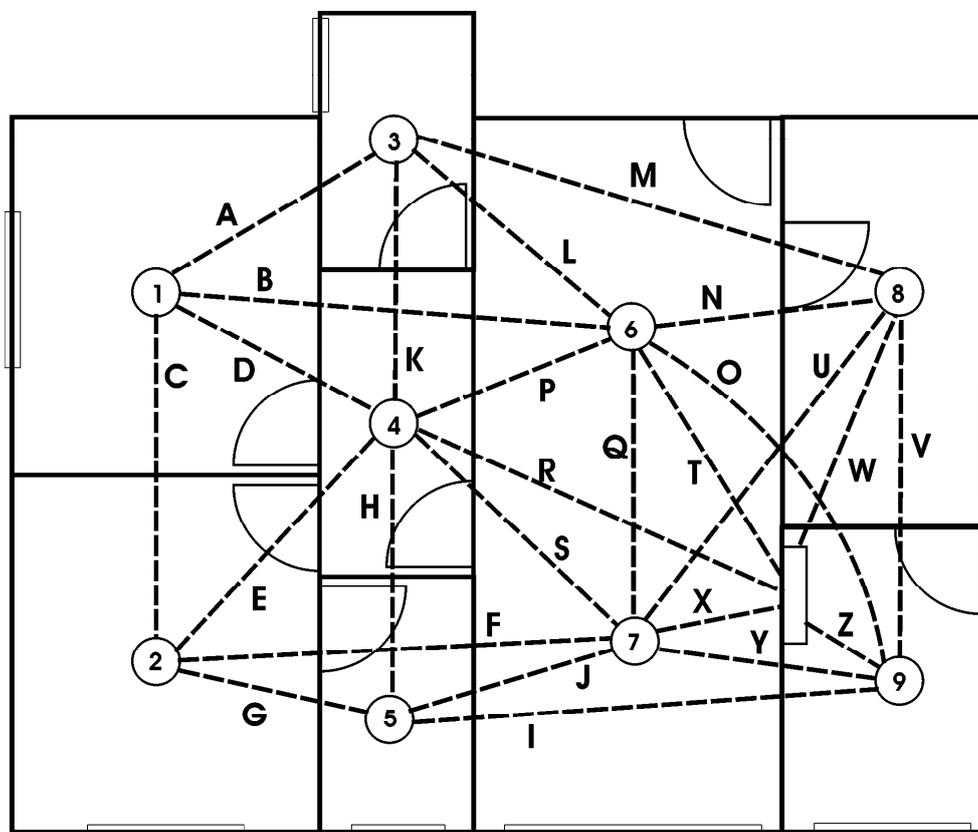


Figura 3 - Possibilidades de passagem de eletrodutos pelo apartamento

Eletróduto	Comprimento (m)	Eletróduto	Comprimento (m)
A	3,10	N	2,65
B	4,55	O	4,10
C	3,50	P	2,45
D	3,15	Q	3,50
E	2,90	R	5,20
F	4,60	S	4,10
G	2,30	T	4,30
H	2,80	U	5,60
I	4,75	V	4,00
J	2,25	W	3,60
K	2,80	X	2,70
L	3,10	Y	2,55
M	4,90	Z	2,10

Tabela 1 - Comprimentos dos eletródutos

Posições:	0	1	2	3	...	23	24	25
Eletróduto:	A	B	C	D	...	X	Y	Z

Figura 4 - Representação do gene implementado

Bit do gene:	1	1	0	0	...	1	0	1
Eletróduto:	A	B	C	D	...	X	Y	Z

Figura 5 - Exemplo de indivíduo

O algoritmo evolutivo desenvolvido neste trabalho segue os seguintes passos:

Passo 1 – Definição dos parâmetros do problema: população inicial, número de indivíduos aptos a se reproduzir (responsáveis pela criação da próxima geração), taxa de mutação da população na passagem de uma geração à outra, número máximo de gerações a serem utilizadas.

Passo 2 – Geração de uma população inicial aleatória com indivíduos diferentes, mas factíveis (árvore = grafo conexo sem ciclos).

Passo 3 – Ordenação da população e seleção dos indivíduos que irão compor a parcela daqueles aptos a se reproduzir, através da classificação de suas funções de aptidão (*fitness*). Isso quer dizer que os indivíduos com maior *fitness* são mais aptos a se reproduzir e a sobreviver (operador de seleção). Esses indivíduos representam também as melhores soluções encontradas pelo método na geração atual.

Passo 4 – Criação da próxima geração através de reprodução sexuada (com troca de material genético) de indivíduos da parcela apta a se reproduzir, tomados aleatoriamente dois a dois. Essa reprodução é feita determinando os bits do

gene de cada novo indivíduo de acordo com as seguintes regras:

- (a) o bit do gene do novo indivíduo será “1” se o bit correspondente do gene do indivíduo “pai” for “1” e o do indivíduo “mãe” for “1”;
- (b) o bit do gene do novo indivíduo será “0” se o bit correspondente do gene do indivíduo “pai” for “0” e o do indivíduo “mãe” for “0”; e
- (c) o bit do gene do novo indivíduo poderá ser “0” ou “1”, decidido aleatoriamente com 50% de chance para cada possibilidade, se o bit correspondente do gene do indivíduo “pai” for “1” e o do indivíduo “mãe” for “0” ou vice-versa;

Passo 5 – Imposição de mutação aos indivíduos da nova geração (tanto os sobreviventes quanto os recém-criados) através de mudanças em seus genes (inversão de bits), com certa taxa de probabilidade.

Passo 6 – Repetição do ciclo para cada nova geração através da repetição dos passos (3), (4) e (5), sequencialmente, até que o número máximo de gerações especificado no passo (1) seja atingido.

## Simulações e resultados obtidos

Com o intuito de validar o algoritmo proposto, foram realizados alguns testes e simulações. Os parâmetros utilizados nesses testes são:

- população inicial = 500 indivíduos;
- número de indivíduos aptos a se reproduzir = 200 ;
- taxa de mutação da população = 20%;
- número máximo de gerações a serem utilizadas = 50
- parâmetro da função de aptidão  $K=1000$ ;
- parâmetro da função de aptidão  $c_e$ , definido na Tabela 1;
- parâmetro da função de aptidão  $n_e=26$ ;

### Resultados para minimização do comprimento da malha

Os primeiros testes realizados adotaram como função de *fitness* a minimização do comprimento da malha dos eletrodutos (visando à minimização dos custos associados ao projeto do sistema predial de eletricidade). O algoritmo implementado foi capaz de gerar diversas soluções factíveis para o problema, estando as melhores, ou seja, com maiores valores da função de aptidão, ilustradas nas Figuras 5, 6 e 7. Nessas figuras, a solução encontrada pelo algoritmo está representada pelos eletrodutos em linha mais espessa.

Nota-se que essas soluções, apesar de serem factíveis, possuem um inconveniente bastante significativo: nos três casos, o algoritmo “preferiu” não interconectar diretamente os pontos de luz 6 e 7. Essa solução não é interessante do ponto de vista prático e econômico, uma vez que, como esses pontos de luz encontram-se no mesmo cômodo, provavelmente serão acionados por interruptores localizados no mesmo ambiente. Assim, a não-interconexão deles através do eletroduto Q possivelmente acarretará na necessidade de instalação de um maior número de condutores, o que encarecerá o projeto.

### Resultado com imposição da penalidade de cruzamento de barreiras entre cômodos

O inconveniente detectado a partir dos resultados obtidos no item anterior, deve-se à utilização de uma função de aptidão que contempla apenas a minimização do comprimento da malha de

eletrodutos. Para evitar a ocorrência desse problema, a função de fitness foi modificada de forma a penalizar a escolha de eletrodutos que cruzem barreiras entre cômodos da seguinte maneira:

$$Fitness_{modificada1} = K - \sum_{e=1}^{ne} c_e - nc.K_c \quad (6)$$

onde:

$K$ ,  $c_e$  e  $ne$  são parâmetros já descritos anteriormente

$nc$  é o número total de cruzamentos de barreiras entre cômodos;

$K_c$  é a penalização por cruzamentos imposta à função.

Dessa forma, incentiva-se a escolha de eletrodutos de um mesmo cômodo para interligar pontos de luz localizados no mesmo ambiente. A Figura 10 ilustra a solução obtida para essa nova função de aptidão. Pode-se observar que, agora, a solução obtida contempla a conexão dos pontos de luz 6 e 7 através do eletroduto Q.

### Resultado com desconsideração das barreiras próximas ao quadro de distribuição (QD)

A nova função de aptidão penaliza o cruzamento de barreiras entre cômodos. Assim, apesar de possibilitar a obtenção de resultados mais razoáveis, ela possui o inconveniente de penalizar o cruzamento também das barreiras próximas ao QD. Uma vez que essa característica pode não ser interessante do ponto de vista prático e econômico, foi desenvolvida uma outra função de fitness que continua penalizando o cruzamento de barreiras entre cômodos, mas que desconsidera as barreiras próximas ao Quadro de Distribuição, conforme formulado a seguir:

$$Fitness_{modificada2} = K - \sum_{e=1}^{ne} c_e - nc.K_c + nv.K_v \quad (7)$$

onde:

$K$ ,  $c_e$ ,  $ne$ ,  $K_c$  e  $nc$  são parâmetros já descritos anteriormente;

$nv$  é o número total de cruzamentos de barreiras entre cômodos nas vizinhanças do Quadro de Distribuição;

$K_v$  é o fator de desconsideração das barreiras entre cômodos nas vizinhanças do Quadro de Distribuição.

A Figura 11 ilustra os resultados obtidos a partir da utilização dessa função.

## Robustez e convergência do algoritmo implementado

Com relação à robustez e à convergência do algoritmo evolutivo desenvolvido, foram realizados testes visando, justamente, essa análise. Nesse sentido, o algoritmo foi implementado na linguagem Java e convertido para código de execução, sendo executado 100 vezes para o caso descrito no item 5.1, em um microcomputador pessoal equipado com processador Intel Pentium IV com 768 Mbytes de memória RAM, gerando os seguintes resultados:

É importante salientar que os resultados da tabela 2 se referem a valores obtidos ao final da evolução de soluções iniciais determinadas aleatoriamente, respeitando o número de indivíduos, número de gerações e taxa de mutação apresentados no início da seção.

Os dados da tabela indicam que resultados podem ser obtidos com apenas uma simulação completa em pouco tempo computacional, o que torna viável sua utilização como ferramenta de apoio para elaboração rápida de orçamentos, análises em campo ou em casos de avaliação preliminar da instalação. Ao mesmo tempo, pode-se observar

que a solução ótima pode ser encontrada após uma seqüência finita de simulações completas, sugerindo que a metodologia proposta pode apoiar a tomada de decisões quanto à determinação da malha de eletrodutos de um sistema predial durante a etapa de elaboração de projetos.

## Limitações da metodologia

É importante destacar que os resultados obtidos nos itens anteriores referem-se à solução do problema, considerando apenas a presença dos pontos de luz. Entretanto, como refinamento da metodologia apresentada, deve-se levar em conta também a presença de interruptores, pontos de força e diferentes esquemas de acionamento de lâmpadas (com interruptores simples, paralelos, intermediários), uma vez que esses aspectos podem modificar a quantidade de condutores empregada, bem como a distância percorrida por eles, alterando, portanto, o traçado ótimo a ser obtido. Dessa maneira, avanços futuros deste trabalho devem considerar a incorporação dessas características na metodologia proposta.

Valor máximo da função de fitness	977
Valor mínimo da função de fitness	971,7
Valor médio da função de fitness	974,9
Desvio padrão da função de fitness	1,02
Tempo médio de execução de uma simulação completa (s)	10,5

Tabela 2 - Resultados dos testes para análise de convergência e robustez do algoritmo

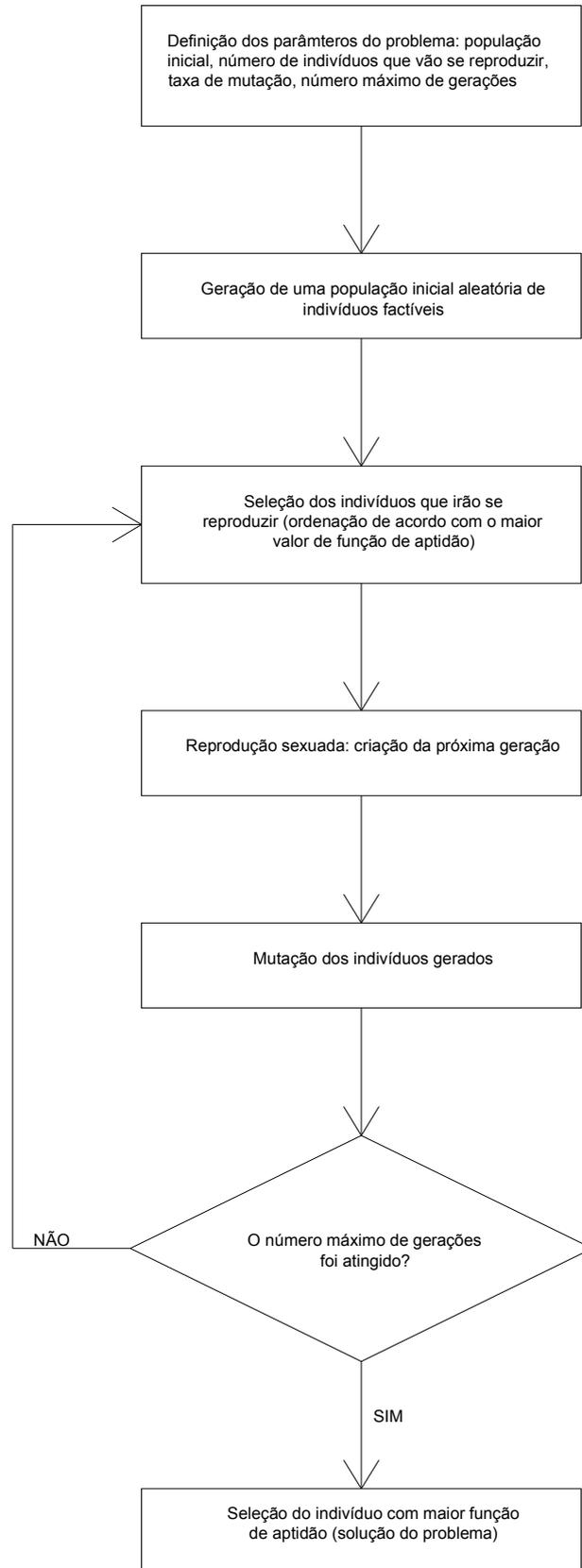


Figura 6 - Fluxograma da metodologia proposta

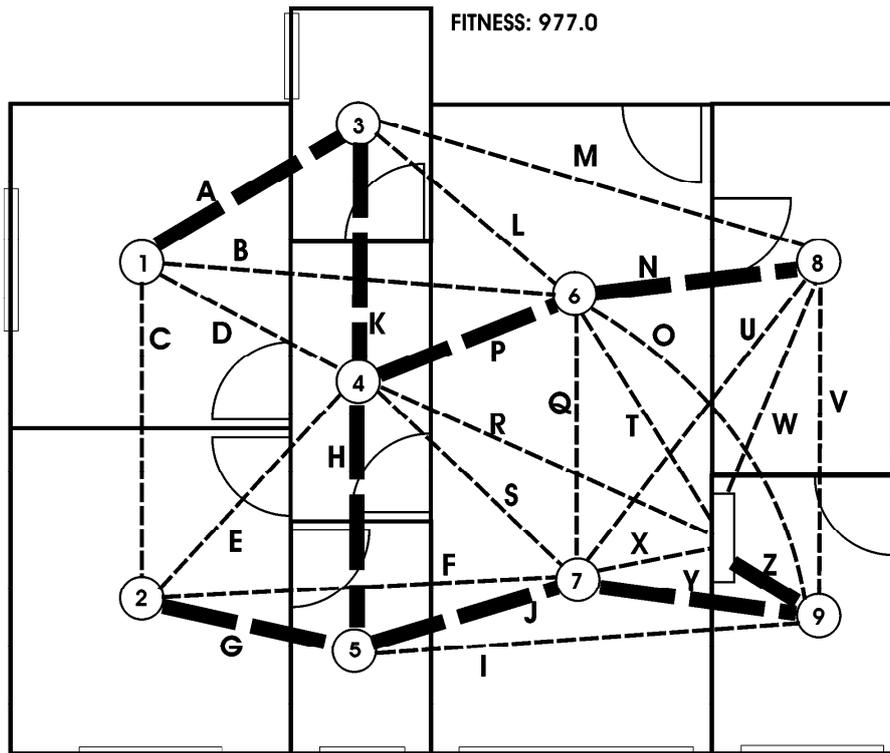


Figura 7 - Solução para o problema de alocação dos eletrodutos - Fitness = 977

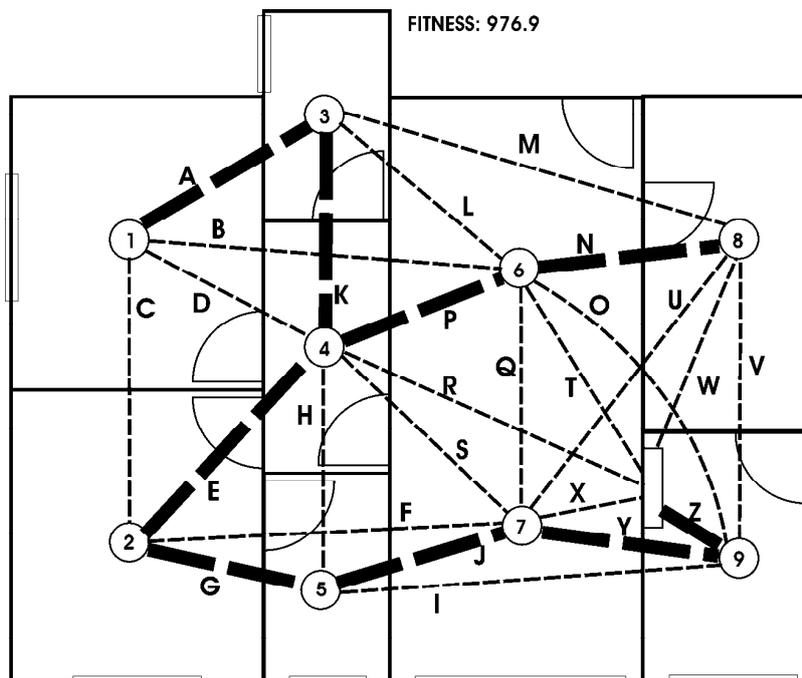


Figura 8 - Solução para o problema de alocação dos eletrodutos - Fitness = 976,9

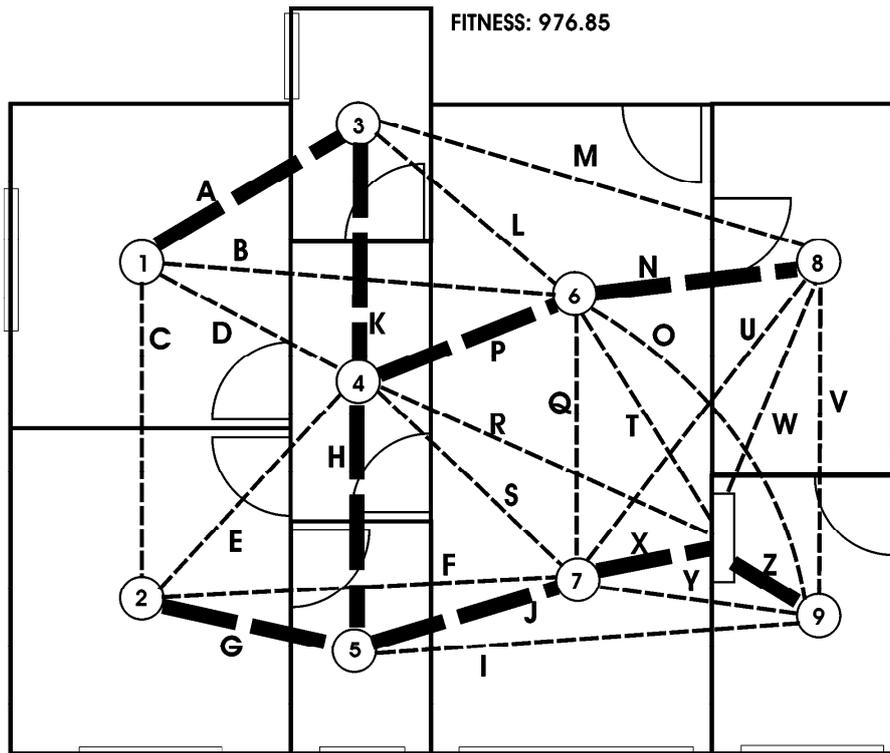


Figura 9 - Solução para o problema de alocação dos eletrodutos - Fitness = 976,85

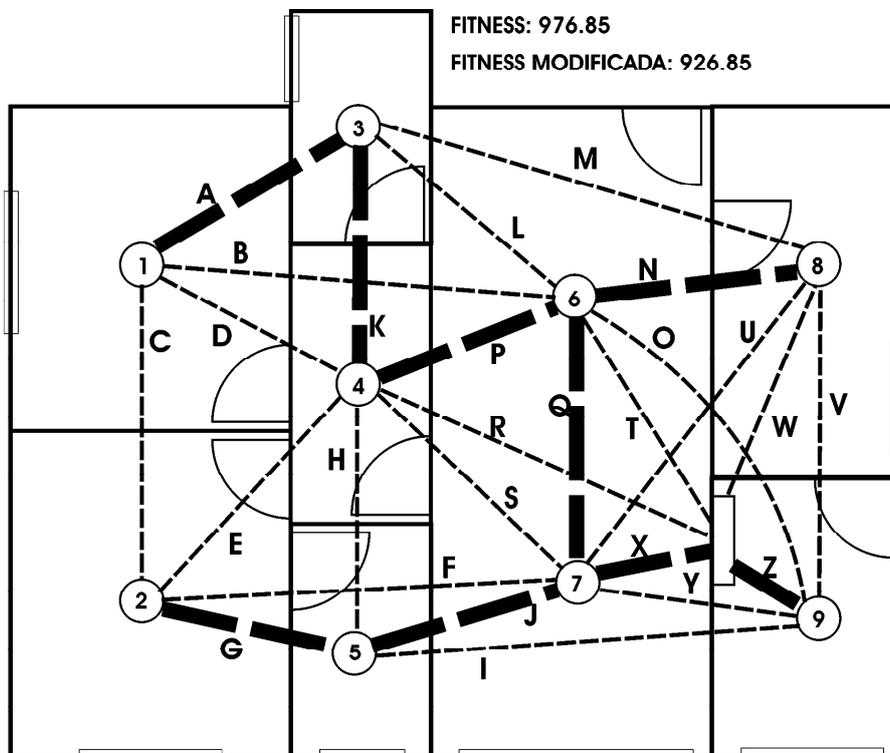


Figura 10 - Solução obtida considerando a nova função de aptidão

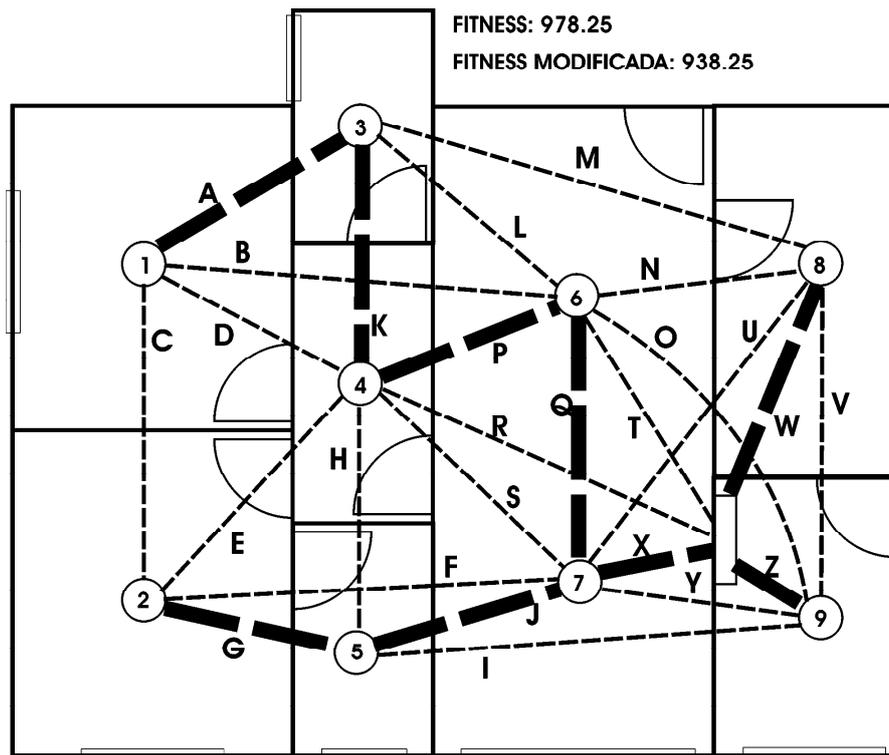


Figura 11 - Solução obtida desconsiderando as barreiras próximas ao QD

## Conclusões

Este trabalho tratou do desenvolvimento de um algoritmo evolutivo para solucionar o problema da alocação de eletrodutos em um sistema predial de eletricidade. O algoritmo implementado mostrou-se capaz de encontrar soluções factíveis para esse problema, utilizando como função de aptidão a minimização do comprimento total da malha de eletrodutos, além de variações dessa função, considerando a penalização do cruzamento de barreiras entre cômodos. A solução mais interessante foi obtida para a função de aptidão que minimiza o comprimento da malha, penalizando o cruzamento de barreiras entre ambientes, mas desconsiderando as barreiras próximas ao quadro de distribuição. Essas soluções enfatizam a redução de custos e/ou do comprimento da malha de eletrodutos em relação às outras possíveis soluções.

O algoritmo desenvolvido leva em conta a pré-especificação apenas dos pontos de luz. É importante destacar que possíveis refinamentos para o método consistem na consideração da localização de pontos de força e de dispositivos de acionamento (interruptores), bem como de diferentes esquemas de acionamentos de lâmpadas (com um interruptor simples, com dois interruptores paralelos, etc.).

## Referências

- ABDULLAH, M.; RICHARDSON, A.; HANIF, J. **Placement of sensors/actuators on civil structures using genetic algorithms**. *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 30, n.8, pp. 1167-1184, 2001.
- ARCISZEWSKI, T.; DE JONG, K. **Evolutionary computation in civil engineering: research frontiers**. In: *Civil and structural engineering computing*. Saxe-Coburg Publications, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. Rio de Janeiro, 2004.
- BÄCK, T. **Evolutionary Algorithms in Theory and Practice – Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms**. Oxford University Press. Oxford, 1996.
- BITTENCOURT, G. **Inteligência Computacional**. Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC/SC). Capturado on-line de <http://www.das.ufsc.br/gia/softcomp/> em 30/09/2006.

- CAVALIN, G.; CERVELIN, S. **Instalações Elétricas Prediais**. Editora Érica. São Paulo (SP), 2007.
- CREDER, H. **Instalações Elétricas**. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Edgar Blücher/FAPESP. Rio de Janeiro (RJ), 1995.
- GOLDBERG, D.E.; HOLLAND, J.H. Genetic algorithms and machine learning: Introduction to the special issue on genetic algorithms. **Machine Learning**, n.3, 1998.
- GONZÁLEZ, M.A.S.; FORMOSO, C.T. **Construção de modelos do mercado imobiliário para análise de viabilidade com regressão e sistemas de regras difusas**. Ambiente Construído-Revista on-line da ANTAC (Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído), vol 6, n. 4, 2006.
- GWANG-HEE, K.; et al. **Neural network model incorporating a genetic algorithm in estimating construction costs**. Building and Environment, vol 39, n. 11, pp. 1333-1340, 2004.
- HUANG, W.; LAM, H. **Using genetic algorithms to optimize controller parameters for HVAC systems**. Energy and Buildings, vol 26, n. 3, pp. 277-282, 1997.
- LEEA, J. **Optimization of indoor climate conditioning with passive and active methods using GA and CFD**. Building and Environment, vol 42, n. 9, pp. 3333-3340, 2007.
- MAWDESLEYA, M.; AL-JIBOURI, S. **Proposed genetic algorithms for construction site layout**. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol 16, n. 5-6, pp. 501-509, 2003.
- MOTA, A.A.; MOTA, L.T.M. **Solução sucessiva de problemas de programação linear para a alocação ótima de eletrodutos em sistemas prediais de eletricidade**. Anais do X SISPREL – Simpósio Nacional de Sistemas Prediais, São Carlos (SP), 2007.
- NGA, T.; SKITMOREB, M.; WONGC, K. **Using genetic algorithms and linear regression analysis for private housing demand forecast**. Building and Environment, vol 43, n. 6, pp. 1171-1184, 2008.
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Estimativa de Consumo Mensal dos principais Eletrodomésticos**. Capturado on-line de <http://www.eletrabras.gov.br/procel/11.htm> em 18/04/2002.
- RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Inteligência Artificial**. Editora Campus. São Paulo (SP), 2004.
- SILVA, F. G. B.; REIS, L. F. R. **Calibração de Redes de Distribuição de Água com Algoritmos Genéticos Aplicada a uma Rede Hipotética**. Anais do VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Vitória (ES), 2002.
- WANGA, W.; ZMEUREANUA, R; RIVARDB, H. **Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization**. Building and Environment, vol 40, n. 11, pp. 1511-1525, 2005.
- WENJIAN CAI, L.; LIHUA, X.; SHUJIANG, L.; YENG CHAI, S. **HVAC system optimization in building**. Energy and Buildings, vol 37, n. 1, pp. 11-22, 2005.