

Desenho automático de mapas octalineaes de rede de transporte público utilizando algoritmo genético

Marcelo de Lima Galvão¹, Marcus Vinicius Lamar² e Pastor Willy Gonzales Taco³

Abstract: O mapa octalinear, conhecido também como “mapa do metrô”, é uma ferramenta informativa dos sistemas de transportes públicos. Entretanto, na atualidade, sua produção é feita manualmente. Assim, o tempo utilizado e os custos de produção são altos, principalmente no caso de redes de transporte por ônibus devido à sua complexidade e à dinâmica de suas mudanças. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma solução para o desenho automático desse tipo de mapa utilizando algoritmos para grafos e algoritmo genético. Dados da rede pública de transporte de Brasília foram adotados para testar a técnica desenvolvida. Os resultados obtidos possuem qualidade visual aceitável e tempo de processamento baixo. Comprovou-se que os algoritmos genéticos servem como alternativa para a solução do problema do desenho do mapa octalinear.

DOI:10.4237/transportes.v21i3.696.

Palavras-chave: mapa esquemático, transporte público, algoritmo genético, cartografia automatizada, desenho de grafos, mapa do metrô.

Resumo: The octalinear map, also known as subway map, is an informative tool for a public transportation system. Nowadays, the production of those maps is handmade and it is rapidly outdated. Consequently it becomes a costly task especially for bus lines that are more complex and have a fast modification dynamic. As a solution to the problem of automatic drawing those diagrams, it was developed a technique that uses graph algorithms and genetic algorithms. Data from Brasilia public transportation system was adopted to apply the technique. Results obtained have good quality and were almost instantly. Genetic algorithm was proved to be an adequate solution.

Keywords: schematic map, public transportation, genetic algorithm, automated cartography, graph drawing, metro map.

1. INTRODUÇÃO

Uma das funções do transporte público é oferecer oportunidades mais igualitárias de mobilidade, além de tornar a cidade mais dinâmica por oferecer diferentes alternativas de locomoção. Porém, em redes de transportes mais complexas, a elaboração de itinerários de viagem se torna complexa sem a utilização de esquemas visuais que promovam a divulgação da rede. A qualidade da informação disponível da rede é fundamental no momento da escolha do usuário em utilizar ou não o sistema público de transporte, e é principalmente útil aos visitantes da cidade.

No Brasil, são poucas as cidades que dispõem de bons esquemas visuais que possibilitem aos usuários elaborar itinerários por meio de mapas e tabelas de horários. Isso cria dificuldades para os passageiros ao utilizarem os sistemas de transporte público. As razões para essas cidades não disponibilizarem um esquema informativo desse tipo são as mais diversas. Primeiramente existe pouca documentação e padronização que abordem o tema. Muitas vezes não se encontram fundos disponíveis para a elaboração desses materiais, além da necessidade de pessoal especializado para a produção de mapas de rede de transporte (Avelar, 2002). Além disso, as cidades brasileiras, na sua maioria, possuem

o ônibus como principal meio de transporte público. Como as redes de ônibus são mais complexas que as redes de metrô, por exemplo, a preparação de esquematizações de forma manual pode ser uma tarefa muito dispendiosa, além do que a dinâmica de modificações no sistema causaria rápida desatualização do material informativo.

Imagine-se um usuário de transporte público em uma área urbana que deseja se locomover de um ponto A a um ponto B do espaço, e que para isso necessita usar das opções da rede de transporte público. Sabe-se onde o ponto A e o ponto B localizam-se, porém desconhecem-se as opções do sistema de transporte público nesse local. Como se pode melhor elaborar o itinerário? Provavelmente surgirá uma série de perguntas nesse momento: onde e quando embarcar, em qual veículo entrar, quantas paradas faltam até o destino final, quais as conexões necessárias, e quando chegar? Estas questões precisam ser respondidas para que se faça uma viagem tranquila, de forma que o usuário do sistema de transporte público possa se deslocar com eficiência e qualidade.

Uma das ferramentas mais utilizadas para este fim, e que permite obter subsídios para responder as questões antes relatadas, é o mapa octalinear. Esse tipo de diagrama, reconhecido pelo público nos mapas da rede de metrô das principais cidades do mundo, foi concebido pela primeira vez por Henry Beck em 1933. Na Figura 1, apresenta-se a primeira publicação para o Metrô de Londres (*Tube Map*). A ideia de Beck foi restringir o *layout* do mapa com o objetivo de passar somente as informações necessárias para a realização da viagem. Sua invenção teve imediata aceitação, pois se tratava de um mapa funcional, claro e agradável. O mapa tornou-se um clássico do *design* mundial, sendo hoje o principal padrão utilizado para representar redes de transporte coletivo (Garland, 1994; Polatschek, 2006). A configuração octalinear é útil para representar redes que possuem caminhos bem definidos, que precisam ser seguidos visual-

¹ Marcelo de Lima Galvão, Departamento de Ciência da Computação, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. (e-mail: galvaobrasil@gmail.com)

² Marcus Vinicius Lamar, Departamento de Ciência da Computação, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. (e-mail: mvlamar@gmail.com)

³ Pastor Willy Gonzales Taco, Programa de Pós-Graduação em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. (e-mail: pwgtaco@gmail.com)

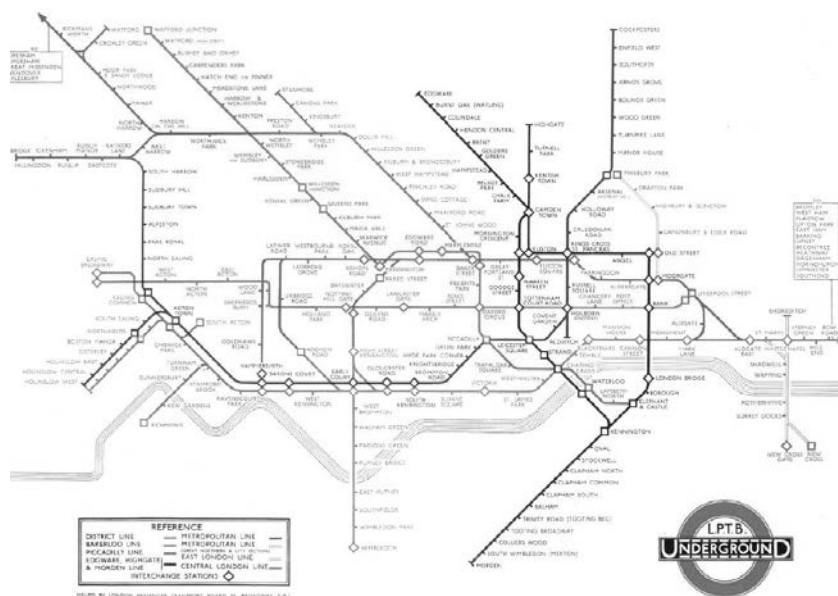


Figura 1. Tube Map - Primeira publicação oficial em forma de configuração octalinear datado de 1933 [Fonte: *Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, Die Schönheit des untergrundes* (2006)]

mente e, ao mesmo tempo, apresentar uma forma compacta. Não corresponde necessariamente a uma representação real da cidade, onde as distâncias relativas entre localidades são preservadas. Ela é uma simplificação da rede de transporte, onde as informações desnecessárias são omitidas, gerando um mapa despoluído, limitando-se a atender as necessidades dos usuários quanto às opções de rotas e serviços (Anand *et al.*, 2007).

A geração automática de mapas esquemáticos pode trazer muitos benefícios. Utilizando-se do poder de processamento dos computadores, a quantidade do material produzido poderá ser multiplicada. No caso de alterações operacionais na rede de transporte, como no caso da inclusão ou exclusão de uma linha, a atualização será mais simples, sem a necessidade de uma revisão do material anteriormente produzido. Os informativos poderão, também, ser interativos e muito mais versáteis, o que irá potencializar o seu uso. Um algoritmo que gere resultados em poucos segundos poderá ser aproveitado por dispositivos como *tablets* e *smartphones*. E a informação poderá ser apresentada de forma personalizada, respeitando as necessidades individuais de cada usuário.

Embora sejam significativos os avanços da tecnologia da informação, na atualidade não existem aplicativos comerciais que esbocem a informação nessa forma esquemática em um tempo significativamente curto, sendo necessária uma confecção manual por designers especializados. Conforme demonstrado por Nöllenburg (2005), o problema de desenhar o grafo na forma octalinear pertence à classe NP-Completo da teoria computacional. Isso significa que a configuração octalinear é um problema tão difícil quanto o mais difícil dos problemas da classe NP, o que justifica a dificuldade de encontrar aplicativos de desenho automático.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma solução para o desenho automático de mapas octalineares, utilizando algoritmos para grafos, tecnologias computacionais, sistemas de informações geográficas (SIG) e algoritmos genéticos. Assim, o trabalho está dividido em cinco seções, seguido da primeira seção tem-se a segunda seção com uma revisão bibliográfica do desenvolvimento de aplicativos para desenho automático de mapas octalineares, na

seção três é caracterizado o problema da configuração octalinear, na seção quatro apresenta-se o desenvolvimento do algoritmo genético para a configuração octalinear, na seção cinco são apresentados os resultados da aplicação para o caso da rede de transporte público da cidade de Brasília-DF, e finalmente na seção seis as conclusões.

2. MAPAS OCTALINEARES

O desenho automático de mapas esquemáticos normalmente possui uma abordagem multidisciplinar envolvendo áreas diversas do conhecimento tais como a teoria dos grafos, algoritmos para desenho de grafos, inteligência artificial, arquitetura da informação e cartografia. Porém, os primeiros trabalhos dedicados exclusivamente à geração automática de mapas octalineares para transporte público surgiram a pouco mais de uma década. Devido à natureza não determinística do problema as técnicas utilizadas por cada pesquisador são diversas.

Por exemplo, Neyer (1999) propõe uma técnica de retificação de curvas nas quatro orientações octalineares (vertical, horizontal, e as duas diagonais). Utiliza um método que limita o posicionamento dos vértices a uma área circular pré-definida, procurando manter assim a topologia na rede.

Já Avelar (2002) fez um estudo completo sobre o desenho automático de mapas esquemáticos. Primeiramente identificou as características estéticas e as convenções que são necessárias para gerar bons mapas esquemáticos. Apresentou uma modelagem conceitual de dados que atende as principais necessidades para se produzir mapas esquemáticos sobre demanda de transportes. A autora implementou um algoritmo que esquematiza um mapa de rotas. No pré-processamento, utiliza o algoritmo *Douglas-Peucker* (Douglas e Peucker, 1973) para diminuir o número de pontos das linhas, assim o algoritmo reposiciona iterativamente os vértices das arestas até que um critério de parada seja atingido. Os resultados práticos apresentados mostram grande aplicabilidade na esquematização das ruas da cidade de Zurique. Entretanto, vale ressaltar que exigiu um tempo de processamento consideravelmente longo e não realiza identifica-

ção individual das linhas por meio de cores.

Nöllenburg (2006) fez importantes contribuições para quem estuda esquematizações dos mapas. Comprovou que o problema de decisão do “Mapa do Metrô”, isto é, dado um grafo decidir se este pode ser esquematizado como um mapa de metrô é NP-Completo. Também, apresentou uma solução que gera mapas esquemáticos de metrô com qualidade muito próxima a mapas feitos por cartógrafos e desenhistas profissionais. Utilizou programação linear inteira mista (*Mixed Integer Linear Programming*) e garante que qualquer rede pode ser esquematizada com seus algoritmos. Outra característica dos algoritmos desenvolvidos é que os mapas gerados criam espaço para o rótulo dos pontos de parada, ou seja, o nome das paradas não se sobrepõe. Entretanto, o tempo de execução dos algoritmos é longo, e pode demorar muitos minutos para gerar um mapa de uma rede grande.

Stott *et al.* (2011) utilizam a técnica de otimização *Hill Climbing*. A cada iteração do algoritmo um vértice é reposicionado em um *grid* pré-definido. Caso o novo posicionamento preserve a topologia da rede e produza uma solução mais adequada à alteração é aceita, senão, descartada. Wolff (2007) apresentou um *survey* que compara algumas das principais técnicas publicadas de esquematização de mapas.

3. O PROBLEMA DA CONFIGURAÇÃO OCTALINEAR

A configuração octalinear pode ser considerada como um padrão de desenho de grafos. Normalmente um padrão de desenho de grafos consiste das convenções de desenho e das características estéticas desejadas (Battista *et al.*, 1999). A condição mais evidente do grafo octalinear é a restrição do número de orientações dos segmentos de linha a quatro (vertical, horizontal, e as duas diagonais). No entanto, de acordo com Garland (1994), o design proposto por Beck possui outras características.

Nesse contexto, Wolff e Nöllenburg (2011) estudaram diversos mapas utilizados em todo o mundo e identificaram as suas principais semelhanças. As semelhanças permitiram estabelecer certas regras, listadas a seguir, as quais representam as convenções e características estéticas desejáveis e que são importantes para o desenvolvimento do trabalho:

Regra 1: Manter linhas e paradas incorporadas no mapa evitando causar alguma confusão mental na percepção dos usuários;

Regra 2: Restringir todos os segmentos às quatro orientações octalineaes, horizontal, vertical, as diagonais de 45° e 135°. Apesar de restringir o grau de cada vértice a oito, esta regra mantém o mapa claro e legível;

Regra 3: Assegurar-se que as paradas adjacentes e não-adjacentes mantenham uma distância mínima. Isso também mantém a legibilidade do mapa;

Regra 4: Evitar ao máximo mudanças de direção no desenho de uma linha, especialmente em paradas que representam as interseções. Se isso não puder ser evitado, dê preferência a ângulos obtusos ao invés de ângulos agudos. Esta regra ajuda os passageiros a acompanharem a linha de transporte no mapa com os olhos;

Regra 5: Preservar ao máximo a posição relativa dos pontos de paradas e interesse. Apesar das paradas não re-

presentarem obrigatoriamente a sua posição geográfica real, devem manter um posicionamento coerente no mapa. Uma parada localizada ao norte de outras paradas não deve ser desenhada no mapa parecendo estar ao sul delas. Isso evita os passageiros de se confundirem quando comparam o mapa da rede com um mapa geográfico;

Regra 6: Manter o valor da soma do comprimento de todas as arestas pequeno. Essa regra, junto com a *Regra 3*, mantém a distância entre paradas adjacentes uniformes. Como consequência, as regiões mais densas ganham espaço de regiões mais vazias;

Regra 7: Cada linha deve ser representada por uma cor única, e cada aresta deve possuir a cor referente a linha a qual pertence. Se uma aresta pertence a k linhas, então k cópias da aresta devem ser desenhadas (logo o grafo é multi-aresta). A ordem dessas k arestas deve manter consistência com a ordem de suas arestas adjacentes. As cores ajudam os usuários a acompanharem uma linha com os olhos;

Regra 8: Rotular as paradas com os seus nomes e evitar que um rótulo não se sobreponha ao outro ou mesmo outras partes do mapa. Preferencialmente, todos os rótulos entre duas interseções devem ser escritos em um mesmo lado da linha.

O cumprimento destas regras não é tão trivial. A aplicação de uma regra pode comprometer a aplicação de outra. Por exemplo, como identificou Nöllenburg (2005), ao aplicar a *Regra 4* e procurar eliminar as flexões das linhas, pode-se comprometer a *Regra 5*, distorcendo o mapa demasiadamente. E a intenção de preservar as posições relativas pode acabar criando um número desnecessário de flexões no mapa. Assim, baseado nessas questões estéticas da configuração do mapa, Hong *et al.* (2005) apresentaram “O problema do *layout* do mapa do Metrô”. O problema de forma simplificada pode ser explicitado da seguinte forma:

Problema: Dado um grafo $G=(V,E)$ com grau máximo de 8, e um conjunto L de linhas que cobrem todo o grafo e coordenadas dos vértices em \mathbb{R}^2 , encontre-se um desenho refinado respeitando as regras de Beck.

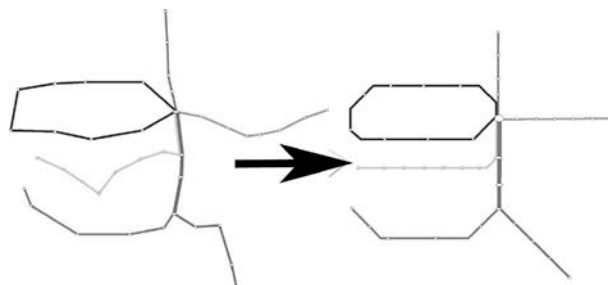


Figura 2. Exemplo de entrada, e saída para o problema *layout* do mapa do metrô

A Figura 2 ilustra um exemplo de entrada e saída de um algoritmo para resolver esse problema. O grafo da esquerda representa uma rede com a sua topologia real (as distâncias relativas entre os vértices são preservadas). O grafo da direita representa uma possível solução do problema, um mapa octalinear. Nöllenburg (2005) comprova que tal problema de desenhar o grafo na forma octalinear pertence à classe NP-Completo, o que significa que este é um problema tão difícil quanto o mais difícil dos problemas da classe NP. Ele demonstrou o problema reduzindo-o a partir do proble-

ma Planar 3SAT, que é utilizado em outros problemas que envolvem geometria computacional, uma clássica derivação do problema de satisfatibilidade 3SAT (Galvão, 2010). Tal demonstração desenvolvida por Nöllenburg (2005) é relevante porque prova que não se pode esperar que se encontre algum algoritmo eficiente para realizar essa tarefa. A recomendação para resolver o problema é de buscar heurísticas, ou tratar instâncias diferentes de formas específicas, ou então alterar a definição do problema. É com base nessa descoberta que o presente trabalho utiliza a técnica do algoritmo genético.

4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

Nesta seção será apresentado o procedimento de desenvolvimento do algoritmo genético e como ele foi adaptado de forma a gerar mapas octalineaes. Uma explicação mais detalhada do método pode encontrada em Galvão (2010).

Os algoritmos genéticos são algoritmos de busca inspirados no mecanismo da seleção natural. Os problemas são resolvidos através de um processo evolutivo que resulta em uma solução adequada. Basicamente, o que um algoritmo genético faz é criar uma população inicial de possíveis soluções para o problema, então a partir da combinação dos elementos de uma população cria-se uma nova geração de possíveis soluções. Esse processo é motivado pela expectativa de que uma população possui soluções melhores que a geração anterior. Essa expectativa advém do fato de se escolher as soluções mais adequadas para gerar as soluções da próxima geração (Melanie, 1999).

Uma das etapas de maior importância no desenvolvimento de um algoritmo genético é escolher como codificar o cromossomo de cada indivíduo (Melanie, 1999). Os indivíduos de uma população são a unidade fundamental de um algoritmo genético. Eles são representados por cromossomos e identificam as possíveis soluções do problema. Neste estudo, um indivíduo é uma linha no formato octalinear (Figura 3). Devido à natureza geométrica do problema, a maneira mais intuitiva de codificar um cromossomo é utilizar as coordenadas cartesianas dos pontos de parada que compõem a linha. Porém, para facilitar as outras operações envolvidas no algoritmo genético, ao invés de utilizar as coordenadas cartesianas dos pontos, utilizou-se da coordenada polar relativa.

O sistema de coordenadas polares relativas representa uma linha com n pontos, selecionando-se como origem p_0 um dos dois pontos extremos da linha. O ponto p_0 é representado pela sua coordenada cartesiana, ou seja, seus valores (x,y) ; já o único ponto adjacente ao ponto p_0 , o ponto

p_1 , é representado pela coordenada polar relativa ao ponto p_0 , ou seja, um valor para (r,Θ) onde r representa a distância entre p_0 e p_1 , e Θ o ângulo formado entre a reta que une os pontos p_0 e p_1 e o eixo x . O outro ponto adjacente a p_1 , o ponto p_2 , é representado pela coordenada polar relativa ao ponto p_1 , ou seja, um valor para (r,Θ) onde r representa a distância entre p_1 e p_2 , e Θ o ângulo formado entre a reta que une os pontos p_1 e p_2 e o eixo x . Essa representação por coordenada polar relativa segue até o ponto p_n . Exceto pelo ponto p_0 , p_k é sempre representado pelo valor (r,Θ) onde r representa a distância entre p_{k-1} e p_k , e Θ o ângulo formado entre a reta que une os pontos p_{k-1} e p_k e o eixo x . Formando assim o cromossomo de uma linha. A Figura 3 ilustra um exemplo de linha com seu valor de cromossomo polar codificado.

Uma vez definida a codificação do cromossomo, a etapa seguinte do desenvolvimento é definir as outras operações básicas do algoritmo genético. O cruzamento e a mutação são as operações que irão garantir a diversidade nas populações a cada geração. A operação de cruzamento consiste em recombinar dois cromossomos de forma randômica. O cruzamento escolhido no desenvolvimento do algoritmo para este projeto foi o cruzamento entre dois pontos. Sejam L_1 e L_2 dois cromossomos de tamanho n , o cruzamento entre L_1 e L_2 consiste em sortear dois índices i e j tal que i e j são maiores que 0 e menores que n e $i < j$, e em seguida recombinar as partes de L_1 e L_2 definidas pelos índices i e j para gerar os dois filhos L'_1 e L'_2 . Como resultado L'_1 será o cromossomo que conterà os genes de L_1 de 0 a i mais os genes de L_2 de $i+1$ a j mais os genes de L_1 de $j+1$ a n , e L'_2 o cromossomo que conterà os genes de L_2 de 0 a i mais os genes de L_1 de $i+1$ a j mais os genes de L_2 de $j+1$ a n .

A Tabela 1 exemplifica o cruzamento de dois cromossomos. Neste caso prático os índices i e j sorteados foram 2 e 5 respectivamente. A coluna "Cromo 1 x Cromo2" mostra o cromossomo resultante de um dos filhos dessa operação.

É importante observar que a prole resultante de um cruzamento sempre representará uma configuração octalinear da linha se os cromossomos dos ascendentes representarem também uma configuração octalinear. É possível garantir isso porque os valores Θ dos cromossomos resultantes não sofrem alteração direta.

A operação de mutação consiste em alterar aleatoriamente um dos genes do cromossomo. O processo de mutação ajuda a evitar uma fixação permanente em um mínimo local no espaço de soluções. Conforme a codificação do cromossomo apresentada, um gene é representado pelos valores (r, Θ) , então a mutação de um cromossomo corresponde em alterar os valores r ou Θ de um gene. A fim de evitar distor-

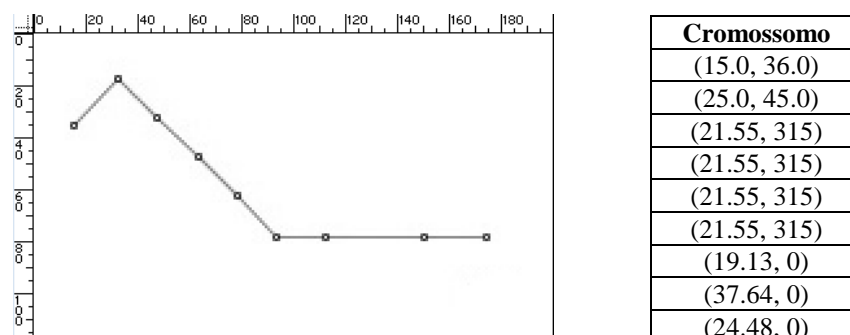


Figura 3. Linha octalinear e codificação do cromossomo da linha

Tabela 1. Exemplo de cruzamento

Índice	Cromossomo 1	Cromossomo 2	Cromo. 1 x Cromo. 2
0	(31.00, 97.00)	(31.00, 97.00)	(31.00, 97.00)
1	(16.15, 90)	(16.15, 90)	(16.15, 90)
2	(26.51, 0)	(26.51, 0)	(26.51, 0)
3	(24.36, 0)	(26.51, 45)	(26.51, 45)
4	(24.36, 0)	(18.26, 45)	(18.26, 45)
5	(24.36, 0)	(32.97, 0)	(32.97, 0)
6	(19.00, 315)	(34.24, 315)	(19.00, 315)
7	(41.5, 270)	(34.25, 225)	(41.50, 270)
8	(30.87, 0)	(30.87, 0)	(30.87, 0)
9	(16.88, 0)	(16.88, 0)	(16.88, 0)

ções desproporcionais no processo, a mutação desenvolvida altera o valor r aleatoriamente em uma margem de 50% de r para mais ou para menos, e a alteração de Θ é feita acrescentando ou reduzindo 45° ao valor de Θ original, assim mantém-se também a octilineariedade. A Tabela 2 exemplifica um processo de mutação de um cromossomo. O cruzamento e a mutação são as únicas operações do algoritmo genético responsáveis pela geração de novos indivíduos na população. Como já observado, o desenvolvimento do processo tanto de mutação como o de cruzamento mantém a octilineariedade dos descendentes, então se a população inicial for formada apenas por indivíduos na forma octilinear, os indivíduos de todas as populações sucessivas também serão octilineares, e o algoritmo genético, então, sempre irá garantir uma solução válida para o problema. Ou seja, qualquer que seja a solução, sempre respeitará a **Regra 2**.

Tabela 2. Exemplo de mutação

Cromossomo	Cromossomo Mutado
(34.00, 87.00)	(34.00, 87.00)
(19.41, 45)	(19.41, 45)
(22.24, 0)	(28.52, 45)
(22.24, 0)	(22.24, 0)
(22.24, 0)	(22.24, 0)
(22.24, 0)	(22.24, 0)
(22.24, 0)	(22.24, 0)
(22.24, 0)	(22.24, 0)

4.1. Função de *Fitness* e processo de seleção

A operação de avaliação é o primeiro passo no processo de seleção. A avaliação consiste em avaliar o grau de adaptação ou rejeição do cromossomo de um indivíduo como solução para o problema. Normalmente a avaliação de um cromossomo é feita por meio de uma função de *fitness* que interpreta o cromossomo e retorna um índice que representa o nível da qualidade do cromossomo como solução para o problema. Durante o desenvolvimento desse projeto a operação de avaliação não foi investigada de forma sistemática. Por isso, antes de apresentá-la, será explicado subjetivamente os fundamentos envolvidos nessa função.

As regras a serem apreciadas na avaliação são duas, portanto a função de *fitness* implementada mede dois fatores do cromossomo passado como entrada. O primeiro o fator é relacionado à **R4**. Esse fator é uma soma ponderada das flexões contidas na linha. Devido à definição de **R4**, as flexões com ângulos mais agudos terão peso proporcionalmente maior. O segundo fator é relacionado à regra **R5**. Esse fator

mede o nível de distorção da linha relativo ao formato original. Esse fator é calculado pela distância entre os pontos da linha original em relação aos respectivos pontos na linha em forma esquemática passada. Assim, dados da linha original são também parâmetros de entrada para a função de *fitness*. Uma vez calculados, esses dois fatores são operados por constantes que definirão seu peso e somados para gerar o índice de retorno.

A solução ideal é aquela que busca o equilíbrio perfeito entre as regras **R4** e **R5**, ou seja, um equilíbrio entre o mínimo possível de flexões na linha e um posicionamento coerente dos pontos de forma a não distorcer demasiadamente a forma da linha. Logo o objetivo da operação de avaliação é apreciar o nível em que as características estéticas das regras **R4** e **R5** são respeitadas. Assim a função de *fitness* foi desenvolvida com a expectativa do retorno de um índice inversamente proporcional ao equilíbrio entre as regras **R4** e **R5**.

A Equação 1 apresenta a função *fitness* utilizada nos experimentos para obter-se o valor de aptidão (η) dos cromossomos como solução para o problema.

$$\eta = \frac{\bar{d}}{2} + \sigma + Z \quad (1)$$

sendo η o índice de retorno, \bar{d} a média da distância entre os respectivos pontos da linha original em relação aos da linha na forma esquemática, calculada da seguinte forma:

Seja $L = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$ a linha original, e $L' = (b_0, b_1, b_2, \dots, b_n)$ a linha esquemática a ser avaliada, e $d(a, b)$ a distância entre os pontos a e b , assim

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d(a_i, b_i)}{n} \quad (2)$$

O coeficiente σ é o desvio padrão em relação à média \bar{d} , calculado por

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d(a_i, b_i) - \bar{d})^2} \quad (3)$$

Na Equação 1, o coeficiente Z é a média ponderada das flexões na linha. Seja $|x^o|$ a quantidade de flexões com x^o contidas na linha, deste modo

$$Z = \frac{1 \times |45^\circ| + 3 \times |90^\circ| + 5 \times |135^\circ|}{n} \quad (4)$$

As constantes 13 e 2 da Equação 1, são usadas para ba-

lançar os coeficientes de modo a produzir um equilíbrio desejado pelos autores entre as regras **R4** e **R5**. Outros valores para tais constantes poderiam ser utilizados caso um equilíbrio diferente tivesse sido desejado.

Com a função de avaliação definida é possível identificar quais indivíduos de uma população são mais adequados como solução e assim definir o processo de seleção. O processo de seleção adotado nesse algoritmo genético é a seleção por *ranking*. Os indivíduos da população são ordenados de acordo com seu valor de adequação e então sua probabilidade de escolha para reprodução é atribuída conforme a posição que ocupam. Indivíduos com índice de retorno menor possuem mais chances de se reproduzirem e passar seus genes para próximas gerações do que indivíduos que possuem índice mais alto. A fim de não se perder a melhor solução gerada, o processo de seleção é também elitista, ou seja, a melhor solução de cada geração é passada sem alterações para a geração seguinte.

5. APLICAÇÃO À REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO DE BRASÍLIA-DF

O algoritmo genético de esquematização de linhas foi testado em um aplicativo desenvolvido exclusivamente para esse fim. Esse aplicativo permite que o usuário crie linhas livremente para submetê-las ao algoritmo de esquematização. A experiência permite, também, que todos os indivíduos, a cada geração, sejam visualizados, e assim avaliar o comportamento do algoritmo.

A fim de apresentar a evolução na esquematização, um conjunto de linhas com variadas formas foi criado e submetido ao processo de esquematização. Para cada linha, sempre que a melhor solução de uma geração tiver sido alterada em relação à geração anterior, é guardada a imagem da configuração dessa solução, gravando assim o progresso da forma octalinear para cada linha. Esse processo é realizado até que não haja alguma alteração com o passar de 1000 gerações. As Figuras 4 e 5 ilustram resultados desse experimento. É possível identificar a geração e o valor da avaliação de cada forma encontrada.

Como observado, o processo de melhora contínuo pro-

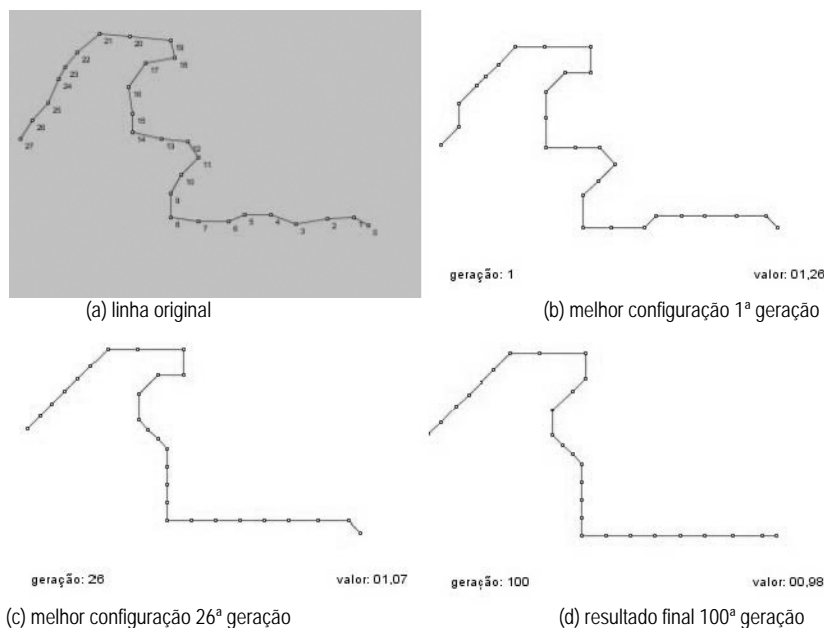


Figura 4. Evolução da esquematização 1. Resultado obtido em 0,23 segundos

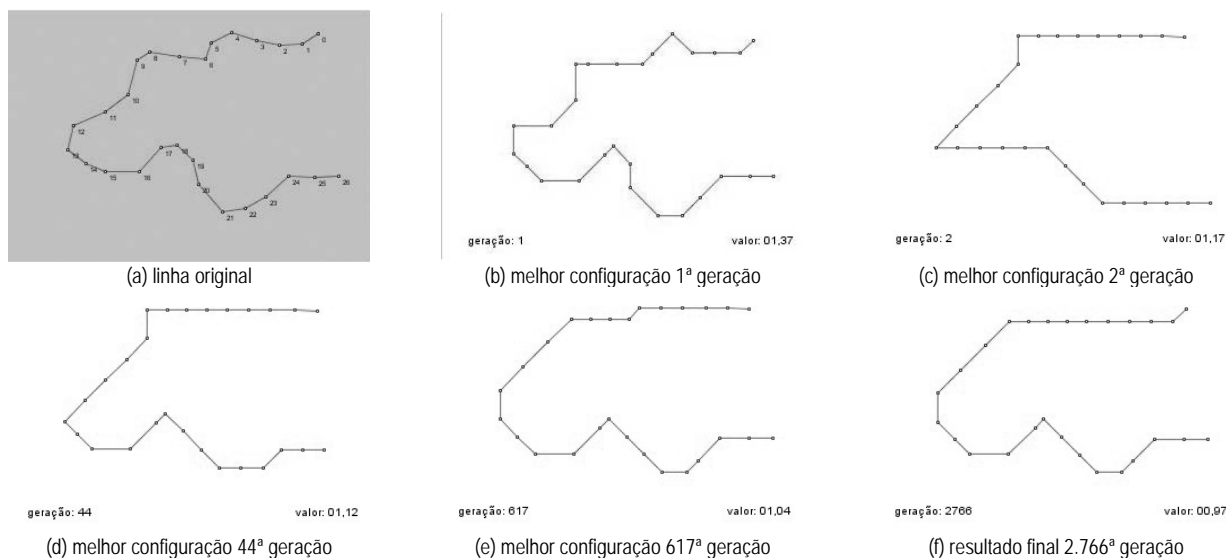
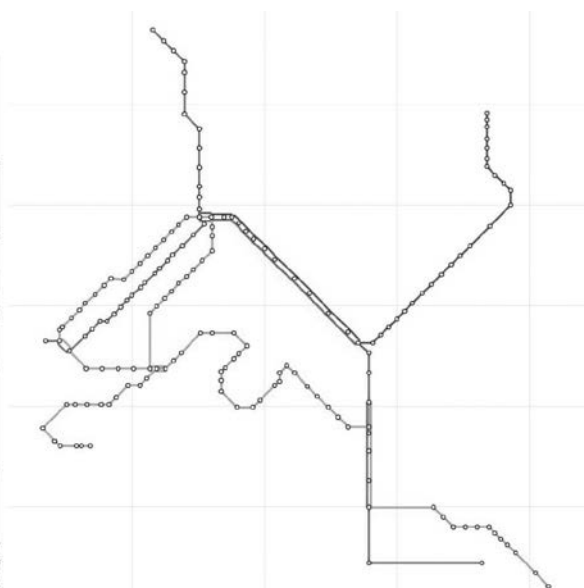


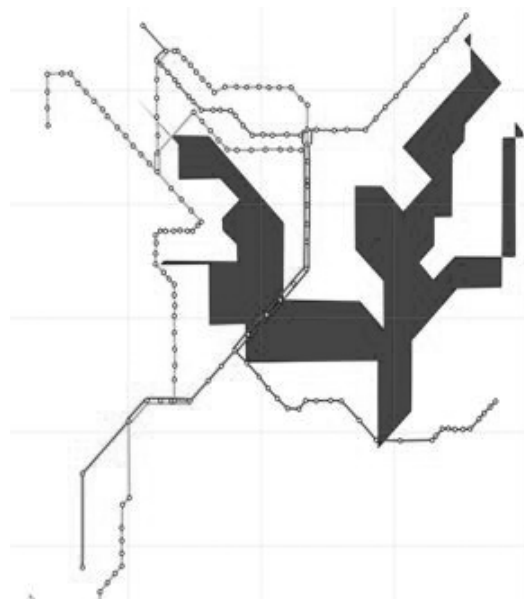
Figura 5. Evolução da esquematização 2. Resultado obtido em 0,41 segundos



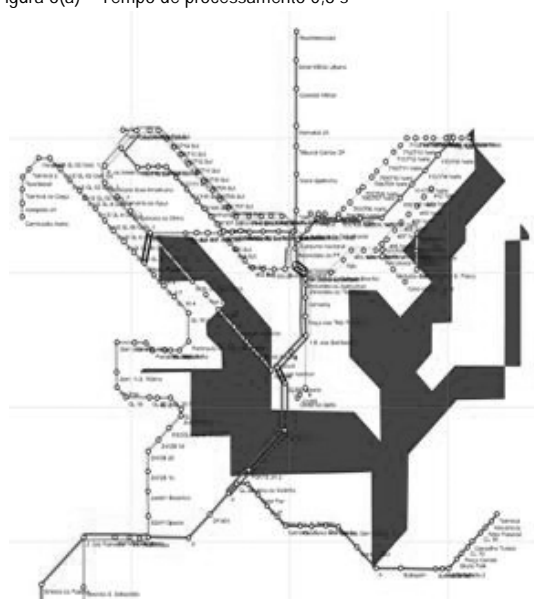
(a) Linhas de ônibus de Brasília. Mapa não esquemático



(b) Esquemática do conjunto de linhas em destaque (cor mais clara) da Figura 6(a) – Tempo de processamento 0,8 s



(c) Mesmo conjunto de linhas de 6(b), com diferente orientação – Tempo de processamento 0,8 s



(d) Todas as linhas esquematizadas, incluindo rótulos – Tempo de processamento 1,1 s

Figura 6. Resultado prático da esquematização utilizando algoritmo genético

porcionado pelo algoritmo a cada iteração produz soluções que possuem quase sempre qualidades visuais bem aceitáveis, e o tempo de execução (sempre menor que um segundo) está dentro do tolerável. Todos os métodos usados no experimento foram implementados em na linguagem Java, e a execução foi em um processador *Intel Core Duo*, com frequência de 2GHz e 3GB de memória RAM. Esses resultados demonstram a utilidade do algoritmo genético para o problema do *layout* do grafo octilinear.

A Figura 6 apresenta os dados espaciais coletados da rede de transporte coletivo de Brasília-DF (Figura 6a), e alguns resultados relativos à aplicabilidade desse algoritmo para produzir os mapas informativos (Figuras 6b, 6c, 6d).

O software utilizado nesse experimento permite ao usuário escolher as linhas de interesse a serem esquematizadas. A Figura 6(b) representa a esquematização do conjunto de linhas destacados com uma cor mais clara na Figura 6(a). Comparando ambas as imagens é possível avaliar o resultado obtido pelo algoritmo.

Para proporcionar um equilíbrio visual melhor, em mui-

tos mapas de Brasília o norte fica orientado a direita, e não ao topo como é o padrão mais convencional. O objetivo da Figura 6(c) é mostrar a esquematização com essa orientação. Observe que, para mapas octilineares, a menor mudança na orientação geográfica faz-se necessário desenhar um novo mapa. A Figura 6(d) ilustra a esquematização de todas as linhas que foram modeladas para esse experimento, e para fins ilustrativos incluiu-se uma rotulação automática, porém primitiva, dos pontos de parada.

6. CONCLUSÕES

O mapa octilinear (mapa do metrô) é uma importante ferramenta informativa para um sistema de transporte público. Atualmente, sua produção é manual e normalmente apresentada como um folheto estático. Além do custo de produção ser alto, os mapas esquemáticos atuais possuem limitações para representar redes muito grandes, complexas e dinâmicas, como as redes de ônibus. Assim a aplicação desenvolvida, que faz uso de algoritmos para grafos e algoritmo ge-

nético para resolver o problema do desenho automático do mapa octalinear, torna-se promissora no contexto brasileiro. O método apresentado explora a capacidade dos algoritmos genéticos em buscar uma boa solução em um domínio de problema complexo.

A adaptação do algoritmo genético para esse fim provou-se uma solução adequada, uma vez que os resultados obtidos possuem qualidade visual aceitável e foram alcançados praticamente de forma instantânea. Sua eficiência foi testada com dados reais da rede brasileira de transporte público. Os resultados mostram a redução da quantidade de flexões das linhas sem distorções grosseiras, causando um efeito similar aos dos mapas de metrô usados comercialmente. Além do mais, o algoritmo genético para esquematizar mapas proposto é particularmente útil a mídias interativas e dinâmicas, como terminais eletrônicos e dispositivos móveis como *tablets* e *smartphones*. No contexto atual é uma boa opção perante a aproximação da realização da Copa do Mundo de 2014 e das Olimpíadas de 2016. Para uma melhor avaliação do algoritmo sugere-se aplicá-lo a redes de transportes utilizadas em trabalhos similares, e comparar os resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avelar, S. e M. Müller (2000) Generating topologically correct schematic maps. In *Proc. 9th Int. Symp. on Spatial Data Handling (SDH'00)*.
- Anand, S., S. Avelar, J. M. Ware e M. Jackson (2007) Automated schematic map production using simulated annealing and gradient descent approaches. *Geographical Information Systems Research - GISRU'07*.
- Avelar, S. (2002) *Schematic maps on demand: Design, modeling and visualization*. Thesis (PhD), Institute of Technology Zurich.
- Battista, G. D., P. Eads, R. Tamassia e I. Tollis (1999) *Graph Drawing: algorithms for the visualization of graphs*. Allan Apt, New Jersey, Estados Unidos.
- Douglas, D. e T. Peucker (1973) Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitalized line or its caricature. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, v. 10, n. 2, p. 112–122. DOI: [10.3138/FM57-6770-U75U-7727](https://doi.org/10.3138/FM57-6770-U75U-7727).
- Galvão, M. (2010) *Esquematizações infográficas automáticas para transporte público: usando algoritmos genéticos*. Trabalho de Graduação – Ciência da Computação, Universidade de Brasília.
- Garland, K. (1994) *Mr Beck's Underground Map*. Capital Transport Publishing.
- Hong, S. H., D. Merrick e H. Nascimento (2005) The metro map layout problem. In: *Proc. Graph Drawing 2004*, Springer-Verlag.
- Melanie, M. (1999) *An Introduction to Genetic Algorithms*. MIT Press, Cambridge, England.
- Neyer, G. (1999) Line simplification with restricted orientations. 6th Int. Workshop on Algorithms and Data Structures (WADS'99), *Lecture Notes in Computer Science*, v. 1663, p. 13–24, Vancouver, BC. Springer-Verlag.
- Nöllenburg, M. (2005) *Automated drawings of metro maps*. Dissertation (Master's degree), Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe.
- Nöllenburg, M. e A. Wolff (2006) A mixed-integer program for drawing high-quality metro maps. In *Proc. 13th International Symposium on Graph Drawing*. Springer-Verlag.
- Stott, J., P. Rodgers, J. C. Martinez-Ovando e S. G. Walker (2011) Automatic Metro Map Layout Using Multicriteria Optimization. *Transactions on Visualization and Computer Graphics* v. 16, n. 1, p. 101–114. DOI: [10.1109/TVCG.2010.24](https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.24).
- Wolff, A. (2007) Drawing subway maps: A survey. Universität Karlsruhe.
- Wolff, A. e M. Nöllenburg (2011) Drawing and labeling high-quality metro maps by mixed-integer programming. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, v. 17, n. 5, p. 626–641. DOI: [10.1109/TVCG.2010.81](https://doi.org/10.1109/TVCG.2010.81).