

FATORES CRÍTICOS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE BICICLETAS PARTILHADAS: REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Mohammad Sadegh Bahadori¹, Alexandre Bacelar Gonçalves², *Filipe Moura*³

¹ Engenheiro Civil, CERIS, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa, Aluno de doutoramento em Sistemas de Transportes; Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal, Telefone: 218418371, e-mail: sadegh.bahadori@tecnico.ulisboa.pt

² Doutorado em Engenharia do Território, CERIS, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa, Professor Auxiliar; Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal, Telefone: 218418329, e-mail: alexandre.goncalves@tecnico.ulisboa.pt

³ Doutorado em Sistemas de Transportes, CERIS, Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa, Professor Associado; Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal, Telefone: 218418371, e-mail: fmoura@tecnico.ulisboa.pt

Sumário

Este artigo tem como objetivo caracterizar os fatores críticos na operação de sistemas de bicicleta partilhada (SBP), no sentido de melhor identificar os principais problemas dos sistemas atuais e as estratégias adotadas para superá-los. Através de uma revisão da literatura abrangente relacionada com a temática de operação dos SBP, foram compilados e analisados 103 artigos. Os resultados mostram que o desequilíbrio dos sistemas é a questão mais crítica para o desempenho dos SBP. A previsão rigorosa da procura destes sistemas, bem como os modelos de reequilíbrio dinâmico, podem reduzir a gravidade deste problema. Destaca-se também a falta de estudos sobre sistemas mistos de bicicletas elétricas e convencionais ou que operem em locais de topografia acidentada.

Palavras-chave: Sistemas de bicicletas partilhadas (SBP); Estratégias de reequilíbrio; Mobilidade urbana sustentável; Bicicletas elétricas.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A maioria dos sistemas de bicicletas partilhadas (SBP) atuais operam num esquema baseado em estações de docas. Um SBP baseado em docas pode ser definido como um serviço que oferece bicicletas para mobilidade individual, para períodos de utilização curtos, de forma gratuita ou paga. Este tipo de SBP tem um conjunto de estações de docas que são distribuídas pela cidade (a sua distribuição depende de uma variedade de critérios) e cada estação tem um número fixo de docas. Usualmente, os clientes pegam e entregam as bicicletas de/para qualquer estação da rede, geralmente através de uma aplicação móvel que serve como uma interface para a gestão do sistema com o utilizador. Tipicamente, a aplicação controla a transação de cada cliente, para possibilitar uma eventual cobrança pelo serviço com base na duração da viagem (por exemplo).

Nos últimos anos, os SBP têm sido adotados em várias cidades para promover o transporte ativo para viagens de curta distância ou procurando contribuir para a resolução do problema da “última etapa” das viagens multimodais, antes de chegar ao destino (*last mile*). Há muitos benefícios bem conhecidos associados ao uso de SBP, tal como a flexibilidade do transporte, a capacidade de se ligar a outros modos de transporte, a redução do congestionamento, do consumo de combustível, das emissões de CO₂ e de poluentes atmosféricos, da poluição sonora, e o aumento dos benefícios físicos e emocionais para a saúde humana, para a economia pessoal dos

indivíduos, considerando o custo reduzido da utilização assim como o deixar de ter responsabilidades associadas à propriedade do veículo. Contudo, os SBP têm vários desafios operacionais.

A dinâmica de utilização das bicicletas partilhadas tem um impacto muito significativo na distribuição de bicicletas em cada SBP, ao longo do dia. Frequentemente, as bicicletas acumulam-se nas estações de algumas zonas da cidade, numa parte do dia, deixando outras zonas da cidade sem bicicletas. Esta questão provoca um desequilíbrio no sistema com consequências negativas para a satisfação do utilizador, ao ponto de alguns utilizadores poderem abandonar o sistema se o problema for frequente e persistir. Como tal, o rebalanceamento do sistema, ou seja, deslocar as bicicletas das estações cheias para as estações vazias, para melhor satisfazer a procura, é fundamental para o desempenho dos SBP. A literatura é abundante na procura de definir métricas, métodos e estratégias de rebalanceamento e procurar superar este desafio. O presente artigo apresenta uma análise da evolução dos SBP, com um foco particular no problema do rebalanceamento destes sistemas.

1.2 As origens dos SBP

As "White Bikes", um SBP gratuito sem estações (em Inglês, "dockless" ou "freefloat"), foram introduzidas para melhorar o tráfego não motorizado em Amsterdão em 1965 [1]. Essa primeira geração de SBP entrou em colapso devido à falta de estratégias de gestão e ao comportamento inadequado dos utilizadores. Uma segunda geração de SBP nasceu em 1991 na Dinamarca e foi caracterizada pela possibilidade de seus utilizadores pegarem e devolverem bicicletas em locais específicos usando um sistema de pagamento com moedas nas bicicletas. Embora em comparação com a geração anterior houvesse estações no sistema e uma organização sem fins lucrativos para operá-lo, muitas bicicletas foram roubadas, uma vez que os sistema não previa uma subscrição do utilizadores e gozavam de anonimato [1]. Assim, uma terceira geração, surgida em 1996 na Inglaterra, foi concebida para minimizar o impacto da má utilização do sistema, registando os utilizadores através de cartões bancários, necessários para alugar uma bicicleta. A terceira geração teve um enorme impacto no desenvolvimento do SBP em diferentes países. A terceira geração de SBP mais conhecida é a "Vélib" em Paris, França [2]. Com o avanço da tecnologia, surgiu a quarta geração, em que a interface entre o sistema e os utentes é realizado através de um aplicativo móvel e conectadas a um sistema integrado que fornece informações em tempo real [3]. A maioria dos SBP em operação são da quarta geração e são conhecidos como SBP baseados em estações (em Inglês "station-based bike-sharing systems").

No início de 2017 [4], uma quinta geração de SBP, caracterizada por ser "sem estação" ou "sem doca", surgiu na China ao reutilizar a filosofia da primeira geração combinada com a tecnologia da informação usada na quarta geração. Nesse último tipo de sistemas, toda a área em que o serviço é lançado é dividida em zonas mais pequenas, nas quais a circulação interna é permitida. O número de zonas e a área de cada uma dependem de fatores como a procura e as condições ambientais. A principal diferença entre esta geração e os SBP baseados em estações é a ausência de estações de ancoragem, o que facilita a sua utilização pelo público em geral, uma vez que os utilizadores podem encontrar a bicicleta mais próxima disponível com o seu dispositivo móvel e iniciar a sua viagem, sem terem de se deslocar até a uma estação de bicicletas (que muitas vezes não existem na proximidade do utilizador). Este processo é de fácil utilização uma vez que, tipicamente, neste modelo de negócio, o operador tem capacidade de gestão de grandes quantidades de dados (termo conhecido em Inglês como "Big Data") e monitoriza continuamente a distribuição das bicicletas na cidade. Alguns dos principais desafios desta geração incluem uma maior probabilidade e frequência de episódios de vandalismo, danos ou roubo de bicicletas, mas também a necessidade de equilibrar a oferta dentro das zonas, especialmente em zonas mais remotas em rareiam parques de estacionamento para bicicletas (embora a maior parte destes sistemas tenha cadeados incorporados nas bicicletas).

É previsível que num futuro próximo os SBP beneficiarão de avanços tecnológicos e ideias da comunidade científica para minimizar estes aspetos negativos. Existem projetos-piloto de bicicletas autónomas [5], estações de ancoragem móveis [6], estações de energia solar com bicicletas elétricas [7] e quiosques para aluguer de baterias para bicicletas elétricas [8].

1.3 Objetivo e estrutura do artigo

Este artigo faz uma revisão vasta da literatura no sentido de identificar os principais fatores que afetam o bom desempenho dos SBP. Assim, o principal objetivo é caracterizar os fatores críticos no funcionamento dos SBP, a fim de melhor encontrar e compreender os principais problemas dos sistemas atuais e as estratégias adotadas para superá-los.

O artigo está organizado em torno dos temas analisados. A próxima secção define a metodologia do artigo. Os fatores relacionados aos problemas de desequilíbrio são descritos na secção 3. Esta secção descreve o papel dos componentes do sistema, nomeadamente "Utilizadores", "Ambiente" e "Sistema", na estrutura dos SBP, de forma genérica. Para este último componente, os fatores foram organizados em subcomponentes denominados "Infraestrutura", "Bicicletas", "Operador" e "Estratégias de gestão". A secção 4 detalha os desafios associados ao utilizador e ao contexto de utilização. A secção 5 analisa os desafios associados ao sistema do SBP. A última secção resume as principais conclusões.

2 METODOLOGIA

Para selecionar a literatura relevante e proceder a uma revisão abrangente das estratégias de reequilíbrio dos SBP, foi realizada uma estratégia de pesquisa da literatura em três etapas: (i) busca nas bases de dados *online*, (ii) triagem de artigos e (iii) refinamento e análise final. Para cobrir as duas primeiras etapas, foi aplicado um procedimento sistemático de busca e seleção dos artigos selecionados. Os artigos relevantes foram recolhidos nas bases de dados Scopus, Web of Knowledge e Google Scholar, utilizando os termos "bike sharing system", "bicycle rebalancing" e "bike rebalancing", realizados entre julho e dezembro de 2018. Numa segunda etapa de triagem, os títulos, as palavras-chave e os resumos foram verificados para garantir que os artigos fossem relevantes para os objetivos do estudo e, consequentemente, foram selecionados 103 artigos no fim do processo. Na escolha dos artigos finais, foi feita uma seleção dos artigos mais abrangentes que apresentavam inovações (por exemplo, novos modelos, estratégias para reequilíbrio ou soluções práticas). Em seguida, foi elaborado um resumo abrangente das informações.

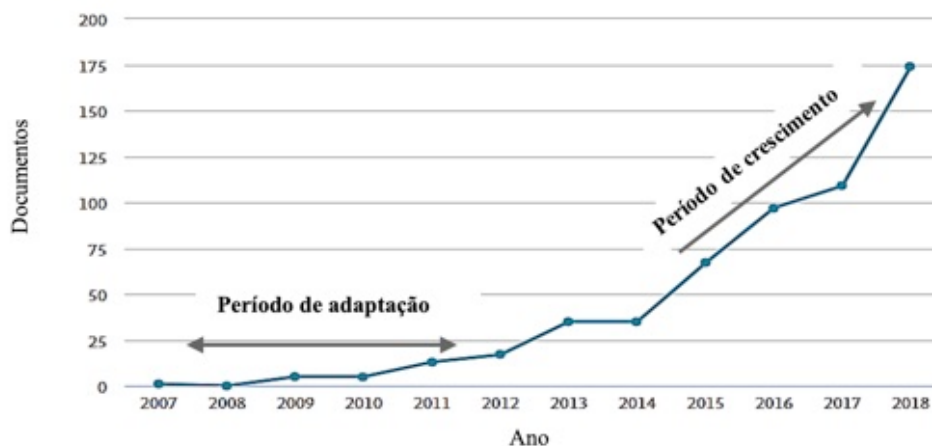


Figure 1. Evolução da recolha de documentos no Scopus (palavras chave: "bike sharing system")

A Fig. 1 mostra o crescimento do número de documentos indexados na base de dados Scopus para o período de 2007 a 2018. É perceptível que, num primeiro período (antes de 2014), os documentos com a palavra chave "bike sharing system" cresceram lentamente enquanto tópico científico específico. Desde 2014, quando 855 cidades já tinham um SBP a operar [2], ocorreu um aumento significativo no número de publicações com esta palavra chave. Vários estudos focaram os problemas relacionados com a infraestrutura dos SBP, com a segurança das ciclovias [6], a otimização da localização das estações [9, 10] e o dimensionamento da frota [11], enquanto outros estudos abordaram problemas relacionados com as estratégias de gestão [12, 13, 14]. Ao redistribuir as bicicletas de acordo com as necessidades dos utilizadores, as estações ou zonas da cidade podem tender a ficar cheias ou vazias durante o tempo de operação. O reequilíbrio do sistema incorpora algumas das mais conhecidas estratégias de gestão para lidar com esse problema [15, 16].

A revisão da literatura foi seguida da identificação e sistematização dos fatores críticos que afetam o desempenho dos SBP no que se refere ao problema do desequilíbrio do sistema. Propõe-se um modelo hierárquico estruturado que engloba os fatores mencionados na literatura e é apresentado na próxima secção.

3 SISTEMATIZAÇÃO DOS FATORES DE DESEQUILÍBRIO DOS SBP

É necessário dispor de uma estratégia de gestão adequada para reequilibrar as bicicletas num BSS, tanto nas redes baseadas em estações como nas redes sem docas. O reequilíbrio estático, o reequilíbrio dinâmico e o preço dinâmico são os modelos de reequilíbrio mais utilizados. Todos eles requerem modelos de previsão de procura para obter um melhor desempenho. Fig. 2 ilustra os principais fatores que podem criar problemas relacionados com o desequilíbrio nos SBP que podem ser sistematizados nas 3 componentes principais do sistema: "Utilizadores", "Contexto de utilização" e "Sistema".

A categoria "Utilizadores" abrange todos os fatores relacionados com a forma de utilização do sistema que têm um impacto sobretudo no desempenho da rede (pese embora tivessem tido um grande impacto negativo nas primeiras gerações de SBP, como referido anteriormente); o "Contexto de utilização" inclui os aspetos físicos externos que influenciam a utilização do sistema; e o "Sistema" incorpora os fatores que são controlados ou definidos pelo operador do sistema, nomeadamente a infraestrutura, os fatores relacionados com a bicicleta e as estratégias de gestão.

A escolha dos fatores que configuram o componente "Sistema" depende dos outros dois componentes. Isto significa que o desempenho do "Sistema" varia de acordo com o "Contexto de utilização" (i.e., em função da cidade, do seu urbanismo, da cultura vigente, entre outros aspetos) e as características dos "Utilizadores". Portanto, o "Sistema", que pode ser organizado em quatro partes ("Infraestrutura", "Bicicletas", "Operador" e "Estratégias de Gestão"), tem que se adaptar às duas categorias anteriores. Esta adaptação é importante para ter um sistema eficiente e um alto nível de satisfação do utente. No componente "Sistema", as estratégias de gestão desempenham um papel importante porque incorporam as estratégias de previsão de procura e reequilíbrio que são críticas para o funcionamento dos SBP. Os 103 artigos selecionados na revisão de literatura sobre o reequilíbrio dos sistemas de bicicletas partilhadas podem seguir uma das três estratégias identificadas na Fig.2: preço dinâmico, reequilíbrio estático e reequilíbrio dinâmico.

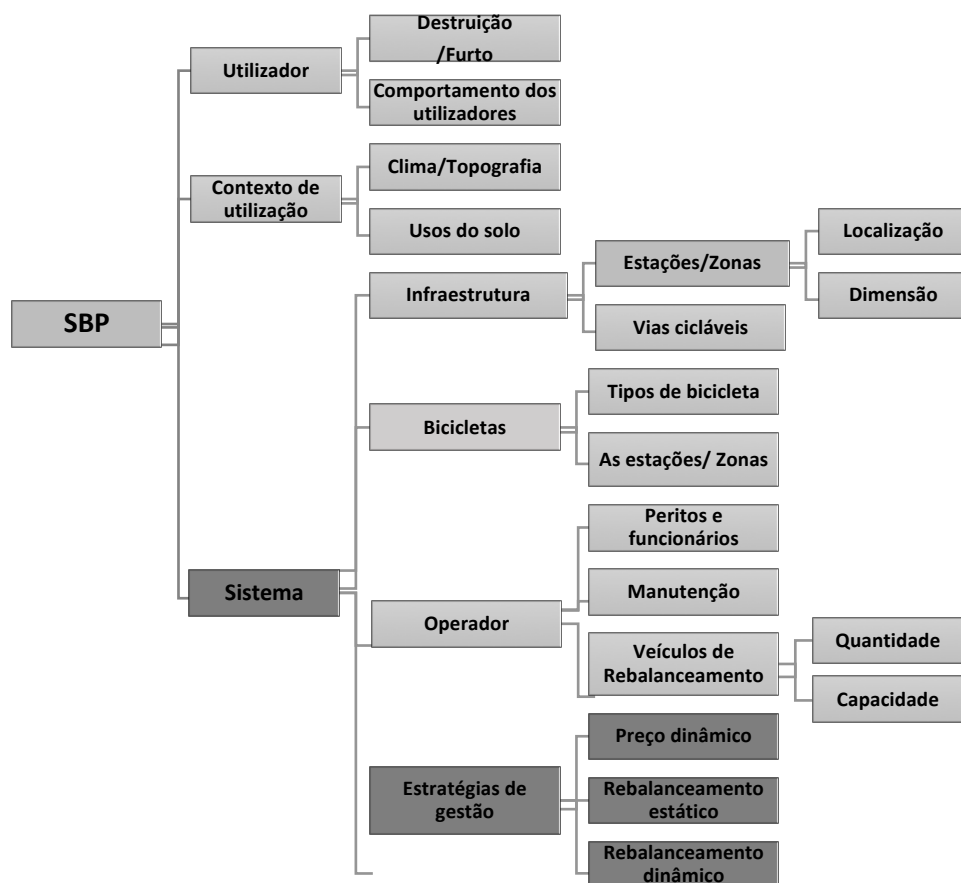


Figura 2. Classificação dos fatores associados ao problema do desequilíbrio em SBP

Da revisão da literatura, concluiu-se que a organização do "Sistema" tem um impacto muito significativo na produtividade do SBP. Em particular, as estratégias de preço dinâmico, reequilíbrio estático ou reequilíbrio dinâmico dependem diretamente, e naturalmente, da qualidade da previsão da procura de viagens nas várias cobertas pelo SBP. Assim, muita investigação tem sido conduzida sobre a previsão de procura, uma vez que esta fornece o suporte para modelos de reequilíbrio tendencialmente mais eficazes. Paralelamente, têm sido desenvolvidas estratégias distintas de reequilíbrio, quer através da redistribuição das bicicletas entre locais (estações ou zonas), quer através de incentivos aos utilizadores para que o façam indiretamente (por exemplo, através de preços dinâmicos em que o utilizador pode ser incentivado a deixar a bicicleta numa estação mais vazia em vez da estação de destino que tinha planeado, inicialmente). Estes aspetos relacionados com o "Sistema" serão escrutinados na secção 5, ao passo que o impacto dos aspetos associados ao utilizador e ao contexto de utilização são abordados na secção seguinte.

4 DESAFIOS ASSOCIADOS AO UTILIZADOR E AO CONTEXTO DE UTILIZAÇÃO

A deterioração das bicicletas ao longo do tempo requer operações de manutenção atempadas. Mas, às vezes, a taxa de sobrevivência das bicicletas é inferior ao esperado, dependendo em grande medida da forma de utilização, da cultura e das normas sociais dos utilizadores. Muitos SBP têm mecanismos de deteção de bicicletas danificadas para poder repará-las ou substituí-las rapidamente. Kaspi et al. [17] propuseram um modelo para estimar a probabilidade de bicicletas não-utilizáveis nas estações com base nos dados de transações de viagens disponíveis. Por outro lado, roubar uma peça de uma bicicleta e/ou roubar uma bicicleta são outros problemas que perturbam o sistema, muitas vezes com consequências duradouras. Como referido anteriormente, problemas de roubo e vandalismo ocorreram de forma muito impactante na primeira geração de SBP, tal como na fase inicial dos SBP sem docas [18].

O comportamento dos utilizadores nos BSSs sem doca também mostrou que largar as bicicletas caídas em locais inadequados (por exemplo, acumulação em entradas de edifícios ou interfaces de transportes, ou mesmo no meio dos passeios) causa problemas à mobilidade dos peões. Mais recentemente, os sistemas públicos partilhados de trotinetes elétricas têm sido distribuídos de forma semelhante a um SBP sem docas, havendo um problema grave de falta de regulamentação de estacionamento destes novos veículos que, aparentemente, passaram a integrar o sistema de mobilidade urbana. Como exemplo, a Land Transport Authority (LTA) em Singapura construiu muitos espaços públicos para estacionamento de bicicletas para obrigar os seus operadores a seguir a nova legislação que procura resolver este problema [19]. A cidade de Lisboa também se confrontou com este problema tendo tido que interromper um SBP sem docas experimental de uma empresa estrangeira, após menos de um mês de operação no início de 2018 [20].

Em termos de condições meteorológicas, as pessoas usam bicicletas principalmente em dias ensolarados e não em dias com mau tempo, com chuva ou ventos fortes. Estas condições podem levar a uma distribuição desequilibrada do sistema se não forem consideradas na previsão de procura que possa ser incorporada na estratégia de reequilíbrio. Li et al. [21] propõem um modelo de previsão hierárquica para reequilibrar bicicletas incluindo dois fatores principais, condições meteorológicas e a correlação de procura entre estações. Gebhart e Noland [22] utilizaram dados meteorológicos horários para avaliar os efeitos das condições meteorológicas no SBP *Capital Bikeshare* em Washington D.C. (EUA). Os resultados indicaram que temperaturas frias, chuva e altos níveis de humidade reduzem tanto a probabilidade de usar as bicicletas partilhadas quanto a duração das viagens.

Variáveis relacionadas com os usos do solo (p.e., população e densidade de trabalho), afetando a localização das atividades dos utilizadores potenciais das SBP, também influenciam o desempenho do sistema. El-Assi et al. [23] recorreram a uma metodologia de análise espacial abrangente para avaliar a importância dos usos do solo e do ambiente construído, bem como diferentes medidas meteorológicas, para o desempenho dos SBP, no Canadá. Este estudo revelou uma correlação significativa entre temperatura, padrões de usos do solo e atividade de viagem nos SBP. Rixey et al. [24] sugeriram que a densidade populacional, a densidade de trabalho e o nível de rendimentos à volta de cada estação estão positivamente correlacionados com todos os três sistemas avaliados. De outro ponto de vista, o SBP é frequentemente usado em cidades e áreas mais planas, porque as estações no topo das encostas são mais propensas a estar vazias, já que os utilizadores estão menos interessados em pedalar em subidas [25]. A topografia acidentada das cidades exacerba o fenómeno de desequilíbrio no sistema.

5 DESAFIOS ASSOCIADOS AO SISTEMA DO SBP

5.1 Infraestrutura

O primeiro fator analisado nesta secção é a estação ou zona da cidade onde os utilizadores podem recolher ou devolver bicicletas. A determinação correta das localizações das estações de bicicletas e a respetiva quantidade (ou o zoneamento correto de uma determinada área de serviço em sistema sem docas) é um dos desafios fundamentais no planeamento destes sistemas que afetam muito o seu desempenho ótimo. Um número desadequadamente baixo de estações ou uma localização errada farão, necessariamente, com que o número de bicicletas em algumas estações ou zonas seja desequilibrado. Recomenda-se a leitura [26, 27] onde os autores revêm e explicam detalhadamente a importância das estações de localização e o tamanho das zonas para o desempenho de um SBP. Naturalmente, e complementarmente, o número de docas por estação também deve ser incluído na análise e dimensionamento dos sistemas baseados em estações, uma vez que afeta necessariamente o desempenho do SBP [28]. Para resolver o problema do tamanho da frota e do rebalanceamento do SBP sem doca, Zhai et al. [11] melhoraram o método tradicional de resolução de probabilidades em estado estacionário da cadeia de Markov e propõem o "método de solução construtiva de matriz dispersa". Fricker & Gast [29] utilizaram a teoria de filas de espera para analisar os efeitos da capacidade das estações no desempenho do sistema. Numa abordagem mais específica, Sayarshad et al. [30] procuraram otimizar o tamanho mínimo da frota no SBP para comunidades de utilizadores com menor dimensão.

Em termos de segurança dos ciclistas, a necessidade de recorrer à rede rodoviária partilhada com o tráfego motorizado, i.e., fora da rede de ciclovias, tem um forte efeito sobre o interesse dos ciclistas em utilizar os SBP [31]. Além disso, as ciclovias, como uma forma flexível de conectar cidadãos, têm um papel importante no planeamento urbano [32].

5.2 Bicicletas

Em determinadas circunstâncias, mesmo um pequeno número de bicicletas na rede pode causar interrupções e desequilíbrios no sistema por não ser distribuído de forma a permitir a sua utilização. Portanto, a monitorização do número de bicicletas em cada estação é um dos parâmetros críticos na gestão do sistema que deve ser dimensionado considerando a procura potencial de cada a estação ao longo do dia [33]. No que à tecnologia da bicicleta diz respeito, mais recentemente, os operadores têm utilizado bicicletas elétricas (normalmente, *pedelec*, ou seja, tração assistida com um motor elétrico) em combinação com as bicicletas convencionais. Verifica-se que a existência de bicicletas elétricas aumenta o interesse dos utilizadores do sistema, refletindo-se no nível de utilização do SBP (i.e., número de viagens por bicicleta), reduz a média do tempo de utilização (i.e., tempo de viagem) o que permite aumentar a rotação do sistema, e, em áreas com topografia variável, pode reduzir o problema das estações sem bicicletas nas zonas mais elevadas da cidade e, completamente, das estações cheias nas zonas mais baixas [34, 8].

5.3 Operador

Num SBP, os fatores relacionados com o "operador" incluem os aspetos relacionados com a gestão da infraestrutura pesada (*hardware*), como por exemplo, as ciclovias, as estações e a redistribuição e manutenção de bicicletas; assim como aspetos de gestão da operação do sistema (*software*), designadamente, a gestão de dados de transações dos utilizadores e relacionamento com o cliente. O próprio desempenho do operador também afeta o estado de equilíbrio do sistema. Como tal, é fundamental garantir um número adequado de especialistas e técnicos a operar o sistema nas várias frentes, e o nível de especialização e competência profissionais podem reduzir de forma significativa a gravidade do problema do reequilíbrio das bicicletas no sistema. Também é necessário referir o papel dos veículos de rebalanceamento (VR), normalmente uma carrinha que redistribui bicicletas pela cidade para equilibrar o sistema [35, 36, e 37]. Os VR têm, inevitavelmente, uma capacidade limitada para carregar bicicletas e seguem um cronograma pré-especificado, quando o rebalanceamento é estático, ao um cronograma que vai sendo atualizado, quando o rebalanceamento é dinâmico (ver secção seguinte). É necessária uma estratégia de gestão de VR sofisticada para definir horários de reequilíbrio eficientes e eficazes, em que sistema de procura também sofisticados são essenciais.

5.4 Estratégias de gestão

Como referido anteriormente, as estações/zonas tendem a ficar cheias ou vazias durante o tempo de funcionamento, à medida que os utilizadores se deslocam de acordo com as suas próprias necessidades. Para evitar este problema, uma previsão correta e atempada da procura é a base de várias estratégias de gestão. Ter um modelo adequado de previsão de viagens pode detetar mudanças de curto e longo prazo nas transações dos utilizadores com base nos seus dados de procura no passado. De acordo com a literatura [38, 39 e 27], existem três escalas espaciais para os modelos de previsão: a escala da cidade, a escala de grupos de estações, e a escala da estação. A seleção correta da escala de análise e modelação depende dos componentes do SBP. Os impactos de fatores temporais, como a ocorrência de eventos que atraem utilizadores do sistema (por exemplo, eventos sociais ou desportivos), juntamente com fenómenos passageiros relacionados ao clima (por exemplo, chuvas ou tempestades) têm uma importância e impacto diferentes em cada escala de análise. Alguns autores estudaram os efeitos das condições climáticas no rebalanceamento de bicicletas em SBP [40, 41], assim como no comportamento do utilizador [41, 34].

Baseado nos modelos de previsão de procura, existem dois métodos principais para reequilibrar um SBP. O mais convencional é utilizar um veículo para reequilibrar a distribuição das bicicletas (através do reequilíbrio estático e/ou reequilíbrio dinâmico), com referido acima. Outro sistema que tem vindo a ser usado é proporcionar um incentivo aos ciclistas para ajudarem a deslocar as bicicletas para locais onde elas não existem (preços dinâmicos).

Começando pelas estratégias de preço dinâmico, o custo de utilização do sistema é uma das variáveis mais eficazes que os operadores podem utilizar para incentivar a procura de um SBP. Segundo as teorias utilitaristas na microeconomia, a maioria dos cidadãos escolhe a alternativa mais barata para fazer a viagem, procurando maximizar a utilidade dessa viagem. A maioria dos SBP recorrem a tarifários fixos (com recurso a passe anual, mensal, diário e por vezes com base no tempo de utilização). Alguns operadores implementaram estratégias de preços dinâmicos como um método para persuadir os clientes do sistema a recolherem ou estacionarem bicicletas em estações ou zonas vizinhas, de modo a minimizar estrategicamente o número de estações ou zonas desequilibradas. Esta estratégia reduz a necessidade de carros e funcionários fazerem o reposicionamento do inventário. As estratégias de preço dinâmico podem passar pela variação do custo unitário da viagem ou através de acumulação de pontos de utilização na aplicação móvel, com possibilidade de minutos de viagem gratuitos posteriormente. Também associados a estratégias de preço dinâmico, existem sistemas de gamificação que trazem um caráter lúdico à utilização do sistema. Ruch et al. [42] estudaram o impacto de incentivos monetários para que os utilizadores mudassem de destino, assumindo, mais uma vez que os clientes tomam as suas decisões racionalmente comparando esses incentivos oferecidos nas várias estações adjacentes, e que maximizam o benefício líquido que compense a penalização no tempo de viagem pessoal. Cheng et al. [43] estudaram as mudanças de receita da plataforma após este SBP sem docas adotar uma estratégia de preço mensal, procurando calcular o melhor preço de assinatura mensal para maximizar a receita do seu sistema. De acordo com seus resultados, quando a plataforma adota a estratégia mensal, se o preço da assinatura mensal for muito baixo, a receita global da plataforma será reduzida.

Relativamente às estratégias de rebalanceamento, a abordagem estática corresponde à redistribuição das bicicletas que normalmente é feita à noite ou realizada apenas no início do dia, quando esta operação não impacta o funcionamento do sistema, uma vez que nestes períodos os níveis de procura são residuais. O reposicionamento estático ignora os movimentos das bicicletas feitos pelos clientes durante o processo de reequilíbrio [44]. Os operadores que seguem esta estratégia não consideram o desequilíbrio entre estações que ocorra durante o dia. No problema do reposicionamento estático da bicicleta [45], assume-se que o número de bicicletas em cada estação não muda ou muda apenas ligeiramente e, por isso, não afeta o resultado do reequilíbrio de forma significativa. Esta estratégia de reposicionamento estático foi estudada, pela primeira vez, por Benchimol et al. [45] com o objetivo de deslocar as bicicletas para que cada estação esteja perfeitamente reequilibrada, a um custo mínimo, no momento em que o sistema reabra ou retome uma atividade mais intensa. Este é um problema típico de otimização *NP-hard*. Chemla et al. [35] estenderam o estudo anterior, propondo um algoritmo de ramificação e corte para resolver uma restrição do problema, através da obtenção de um limite superior para a solução ótima do problema através de uma pesquisa Tabu. Um método semelhante é utilizado por Ho et al. [46] com o objetivo de minimizar as penalizações totais incorridas em todas as estações por uma heurística de pesquisa Tabu iterada. No entanto, as abordagens estáticas podem não ser suficientes para evitar falhas de rede durante o dia, com impacto significativo na respetiva atratividade, com perda potencial de utilizadores. Para superar esse problema, é necessário considerar a atividade dos utilizadores durante a operação de rebalanceamento [47, 48, 49].

Ao contrário do método estático, o rebalanceamento dinâmico considera os fatores de desequilíbrio durante o dia com influência direta na forma como as bicicletas são redistribuídas pelos VR ao longo da operação do sistema. No problema do reposicionamento dinâmico da bicicleta (PRDB), as bicicletas em movimento durante a operação de reequilíbrio terão, inevitavelmente, um impacto no resultado dessa operação de reequilíbrio. O PRDB pode ser decomposto em dois sub-problemas: a definição da rota do VR e o planeamento da operação de reequilíbrio. Na definição da rota dos VR, o problema consiste na definição do caminho mais curto ou com custos mínimos, para a redistribuição eficiente de bicicletas. Para resolver este problema estocástico, Brinkmann et al. [50] recorreram a um processo de decisão de Markov, procurando minimizar o número de incumprimentos de gestão das estações (p.e., uma estação estar vazia por um período superior ao estabelecido contratualmente para os níveis de serviço a garantir pelo operador). Angeloudis et al. [51] introduz uma nova abordagem de planeamento para tais atividades, abordando tanto o roteamento quanto os aspetos de alocação do reposicionamento de bicicletas usando uma frota de VR, num estudo de caso com 30 estações selecionadas. Juntamente com os problemas de roteamento dos VR, alguns autores concentraram-se nas questões do planeamento das ações de reequilíbrio da operação, em vez de abordar exclusivamente a operação dos VR, sem ter em consideração as variações de procura. De facto, é crucial ter em consideração que a procura pode ter mudado quando o VR chega à estação. Para resolver este problema complexo do planeamento do reequilíbrio dinâmico na operação, Xu et al. [48] propuseram um modelo de programação dinâmica baseado na previsão de procura de curto prazo, tendo analisado um conjunto de dados de um ano do SBP de Chicago, com mais de 500 estações. Em vez de determinar um limite inferior e superior para um nível de distribuição de bicicletas por estação, Chiariotti et al. [25] calcularam a taxa de ocupação que maximiza o tempo de sobrevivência de uma estação (ou seja, o tempo antes das estações estarem todas vazias ou cheias). Eles usaram Processos de Nascimento-Morte (*Birth-Death Processes*) para modelar a ocupação das estações e decidir quando redistribuir as bicicletas, e a teoria de grafos para selecionar a rota de reequilíbrio. No estudo de Rainer-Harbach et al. [52], as instruções de marcha para os VR são derivadas de uma função de otimização que pesa a procura não satisfeita com a taxa de ocupação das estações pré-definidas. Meghna et al. [53] propõem uma formulação de otimização estocástica multi-objetivos, para considerar a procura esperada ao longo de um conjunto de cenários para encontrar uma estratégia de reposicionamento eficiente para os SBP. Neste sentido, os autoers propõem uma abordagem de decomposição lagrangiana e uma heurística para resolver problemas de grande escala de forma eficaz e eficiente (*greedy online anticipatory heuristic*). De acordo com seus resultados experimentais, os autores obtiveram uma redução significativa na procura não satisfeita recorrendo as dados de operação de duas empresas de SBP, por comparação com as abordagens convencionais existentes.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi caracterizar os fatores críticos na operação de SBP, a fim de encontrar e compreender melhor os principais problemas dos sistemas atuais e as estratégias adotadas para superá-los. Neste sentido, foi realizada uma sistematização dos fatores que afetam o desequilíbrio dos SBP, que consiste no dos principais motivos de insatisfação dos utilizadores destes sistemas, através de uma revisão da literatura que abordou artigos publicados sobre o tema em revistas científicas relevantes. Como o número de SBP tem vindo a aumentar significativamente em todo o Mundo, a mesma tendência é visível no número de publicações relacionadas com o tema. Com foco nos artigos que tratam do problema do reequilíbrio destes sistemas, foi possível identificar as dependências estruturais entre componentes destes sistemas, i.e., utilizadores, contexto de utilização e o sistema, propriamente dito, assim como analisar os fatores críticos para o respetivo desempenho. Como a componente "Sistema" é na verdade a parte da estrutura que os operadores de SBP podem intervir para melhorar sua eficiência, foi dada atenção especial à análise das estratégias de reequilíbrio atualmente disponíveis, que podem ser categorizadas em 3 grupos: preço dinâmico, reequilíbrio estático e reequilíbrio dinâmico.

Prevê-se que, num futuro próximo, a adoção de inovações tecnológicas mais recentes tanto das bicicletas (e.g. elétricas ou autónomas) como das estações (e.g. docas móveis), poderá permitir alargar o raio típico de utilização das bicicletas, em que surgirão novos problemas e questões de operação para investigar. Em definitivo, a inclusão de bicicletas elétricas nas frotas destes sistemas incentivará os utilizadores a usar mais os SBP por comparação com sistemas que apenas oferecem bicicletas convencionais. Por lado, face a desempenho diferentes (velocidades de circulação muito diferentes), surgem novos desafios de redistribuição das bicicletas para o equilíbrio do sistema. Este é um campo de investigação que está por explorar na literatura.

AGRADECIMENTOS

O bolsheiro Mohammad Sadegh Bahadori agradece a Thales Portugal e o Instituto Superior Técnico (IST) pelo apoio financeiro atribuído através da bolsa de investigação para o Doutoramento em Sistemas de Transportes do MIT Portugal.

REFERÊNCIAS

1. DeMaio, Paul. Bike-sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future. *Journal of Public Transportation*, 12 (4): 41-56, 2009. DOI: [10.5038/2375-0901.12.4.3](https://doi.org/10.5038/2375-0901.12.4.3).
2. Fishman, E., Bikeshare: A Review of Recent Literature, *Transport Reviews*, 36:1, 92-113, 2016. DOI: [10.1080/01441647.2015.1033036](https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1033036).
3. Shaheen, S., Guzman, S., Zhang, H., Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia, *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2143, 159-167, 2010. DOI: [10.3141/2143-20](https://doi.org/10.3141/2143-20).
4. Wang, M.; Zhou, X. Bike-sharing systems and congestion: Evidence from US cities. *Journal of Transport Geography*, 65, 147–154, 2017.
5. Stasinopoulos, S., Zhao, M., & Zhong, Y. Simultaneous localization and mapping for autonomous bicycles. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017. DOI:[10.1177/1729881417707170](https://doi.org/10.1177/1729881417707170)
6. Shu, J.; Chou, M. C.; Liu, Q.; Teo, C.-P.; and Wang, I.-L., Models for effective deployment and redistribution of bicycles within public bicycle-sharing systems. *Operations Research* 61(6):1346–1359, 2013.
7. Apostolou, G., Geurs, K., & Reinders, A. An Overview of Existing Experiences with Solar-Powered E-Bikes. *Energies*, 11(8), [2129], 2018. DOI:[10.3390/en11082129](https://doi.org/10.3390/en11082129)
8. Cherry, C. R., S. Worley, and D. Jordan. Electric Bike Sharing System Requirements and Operational Concepts. *Presented at 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.*, 2010.
9. Palomares, J., C., Gutiérrez., J, Latorre., M, Optimizing the location of stations in bike-sharing programs: A GIS approach, *Applied Geography*, 35, 235-246, 2010. DOI: [10.1016/j.apgeog.2012.07.002](https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.07.002)
10. Q. Chen and T. Sun, A model for the layout of bike stations in public bike-sharing systems, *J. Adv. Transp.*, vol. 49, no. 8, pp. 884–900, Dec. 2015.
11. Yong Zhai, Jin Liu, Juan Du, Jie Chen, solution to fleet size of dockless bike-sharing station based on matrix analyses, *ISPRS*, Volume IV-4, 2018.
12. Li, Y., Szeto, W. Y., Long, J., & Shui, C. S. A multiple type bike repositioning problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 90, 263–278, 2016. DOI:[10.1016/j.trb.2016.05.010](https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.05.010).
13. Feng, S., Chen, H., Du, C., Li, J., & Jing, N. A Hierarchical Demand Prediction Method with Station Clustering for Bike Sharing System. 2018 IEEE Third International Conference on Data Science in Cyberspace (DSC), 2018. DOI:[10.1109/dsc.2018.00133](https://doi.org/10.1109/dsc.2018.00133).
14. Li, Y., Zheng, Y., & Yang, Q. Dynamic Bike Reposition: A Spatio-Temporal Reinforcement Learning Approach. *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining - KDD '18*, 2018. DOI:[10.1145/3219819.3220110](https://doi.org/10.1145/3219819.3220110).
15. Patel, S. J., Qiu, R., & Negahban, A. Incentive-Based Rebalancing of Bike-Sharing Systems. *Springer Proceedings in Business and Economics*, 21–30, 2018. DOI: [10.1007/978-3-030-04726-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04726-9_3).
16. Dell'Amico, M., Iori, M., Novellani, S., & Stützel, T. A destroy and repair algorithm for the Bike sharing Rebalancing Problem. *Computers & Operations Research*, 71, 149–162, 2016. DOI:[10.1016/j.cor.2016.01.011](https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.01.011).
17. Kaspi, M., Raviv, T., Tzur, M., Detection of unusable bicycles in bike-sharing systems, *Omega*, Volume 65, Pages 10-16, 2016. DOI: [10.1016/j.omega.2015.12.003](https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.003).
18. Spinney, J. Lin, W., Are you being shared? Mobility, data and social relations in Shanghai's Public Bike Sharing 2.0 sector, Pages 66-83, 2018. DOI:[10.1080/23800127.2018.1437656](https://doi.org/10.1080/23800127.2018.1437656).
19. Land Transport Authority in Singapore website, Six Applications for Dockless Bicycle-Sharing Operator Licences Receive In-Principle Approval from LTA. URL: <https://www.lta.gov.sg/apps/news/page.aspx?c=2&id=4868166a-45c5-4cd5-af5e-64e980db4657#pgTop>. Access date: February 1st, 2019.
20. NIT website, Tudo o que correu mal com as bicicletas partilhadas em Lisboa. URL: <https://nit.pt/out-of-town/back-in-town/tudo-o-que-correu-mal-com-as-bicicletas-partilhadas-em-lisboa>. Access date: February 1st, 2019.

21. Li, Y., Zheng, Y., Zhang, H., Chen, L., Traffic prediction in a bike-sharing system. In: Proceedings of the 23rd SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, SIGSPATIAL '15. ACM, New York, NY, USA, pp. 33:1–33:10, 2015. DOI:[10.1145/2820783.2820837](https://doi.org/10.1145/2820783.2820837).
22. Gebhart, K., Noland, R. B.: The impact of weather conditions on capital bikeshare trips. For presentation at the 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Transportation 41(6), 1205–1225, 2014.
23. El-Assi, W., Salah Mahmoud, M., & Nurul Habib, K. Effects of built environment and weather on bike sharing demand: a station level analysis of commercial bike sharing in Toronto. Transportation, 44(3), 589–613, 2015. DOI:[10.1007/s11116-015-9669-z](https://doi.org/10.1007/s11116-015-9669-z)
24. Rixey, R.A. Station-level forecasting of bikesharing ridership: station network effects in three U.S. systems. Transp. Res. Rec., 2387, 46-55, 2013.
25. Chiariotti, F. et al. “A Dynamic Approach to Rebalancing Bike-Sharing Systems.” Sensors (2018).
26. Chu, J., Duan, Y., Yang, X. Wang, L., The Externality of Bike Sharing on Housing Price, 2018. Available at SSRN: DOI:[10.2139/ssrn.3195004](https://doi.org/10.2139/ssrn.3195004)
27. Imani, A.F., Eluru, N., El-Geneidy, A.M., Rabbat, M., Haq, U.: How Does Land-Use and Urban Form Impact Bicycle Flows-Evidence from the Bicycle-Sharing System (BIXI) in Montreal. In Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, 2014.
28. George, D.K, Xia, C.H., Fleet-sizing and service availability for a vehicle rental system via closed queueing networks, European Journal of Operational Research 211, 198-207, 2011.
29. Fricker, C., Gast, N.: Incentives and redistribution in homogeneous bike-sharing systems with stations of finite capacity. EURO J. Transp. Logistics 3, 1–31, 2014.
30. Sayarshad, H., Tavassoli, S., Zhao, F., A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization, *Applied Mathematical Modelling* 36, 4944–4951, 2012. DOI:[10.1016/j.apm.2011.12.032](https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.12.032)
31. M. Saplıođlu, M.M. Aydınb, Choosing safe and suitable bicycle routes to integrate cycling and public transport systems, *Journal of Transport & Health* 10, 236–252, 2018. DOI:[10.1016/j.jth.2018.05.011](https://doi.org/10.1016/j.jth.2018.05.011)
32. Loidl, M.; Hochmair, H.H. Do Online Bicycle Routing Portals Adequately Address Prevalent Safety Concerns? *Safety* 2018, 4, 9, 2018.
33. Meiyu Li , Xifu Wang, Xi Zhang, Lifen Yun ,Yuan Yuan, A Multiperiodic Optimization Formulation for the Operation Planning of Free-Floating Shared Bike in China, *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2018, Article ID 2639542, 11 pages, 2018. DOI:[10.1155/2018/2639542](https://doi.org/10.1155/2018/2639542)
34. Andrew A. Campbell, Christopher R. Cherry, Megan S. Ryerson, Xinmiao Yang, Factors influencing the choice of shared bicycles and shared electric bikes in Beijing, *Transportation Research Part C* 67, 399–414, 2016. DOI:[10.1016/j.trc.2016.03.004](https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.03.004)
35. Chemla D, Meunier F, Wolfer-Calvo R, Bike sharing systems: solving the static rebalancing problem. *Discrete Optim* 10(2):120–146, 2013.
36. Raviv, T., Tzur, M., Forma, I.A.: Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches. *EURO J. Transp. Logistics* 2(3), 187–229, 2011.
37. Kadri, A.A., Kacem, I. & Labadi, K. "Lower and upper bounds for scheduling multiple balancing vehicles in bicycle-sharing systems", *Soft Comput*, 2018. DOI: [10.1007/s00500-018-3258-y](https://doi.org/10.1007/s00500-018-3258-y)
38. Cheng Xu, Junyi Ji, Pan Liu, The station-free sharing bike demand forecasting with a deep learning approach and large-scale datasets, *Transportation Research Part C*, 95. 47–60, 2018. DOI:[10.1016/j.trc.2018.07.013](https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.013)
39. Longbiao Chen, Daqing Zhang, Dynamic Cluster-Based Over-Demand Prediction in Bike Sharing Systems, *UbiComp*, 2016. DOI: [10.1145/2971648.2971652](https://doi.org/10.1145/2971648.2971652).
40. Gebhart, K. & Noland, R.B. *Transportation*, 41: 1205, 2014. DOI:[10.1007/s11116-014-9540-7](https://doi.org/10.1007/s11116-014-9540-7)
41. Nicholas Fournier, Eleni Christofa, Michael A. Knodler Jr. A sinusoidal model for seasonal bicycle demand estimation, *Transportation Research Part D*, 50. 154–169, 2017.
42. Claudio Ruch, Joseph Warrington, Manfred Morari, Rule-based price control for bike sharing systems, *European Control Conference (ECC)*, 2014.
43. Cheng, X., Gao, Y., The Optimal Monthly Strategy Pricing of Free-Floating Bike Sharing Platform, *Modern Economy*, 318-338, 2018. DOI:[10.4236/me.2018.92021](https://doi.org/10.4236/me.2018.92021)
44. Ghosh, S.; Varakantham, P.; Adulyasak, Y.; and Jaillet, P, Dynamic repositioning to reduce lost demand in bike sharing systems. *Journal of Artificial Intelligence Research* 58:387–430, 2017.
45. Benchimol, M., Benchimol, P., Chappert, B., De La Taille, A., Laroche, F., Meunier, F., Robinet, L.: Balancing the stations of a self-service 'bike hire' system. *RAIRO-Operations Research* 45(1), 37-61 (2011).
46. Ho, S.C., Szeto, W.: Solving a static repositioning problem in bike-sharing systems using iterated tabu search.

47. Jin Xin Cao, Cong Cong Xue, Research on the station location problem for public bicycle systems under dynamic demand, *Accepted Manuscript*, 2018. DOI:[10.1016/j.cie.2018.11.028](https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.028)
48. Xu, H., Duan, F., Pu, P, Dynamic bicycle scheduling problem based on short-term demand prediction, *Applied Intelligence*, 2018. DOI:[10.1007/s10489-018-1360-6](https://doi.org/10.1007/s10489-018-1360-6)
49. Laporte, G.; Meunier, F.; Calvo, R.W. Shared mobility systems. *Q. J. Oper. Res. (4OR)*, 13, 341–360, 2015.
50. Brinkmann, J., Ulmer, M. W, Mattfeld, D.C., Short-term strategies for stochastic inventory routing in bike sharing systems, 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015, 2015.
51. Angeloudis, P., Hu, J., Bell, M.G.H., A strategic repositioning algorithm for bicycle-sharing schemes, *Transportmetrica A: Transport Science*, 2014. DOI:[10.1080/23249935.2014.884184](https://doi.org/10.1080/23249935.2014.884184).
52. Rainer-Harbach, M., Papazek, P., Hu, B., Raidl, G.R.: Balancing bicycle sharing systems: a variable neighborhood search approach. In: Middendorf, M., Blum, C. (eds.) *EvoCOP 2013*. LNCS, vol. 7832, pp. 121–132. Springer, Heidelberg, 2013.
53. Meghna Lowalekar, Pradeep Varakantham, Supriyo Ghosh, Sanjay Dominik Jena, Patrick Jaillet, Online Repositioning in Bike Sharing Systems. *Journal of Artificial Intelligence Research* 58:387–430, 2017.