

LOCALIZAÇÃO DE ESTAÇÕES DE COMPARTILHAMENTO DE BICICLETAS EM UMA REGIÃO UNIVERSITÁRIA NA CIDADE DE VITÓRIA/ES

Marco Antônio Farah Caldas

Universidade Federal Fluminense

Rua Passos da Pátria, 156, bloco D, sala 309, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil

mafcaldas@gmail.com

Fabio Romero Nolasco Ferreira

Universidade Federal Fluminense

Rua Passos da Pátria, 156, bloco D, sala 309, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil

fabio.romero@globo.com

Gesiane Pereira Silveira

Universidade Federal Fluminense

Rua Passos da Pátria, 156, bloco D, sala 309, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil

gesiane.silveira@gmail.com

RESUMO

Os Sistemas de Compartilhamento de Bicicletas (SCB) estão se tornando uma tendência como projetos em políticas de transportes em muitas cidades no mundo devido ao baixo custo de implementação e o menor prazo de implantação. Os SCB são uma das soluções para a priorização de meios de transportes não motorizados exigidas pela Política Nacional de Mobilidade Urbana no Brasil. Nos SCB, estações de compartilhamento de bicicletas (EB) são localizadas em vários pontos da cidade para que os usuários retirem e devolvam as bicicletas a partir de suas origens e nos seus destinos. Este artigo propõe um modelo de programação inteira binária que otimiza a quantidade, a localização das EB e a construção de ciclovias minimizando os custos totais do sistema. O modelo foi testado em uma região universitária na cidade de Vitória/ES. Doze potenciais locais candidatos a EB são analisados para suprir a demanda de doze origens e três destinos. Como resultado, seis locais são escolhidos para a localização das EB e 13.337 metros de ciclovias construídas.

PALAVRAS-CHAVE: mobilidade urbana, compartilhamento de bicicletas, localização

ABSTRACT

The Bike-Sharing Systems (BSS) are becoming a trend as transport policies in many cities in the world due to low cost of implementation and shorter implementation period as advantages for urban mobility. The BSS is one of the solutions for prioritizing non-motorized transportation required by the National Policy on Urban Mobility in Brazil. In the BSS, bicycle stations (BS) are located at various points of the city so that users can pick-up and drop-off the bikes from their origins and to their destinations. This paper proposes a binary integer programming model that optimizes the number, the location of BS and cycleways minimizing the total system costs. Twelve potential local candidates of BS are analyzed to meet the demand of twelve origins and three destinations. As a result, six sites are chosen for the location of the BS and 13,337 meters of built bike paths.

KEYWORDS: mobility, bike, localization

1. Introdução

O uso da bicicleta como um modo de transporte para fins de deslocamentos urbanos, não apenas como lazer, tem se tornado uma opção real em muitas cidades. A bicicleta é um dos principais modos de comutação entre o transporte coletivo e os destinos/origens. Diante de vias cada vez mais congestionadas pelos modos de transportes motorizados e suas altas emissões de gases na atmosfera, o uso da bicicleta, em deslocamentos de curta distância, é uma solução para uma mobilidade urbana eficiente e ecológica. No Brasil, em 03 de janeiro de 2012, foram instituídas as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) pela Lei no. 12.587 (BRASIL, 2012) que define mobilidade como as condições em que se realizam os deslocamentos de pessoas e cargas no espaço urbano. A PNMU determina que sejam criadas políticas de transporte e circulação que visem um acesso amplo de toda a população ao espaço urbano e que sejam socialmente inclusivas e ecologicamente sustentáveis.

Um grande avanço proporcionado pela PNMU é a priorização dos modos de transporte não motorizados e dos serviços de transporte público coletivo sobre o transporte individual motorizado e também a integração entre os modos e serviços de transporte urbano (BRASIL, 2012). Assim, a bicicleta torna-se uma peça chave em qualquer política de mobilidade urbana. O principal meio de aumentar o uso urbano da bicicleta é através do sistema de compartilhamento.

A implantação de um Sistema de Compartilhamento de Bicicletas (SCB) faz parte das políticas disponíveis para as cidades aumentarem a oferta de transporte não motorizado. Basicamente, um SCB funciona através de estações de bicicletas (EB) localizadas em diversos pontos da cidade que servem para distribuir e coletar as bicicletas. As estações são localizadas principalmente próximas de pontos de transporte coletivos (ônibus, metrô, BRT - *Rapid Bus Transit*, etc.). O usuário vai até uma estação e retira uma bicicleta, mediante o pagamento de uma taxa, e a devolve em uma outra estação. Comparado a outros projetos de transportes, de acordo com o *Institute for Transportation and Development Policy* (ITDP, 2013), o SCB tem o baixo custo de implementação e o menor prazo de implantação como vantagens principais. Segundo o mesmo autor, o processo para planejar um SCB é dividido em três fases: estudo de viabilidade, planejamento e projeto (localização exata das estações, suas dimensões e o tipo de equipamentos e *software* necessários) e a elaboração dos planos de negócio e financeiro (modelos de geração de receitas).

Este trabalho enquadra-se na segunda fase do planejamento que é a localização das estações de bicicletas. O objetivo é definir a quantidade e a localização de estações de bicicletas, bem como a construção de ciclovias/ciclofaixas, em uma região universitária e comercial na cidade de Vitória/ES. Para tanto, um modelo matemático de programação linear inteira binária que minimize os custos totais relativos ao Sistema de Compartilhamento de Bicicletas será proposto. Os custos envolvidos referem-se ao do usuário e ao do provedor do sistema, que pode ser público ou privado.

2. Referencial teórico

O Sistema de Compartilhamento de Bicicletas vem recebendo atenção dos pesquisadores e governos devido às vantagens que o sistema traz para a mobilidade urbana e meio ambiente. DeMaio (2009) divide a evolução destes sistemas em três gerações. O *Witte Fietsen*, em Amsterdã/Holanda, deu início à primeira geração em 1965. Bicicletas pintadas de branco foram espalhadas pela cidade e os usuários as usavam e as deixavam em qualquer lugar na cidade. Em dias, o sistema entrou em colapso. A segunda geração teve início na Dinamarca, em 1991, nas cidades de Farso e Grenaa, e, em 1993, em Nakskov com um reduzido número de estações e bicicletas disponíveis. Em 1995, em Copenhague, surgiu o primeiro sistema em larga escala chamado de *Bycyklen* com várias melhorias em relação aos sistemas anteriores. Embora o programa tenha sido um sucesso, muitas bicicletas eram roubadas o que fez surgir a terceira geração de compartilhamento com um melhor rastreamento do usuário. O primeiro programa dessa geração foi o *Bikeabout*, em 1996, na Universidade de Portsmouth, Inglaterra. Nos anos seguintes, o sistema de compartilhamento teve um crescimento discreto até que, em 2005, na cidade de Lion, França, surgiu o *Velo'v* com 1.500 bicicletas sendo usadas 6,5 vezes por dia, em

média, por 15.000 usuários. Logo depois, em Paris, foi criado o *Vélib'*. Ambos se tornaram referências para os demais sistemas. Em 2010, segundo os dados do ITDP (2013), mais de 400 cidades no mundo têm um Sistema de Compartilhamento de Bicicletas com uma frota de mais de 250.000 bicicletas. Os dois maiores são o sistema *o.o* nas cidades de Hangzhou e Xangai, China. No Brasil, várias cidades como o Rio de Janeiro (Bike Rio), São Paulo (Bike Sampa), Sorocaba (Integra Bike), Salvador (Vai de Bike), Recife (Bike PE), etc. aderiram com sucesso ao SCB. No mundo, cidades como Paris (*Vélib'*), Barcelona (*Bicing*), Montreal (*Bixi*), Cidade do México (*Ecobici*) e Buenos Aires (*Mejor em Bici*) têm SCBs eficientes e com altas taxas de utilização.

O estudos sobre o uso de bicicletas nas cidades têm crescido muito nos últimos anos, segundo García-Palomares, Gutiérrez e Latorre (2012), embora grande parte seja relacionando à segurança e ao comportamento dos usuários de bicicletas em ciclovias/ciclofaixas. Com relação ao projeto e dimensionamento dos SCB, ainda existe pouca literatura, como enfatizam Lin e Yang (2011). Alguns exemplos de estudos são dados a seguir. Frade e Ribeiro (2014) criaram uma metodologia para relacionar a demanda dos SCB com as características da cidade (clima, relevo, etc.) e das viagens (distância). Um modelo de otimização para o projeto de um SCB em cidades pequenas foi proposto por Sayarshad, Tavassoli e Zhao (2012) que determina o tamanho mínimo da frota de bicicletas que minimiza simultaneamente a demanda não atendida nas estações, as bicicletas ociosas e a transferência de bicicletas entre as estações. Alguns autores usam o Sistema de Informação Geográfica (SIG) como ferramenta para auxiliar o planejamento dos SCBs. Rybarczyk e Wu (2010) aplicaram o SIG em conjunto com uma análise multicritério para a otimização da infraestrutura do sistema e García-Palomares, Gutiérrez e Latorre (2012) também usaram o SIG como um método para calcular a distribuição espacial da demanda, localização e capacidade das estações de bicicletas.

Outros autores usam métodos de pesquisa operacional para a otimização dos SCB. Lin e Yang (2011) propõem um modelo de programação inteira para determinar o número e a localização das estações de bicicletas que minimiza o custo total do sistema levando em consideração o interesse de ambos os lados: o usuário e o investidor. Em outro estudo, Lin, Yang e Chang (2013) criam um modelo não-linear de otimização que propicia uma visão integral das decisões que devem ser tomadas no dimensionamento de um SCB, tais como a quantidade e a localização das estações de bicicletas, a seleção da rota para a construção das ciclovias/ciclofaixas entre as origens e os destinos e também o gerenciamento do estoque de bicicletas. Shu *et al.* (2013) desenvolveram um modelo que usa a estimativa da demanda entre as estações de bicicletas em cada período de tempo para prever o fluxo de bicicletas dentro da rede do SCB e estimar o número de viagens que o sistema pode suportar. Chemla, Meunier e Calvo (2013) formularam um modelo NP-completo para o rebalanceamento da distribuição das bicicletas após o uso.

Os problemas de localização/cobertura de *hubs* podem ser usados nos problemas de localização de estações de bicicletas. Os modelos de localização-alocação de *hub-spoke* envolvem terminais de consolidação (*hubs*) e instalações físicas (lojas) que são alocadas aos *hubs* que servem de pontos de transbordo/conexão, o que é bastante similar com o SCB. Desde o trabalho de O'Kelly (1986), segundo Lin, Yang e Chang (2013), o problema de localização de *hub* se estendeu para várias outras aplicações.

De uma forma geral com relação ao projeto de um SCB, o ITDP (2013) recomenda que as características comuns aos sistemas de maiores sucessos sejam seguidas, embora não há um modelo único e cada cidade tenha suas especificidades. São comuns uma rede densa de estações na área de cobertura e com um espaçamento médio de 300 metros entre elas, bicicletas confortáveis, sistema automático de travamento nas estações que permita aos próprios usuários retirar e devolver as bicicletas, sistema de rastreamento sem fio que localize onde a bicicleta foi retirada e devolvida e o usuário. Também, disponibiliza informações em tempo real do quantitativo de bicicletas em cada estação para os usuários através de canais como internet, celulares, etc..

A Holanda é um dos países mais bem sucedido no uso do SCB. A introdução desse sistema em estações de trem, de acordo com Martens (2007), resultou em uma pequena redução

no uso de carro e crescimento das viagens por trem. Programas para estimular o uso combinado de bicicleta e ônibus resultaram também em um aumento no uso da bicicleta, do ônibus e uma maior demanda dos usuários que usavam o ônibus de forma infrequente.

A localização das estações é fundamental para assegurar o amplo uso do sistema e a rotatividade das bicicletas. O mesmo ITDP (2013) define como critérios de escolha dos pontos de instalação das estações a proximidade com paradas e estações de transporte público, ao longo de ciclovias já existentes ou em ruas seguras e acessíveis às bicicletas, priorização de esquinas para a acessibilidade aos usuários vindos de várias direções e locais com uma mistura diversificada de usos residenciais e comerciais para garantir usuários em todos os horários do dia.

3. Formulação do modelo de localização de estações de compartilhamento de bicicletas

O modelo para localização das estações de compartilhamento de bicicletas usado nesse artigo é uma adaptação do modelo proposto por Lin e Yang (2011). No modelo original, os autores incluem os custos de manutenção do estoque de bicicletas nas EB, bem como o estoque de segurança devido à incerteza da demanda. O modelo usado nesse artigo, como forma de simplificação, não considera esses custos.

O problema estudado pode ser assim descrito: dados um conjunto de origens, destinos, locais candidatos a instalar estações de bicicletas (EB) e a demanda entre as origens e os destinos, deve-se determinar o número e a localização das EB que minimize os custos totais do Sistema de Compartilhamento de Bicicleta (SCB). Considerando que os SCB são projetados para a comutação do usuário com os outros modos de transportes, a utilização do sistema, no modelo proposto, é que o usuário caminhe da origem (pontos de parada de ônibus, trem, metrô, BRT - *Bus Rapid Transit*, etc.) até uma EB próxima e retire uma bicicleta e pedale até uma EB próxima o destino para devolvê-la e depois caminhar até o seu destino. Considera-se que o retorno dos usuários é feito pelo mesmo caminho de ida.

Os custos envolvidos no modelo podem ser classificados em dois tipos: o custo do usuário do sistema e o custo do provedor do SCB. Os custos do usuário são o de andar da origem até a EB de retirada e da EB de devolução até o destino e o custo de pedalar entre as EB de origem e de destino. Os custos do provedor do sistema são o de construir e manter as EB e da construção das ciclovias e ciclofaixas que ligam as EB.

A formulação matemática do modelo é apresentada a seguir, bem como a definição das variáveis de decisão e dos parâmetros de entrada.

$$\begin{aligned}
 \text{Min } \alpha \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} d_{ik} \sum_{l \in K} \sum_{j \in J} Y_{iklj} \lambda_{ij} + \beta \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} d_{kl} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{iklj} \lambda_{ij} \\
 + \gamma \sum_{l \in K} \sum_{j \in J} d_{lj} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} Y_{iklj} \lambda_{ij} + \sum_{k \in K} f_k X_k \\
 + \sum_{k \in K} \sum_{l \in K} c_{kl} Z_{kl} \tag{1}
 \end{aligned}$$

Sujeito a

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in K, l \neq k} Y_{iklj} = 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{2}$$

$$2Z_{kl} \leq X_k + X_l \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{3}$$

$$Z_{kk} = 0 \quad \forall k \in K \tag{4}$$

$$Y_{iklj} \leq Z_{kl} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall l \in K, \forall j \in J \tag{5}$$

$$Y_{iklj} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall l \in K, \forall j \in J \tag{6}$$

$$X_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K \tag{7}$$

$$Z_{kl} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall l \in K \tag{8}$$

Onde os subscritos denotam

$i \in I$ denota as origens

$j \in J$ denota os destinos

$k, l \in K$ denotam os candidatos a estações de bicicletas de retirada e entrega

E as variáveis de decisão são

X_k igual a 1 se a estação de compartilhamento de bicicleta k é aberta; e 0 caso contrário

Y_{iklj} igual a 1 se a demanda da origem i para o destino j viaja da estação de compartilhamento de bicicleta k para a l , nessa sequência; e 0 caso contrário

Z_{kl} igual a 1 se uma ciclovia/ciclofaixa é necessária para conectar as estações de compartilhamento de bicicleta k e l ; e 0 caso contrário

E os parâmetros de entrada são

λ_{ij} é a demanda de viagem anual, em determinado período de tempo, da origem i para o destino j

d_{ik} é a distância entre a origem i e a estação de compartilhamento de bicicleta k , em metros

d_{kl} é a distância entre a estação de compartilhamento de bicicleta k e a estação de compartilhamento de bicicleta l , em metros

d_{lj} é a distância entre a estação de compartilhamento de bicicleta l e o destino j , em metros

α é o custo unitário de uma pessoa ir da origem até uma estação de compartilhamento, em $\$/metro$

β é o custo unitário de uma pessoa pedalar da estação de compartilhamento de bicicleta de origem até a de devolução, em $\$/metro$

γ é o custo unitário de uma pessoa andar da estação de compartilhamento de entrega até o destino, em $\$/metro$

f_k é o custo fixo de localizar uma estação de compartilhamento em k , em $\$$

c_{kl} é o custo de construção de uma ciclovia/ciclofaixa da estação entre as estações de compartilhamento k e l , em $\$$; igual a 0 se já existe uma ciclovia/ciclofaixa entre as estações de compartilhamento k e l

Pela formulação matemática, o modelo é de programação linear inteira binária. A função objetivo (eq. 1) minimiza os custos relacionados ao sistema de compartilhamento de bicicletas públicas e é composta de cinco termos: o primeiro termo é a soma dos custos da viagem a pé das origens até as estações de compartilhamento onde o usuário retira a bicicleta; o segundo é a soma dos custos de pedalar entre as estações de bicicleta de retirada e de entrega; o terceiro é o somatório dos custos do usuário andar da estação de bicicleta de entrega para o destino; o quarto termo é composto do somatório dos custos de instalar a estação de compartilhamento de bicicleta; e o último termo são os custos relacionados à construção de ciclovias/ciclofaixas entre as estações de compartilhamento (ECB).

O problema tem sete restrições: a primeira (eq. 2) assegura que toda demanda entre as origens e os destinos seja atendida; a segunda (eq. 3) e a terceira (eq. 4); a eq. 5; e as últimas restrições (eq. 6, 7 e 8) são os requerimentos de integralidade para as variáveis de localização das estações de bicicletas e das ciclovias/ciclofaixas.

4. Aplicação do modelo de localização de estações de compartilhamento de bicicletas

O modelo proposto foi aplicado em uma pequena região do município de Vitória, capital do estado do Espírito Santo. Essa região compreende dois bairros (Jardim da Penha e Mata da Praia) e caracteriza-se por ter um grande fluxo de pessoas que se destinam à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e a um *shopping center* de médio porte com lojas, consultórios médicos e cinema.

As origens do modelo foram definidas nos pontos de parada de ônibus que existem ao longo da orla da praia de Camburi. E os destinos escolhidos foram a UFES e o shopping center. A UFES situa-se no lado oposto à orla e, para acessá-la, os passageiros que utilizam as linhas que

passam pela orla devem saltar na orla e pegar outra linha de ônibus que passa internamente nos bairros. Com as estações de compartilhamento de bicicletas (EB), os passageiros poderão fazer a comutação e acessar a universidade por bicicleta. Essa opção reduziria a frequência e a lotação das linhas internas do bairro, propiciando um menor impacto na emissão de gases na atmosfera e também melhorias no trânsito local. O mesmo acontece com o shopping center que fica localizado no interior da região estudada. Desta forma, o modelo tem treze (13) origens (pontos de ônibus) e três (03) destinos, sendo um (01) o *shopping center* e dois (02) localizados na UFES em seus pontos extremos devido a extensa área universitária.

Foram escolhidos doze (12) locais como potenciais candidatos à estações de compartilhamento de bicicletas (EB), seis (06) como locais de retirada e seis (06) como devolução das bicicletas. Como todas as origens estão na orla, os potenciais locais selecionados para as EB de retirada também situam-se ao longo da orla, mas entre esquinas de ruas para que o acesso seja melhor. Os potenciais locais para devolução foram definidos três (03) para o shopping center e três (03) para a universidade de forma a cobrir usuários vindos de todas as direções.

As distâncias entre as origens e as EB de retirada e entre as EB de devolução e os destinos são mostradas na tabela 1 e 2, respectivamente. Já na tabela 3 são mostradas as distâncias entre as EB de retirada e de devolução. As ciclovias/ciclofaixas deverão ser construídas entre essas EB, caso as estações sejam selecionadas no modelo. As distâncias foram obtidas usando o mapa georeferenciado HERE MAPS (2014). As rotas que os usuários fazem a pé (origem/EB de retirada e EB de devolução/destino) foram calculadas usando o modo andar e as rotas entre as EB de retirada e de devolução utilizando o modo carro considerando que o usuário irá pedalar pelas vias de melhor acesso e menor distância.

Tabela 1 - Distâncias entre as Origens (i) e as EB de retirada (k), em metros

	$k1$	$k2$	$k3$	$k4$	$k5$	$k6$
$i1$	9	617	940	1341	1579	2042
$i2$	192	454	776	1167	1412	1883
$i3$	475	150	473	874	1112	1575
$i4$	603	127	361	752	986	1472
$i5$	735	107	212	613	851	1314
$i6$	886	264	227	467	701	1187
$i7$	1100	518	217	220	448	934
$i8$	1200	593	270	127	365	851
$i9$	1574	755	432	34	203	686
$i10$	1574	926	607	209	39	525
$i11$	1874	1276	915	517	315	282
$i12$	1845	1200	893	492	254	226
$i13$	2151	1503	1208	767	526	42

Fonte: Here Maps (2014)

Tabela 2 - Distâncias entre as EB de devolução (l) e os Destinos (j), em metros

	$j1$	$j2$	$j3$
$l1$	75	2770	2380
$l2$	54	2680	2395
$l3$	114	2745	2529
$l4$	2481	385	408
$l5$	1614	845	941
$l6$	2502	476	509

Fonte: Here Maps (2014)

Tabela 3 - Distâncias entre as EB de retirada (k) e as EB de devolução (l), em metros

	$l1$	$l2$	$l3$	$l4$	$l5$	$l6$
$k1$	556	435	531	2215	2278	2314
$k2$	505	501	335	1721	1589	1812
$k3$	828	824	658	1731	1628	1807
$k4$	1184	1252	1114	1934	1711	1894
$k5$	1484	1452	1314	2134	1911	2094
$k6$	1984	1952	1814	2634	2411	2594

Fonte: Here Maps (2014)

Como não existem estudos de previsão de demanda para o modo bicicleta na cidade de Vitória, a demanda entre as origens e os destinos foram definidas com base no número médio de passageiros por viagem e a frequência nas linhas que operam nas rotas internas da região que servem como ligação entre os usuários que utilizam as linhas de ônibus da orla (origem) para os destinos (UFES e *shopping center*). De acordo com a CETURB (2014), no mês de março de 2014, 49 passageiros por viagem utilizaram as linhas, em média. Estimou-se que na hora de pico, 80% desse passageiros destinavam-se à UFES e 10% ao shopping center. Considerou-se que a demanda é nos dias úteis da semana, portanto 260 dias no ano. A próxima etapa do estudo aqui apresentado será a previsão de demanda pelo modo bicicleta na matriz de origem e destino da cidade de Vitória/ES.

E finalmente, os custos de entrada do modelos foram estimados. O custo de instalar uma estação de compartilhamento de bicicleta incluem os ativos (bicicletas, posições de engate de travamento, componentes do sistema de TI, manutenção, etc.) requerem grande investimento de capital, de acordo com o ITDP (2013). Com os dados fornecidos pelo mesmo ITDP, estima-se que cada uma das estações de bicicletas terão um custo médio de R\$ 250.000,00 incluindo os equipamentos, instalação, início de operação e manutenção e limpeza. Os demais custos foram adaptados de Lin e Yang (2011) que definiram que a taxa entre o custo unitário de andar até a estação e o custo unitário de pedalar entre as estações deverá estar em torno de R\$ 5,00. Sendo de R\$ 10,00 por quilometro o custo unitário de pedalar entre as estações (incluindo a taxa cobrada pelo uso do sistema), o custo unitário por quilometro para andar até as estações seria de R\$ 2,00. Os custo do metro linear de se construir uma ciclovia, segundo um estudo da AEERJ (2014), é entre R\$ 109,00 e 160,00.

O modelo de otimização proposto pode ser resumido como: 12 origens ($i1$ a $i12$) localizadas nos pontos de ônibus da orla da região, 03 destinos ($j1$, o shopping center e $j2$ e $j3$, a UFES nas suas extremidades), 06 pontos candidatos à estação de bicicleta de retirada ($k1$ a $k6$) e 06 pontos candidatos à estação de bicicleta de devolução ($l1$ a $l6$). O modelo foi resolvido usando o *solver* do Excel 2010 para programação linear inteira.

O resultado da otimização recomendou que fossem abertas quatro (04) EB de retirada ($k1$, $k3$, $k5$ e $k6$) dentre as seis (06) estações candidatas e duas (02) EB de devolução ($l2$ e $l4$) dentre as outras seis (06) candidatas. Assim, são necessárias oito (08) ciclovias/ciclofaixas ligando as EB de retirada e de devolução.

A figura 1 ilustra a solução ótima. Pode-se observar que para o destino *shopping center* ($j1$) todas as rotas convergem para a EB de devolução $l2$ e para os dois destinos localizados na UFES, a EB de devolução $l4$ é o *hub*. Os usuários das origens $i1$ e $i2$ usam a EB $k1$, os usuários das origens $i4$ a $i9$ usam a EB $k3$ e os das origens $i10$ a $i11$ acessam seus destinos pela EB $k5$ e a EB $k6$ é utilizada apenas pelos viajantes da origem $i13$.

A única origem que utiliza duas EB de retirada ($k1$ para o destino $j1$ e $k3$ para os destinos $j2$ e $j3$) é a origem $i3$, rota em tracejado na figura 1. As demais origens acessam o sistema de compartilhamento sempre através de apenas uma EB de retirada.

As oito (08) ciclovias/ciclofaixas necessárias para interligar as EB de retirada e de devolução, representadas na figura 1 com uma espessura maior, correspondem a 13.337 metros de construção.

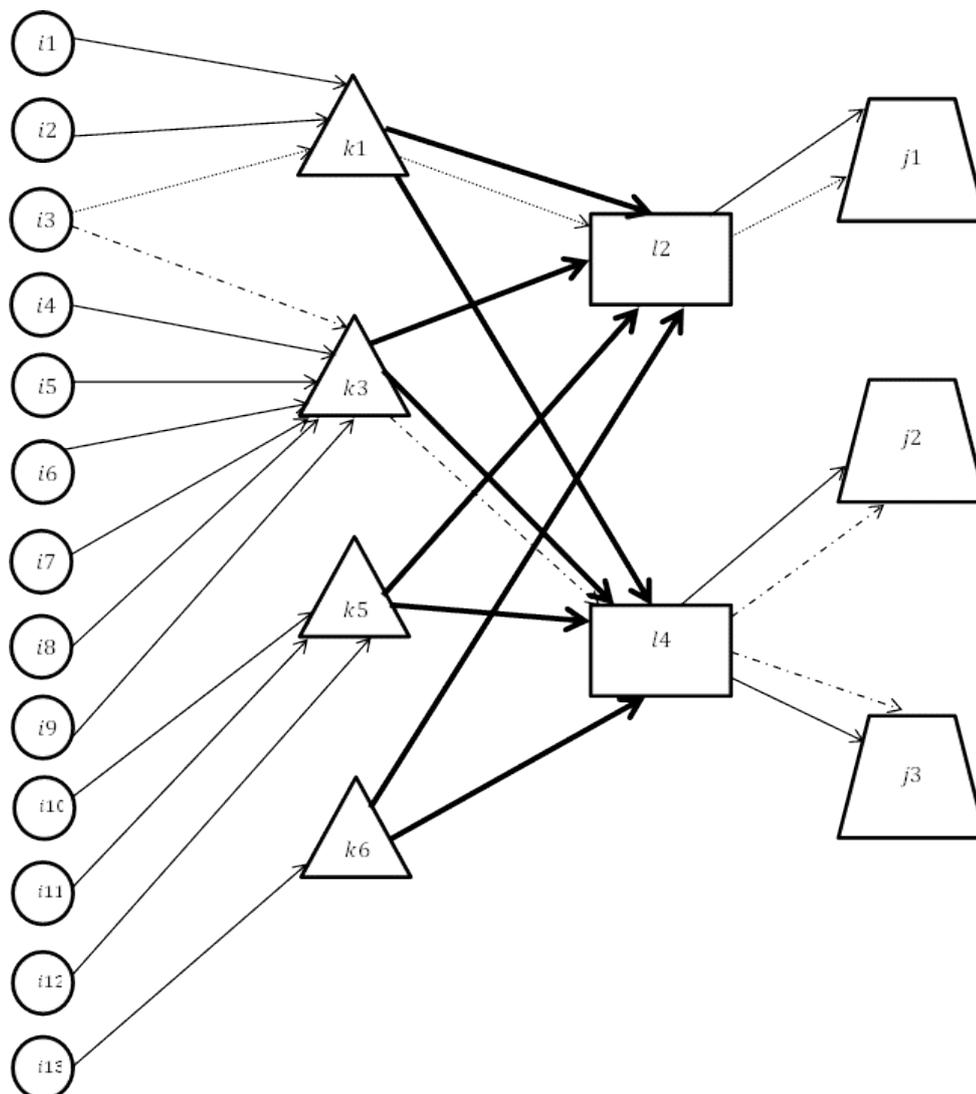


Figura 1 - Solução ótima do modelo de localização

5. Considerações finais

O uso da bicicleta como um modo de transporte tem sido uma solução para uma mobilidade urbana que garante acesso de toda a população ao espaço urbano de forma socialmente inclusiva e ecologicamente sustentável. O Sistema de Compartilhamento de Bicicletas (SCB) proporciona fácil acesso à utilização da bicicleta de uma forma economicamente viável e fácil de implementar.

O modelo proposto nesse artigo otimizou a quantidade, a localização e a construção de ciclovias/ciclofaixas em uma pequena região da cidade de Vitória/ES. O modelo proposto minimiza os custos totais de um SCB com foco no usuário e no provedor do serviço. A partir da demanda de 12 origens localizadas em ponto de ônibus da orla da região, 06 potenciais locais foram estudados para serem EB de retirada e 06 de devolução para 03 destinos localizados na Universidade Federal do Espírito Santo e um *shopping center*.

Como resultado, 04 locais foram escolhidos para serem pontos de retirada das bicicletas e 02 para devolução. Esse resultado faz com que sejam necessárias 08 ciclovias/ciclofaixas interligando as estações, o que dá 13.337 metros de construção.

Como sugestão de trabalhos futuros, a determinação da demanda do modo bicicleta na matriz de transportes das cidades é fortemente recomendado. Pouca bibliografia foi encontrada tratando do assunto. Uma outra sugestão é o uso de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a escolha dos potenciais candidatos à estação de compartilhamento, antes da aplicação do modelo de otimização. O uso do SIG pode proporcionar uma melhor cobertura das áreas mais densas de população na cidade. Também sugere-se que se incorpore ao modelo de programação linear proposto gerenciamento do estoque de bicicletas ao longo do tempo nas estações de bicicletas, isto é, o nível de serviço no atendimento da demanda.

Referências

AEERJ - Associação das Empresas de Engenharia do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.aeerj.net.br/default.asp>>. Acesso em: 23 abr. 2014.

BRASIL. Lei no. 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 4 jan. 2012.

CETURB - Companhia de Transportes Urbanos da Grande Vitória. Disponível em: <<http://www.ceturb.es.gov.br/default.asp>>. Acesso em: 20 abr. 2014.

CHEMLA, D.; MEUNIER, F.; WOLFLER CALVO, R. Bike sharing systems: Solving the static rebalancing problem. **Discrete Optimization**, v. 10, n. 2, p. 120–146, maio 2013.

DEMAIO, P. Bike-sharing: History, impacts, models of provision, and future. **Journal of Public Transportation**, v. 12, p. 41–56, 2009.

FRADE, I.; RIBEIRO, A. Bicycle Sharing Systems Demand. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 111, p. 518–527, fev. 2014.

GARCÍA-PALOMARES, J. C.; GUTIÉRREZ, J.; LATORRE, M. Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach. **Applied Geography**, v. 35, n. 1-2, p. 235–246, nov. 2012.

HERE MAPS. Disponível em: <<http://here.com/>>. Acesso em: 28 abr. 2014.

ITDP. **The Bike-Share Planning Institute for Transportatio & Development Policy.** NY: Institute for Transportation & Development Policy, 2013.

LIN, J.; YANG, T. Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 47, n. 2, p. 284–294, mar. 2011.

LIN, J.-R.; YANG, T.-H.; CHANG, Y.-C. A hub location inventory model for bicycle sharing system design: Formulation and solution. **Computers & Industrial Engineering**, v. 65, n. 1, p. 77–86, maio 2013.

MARTENS, K. Promoting bike-and-ride: The Dutch experience. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 41, n. 4, p. 326–338, 2007.

O'KELLY, M. E. The Location of Interacting Hub Facilities. **Transportation Science**, v. 20, n. 2, p. 92–106, 1986.



RYBARCZYK, G.; WU, C. Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis. **Applied Geography**, v. 30, n. 2, p. 282–293, abr. 2010.

SAYARSHAD, H.; TAVASSOLI, S.; ZHAO, F. A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, n. 10, p. 4944–4951, out. 2012.

SHU, J. *et al.* Models for effective deployment and redistribution of bicycles within public bicycle-sharing systems.(Report). **Operations Research**, v. 61, n. 6, p. 1346, 2013.