

O PROJETO DE REDES DE TRANSPORTE ESCOLAR

Natalia Varela da Rocha Kloeckner (UNI7)

natalia.kloeckner@gmail.com



Este artigo faz uma ampla revisão sobre as abordagens quanto o School Bus Network Design - SBND, também conhecido por projeto de redes de transporte escolar, o qual inclui diversos subproblemas a ele indexados. Para tal, esse estudo concentra-se no objetivo de descrever os mais relevantes problemas e características encontrados do SBND na literatura. Aspectos como análise quanto a eficiência desses problemas sugere-se como estudos futuros a serem implementados.

Palavras-chave: Palavras-Chaves: Pesquisa Operacional. Transporte Escolar. Roteamento de Veículos.

1. Introdução

O SBND, *a priori*, consiste na preparação dos dados, os quais são compostos essencialmente pelas localizações de alunos e escolas, pontos de embarque/desembarque, bem como da frota de ônibus disponível, conjuntamente ao horário de início e término das aulas nas escolas.

Li e Fu (2002) e Park e Kim (2010), abordaram o *School Bus Routing Problem* – SBRP (problema de roteamento do transporte escolar) como não sendo únicos e nem dominantes, podendo ser tratados dependentemente, como exemplo, o fato de onde devem ser localizadas as paradas do ônibus para atendimento das restrições. Desta forma, o projeto de redes de transporte escolar é interpretado como sendo constituído de diversos subproblemas do SBRP.

De acordo com Ke, Caron e Aneja (2005), Park e Kim (2010) e Kloeckner (2015), os principais subproblemas são: seleção das paradas dos ônibus – referente a atribuição dos locais da parada dos ônibus; seleção do ônibus de uma frota disponível – onde a partir de uma frota (homogênea ou heterogênea) determina-se os ônibus a serem utilizados; geração de rotas de ônibus – que produz a rota que o ônibus deve seguir; ajuste ao tempo de início da aula na escola – onde tem-se o alinhamento do tempo do transporte com o tempo de início e término da aula; programação da rota, onde auxiliado pela geração da rota, refere-se a programação desta; e, por fim, a nucleação de alunos, onde a partir da capacidade de aluno por série da escola, faz-se a alocação do aluno na escola mais próxima quanto possível da sua residência.

Este estudo objetiva-se a investigar a literatura em voga sobre o problema, mas especificamente, descrever e categorizar as abordagens dos seis subproblemas citados, de forma a obter uma melhor explanação do problema.

Assim, o estudo segue estruturado da seguinte forma: na seção 2, encontra-se uma explanação da abordagem do problema, envolvendo cada subproblema proposto; na seção 3, apresenta-se

a classificação de acordo com os aspectos práticos dos subproblemas; já a seção 4 aborda-se a conclusão e sugestões para estudos futuros.

2. Abordagens para o projeto de redes de transporte escolar

As abordagens aos subproblemas de SBRP apresentam interações conforme o enfoque da solução de cada estudo. Contudo, toda abordagem consiste inicialmente na preparação dos dados que é composta pela rede viária, interligando os pontos de localização da casa à escola de cada aluno, bem como a localização dos ônibus (local de origem e capacidade do veículo) e o tempo de início e término das aulas nas escolas. Sendo estes descritos em uma matriz origem-destino (OD) do problema, onde é possível verificar entre os pares de nós, seus menores tempos de viagem e distâncias. (PARK e KIM, 2010).

Desta forma, esta seção é destinada a investigação bibliográfica ampla de todos os subproblemas apresentados na literatura até os dias atuais, constituindo-se como primeiro passo para a comparação e estudo de eficiência dos problemas levantados.

Na Tabela 1, é apresentada uma síntese das abordagens para o SBND encontradas na literatura.

Tabela 1 - Abordagem dos subproblemas do SBND encontrados na literatura.

Autor(es)	BSSP	BSFABF	BRG	SBTA	RS	SNP
Newton e Thomas (1969)			x		x	
Newton e Thomas (1974)			x		x	
Bodin e Berman (1979)	x		x		x	
Dulac <i>et al.</i> (1980)	x		x			
Desrosiers <i>et al.</i> (1981)	x		x	x	x	
Bodin <i>et al.</i> (1983)	x		x		x	
Bowerman, Hall e Calamai (1995)	x	x	x			
Braca <i>et al.</i> (1997)			x		x	
Cunha e Gualda (1997)		x	x			
Li e Fu (2002)	x	x	x		x	

Corberán <i>et al.</i> (2002)			X			
Ripplinger (2005)			X			
Spada <i>et al.</i> (2005)			X		X	
Ke, Caron e Aneja (2005)	X	X	X	X	X	
Park e Kim (2010)	X	X	X	X	X	
Kloeckner (2015)						X

Fonte: Elaborada pelo autor.

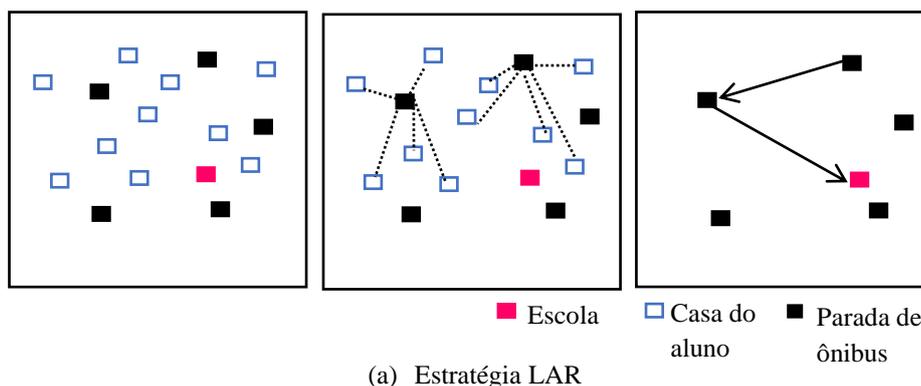
Diante do exposto, na seção a seguir, abordam-se os seis subproblemas para o projeto de redes de transporte escolar apontados, bem como a classificação a partir da perspectiva do problema, utilizando-se, para isso, a explanação dos trabalhos os quais são estudados.

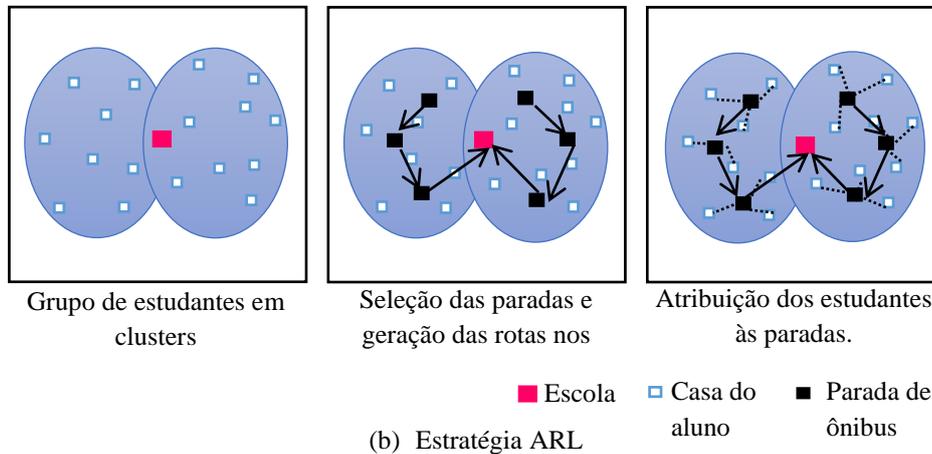
2.1. Seleção das paradas do ônibus

Esse subproblema destina-se a selecionar pontos de parada do ônibus, designando os alunos a estas paradas. Por abranger tanto zonas rurais quanto urbanas, alguns autores, tais como Park e Kim (2010) e Ripplinger (2005), assumem que os alunos do meio rural são buscados em casa, enquanto os alunos urbanos são alocados a um ponto de ônibus, visto que as localizações das suas residências são mais próximas aos pontos de parada.

As soluções para esse subproblema apresentam, em geral, duas estratégias heurísticas segundo Park e Kim (2010): primeiro localizar, depois alocar e rotear (LAR), e outra onde deve-se primeiro alocar, depois rotear e localizar (ARL), conforme apresenta-se na Figura 1.

Figura 1 - Heurísticas





Fonte: Adaptado de Park e Kim (2010, p. 313).

Tais estratégias, utilizadas no estudo de Dulac, Ferland e Forgues (1980), propiciaram a determinação dos locais de paradas de ônibus, alocando em seguida os alunos a estes pontos, construindo, por fim, as rotas de acordo com as paradas selecionadas (abordagem LAR). A posterior, no trabalho de Bowerman, Hall e Calamai (1995), *a priori*, houve a alocação dos alunos em *clusters* de acordo com a capacidade do veículo seguindo da geração de rotas e, *a posteriori*, a geração de paradas de ônibus (abordagem ARL).

Recentemente, Schittekat *et al.* (2013) utilizando LAR, elaboraram uma *matheuristic*, que hibridizando técnicas heurísticas e métodos exatos foi capaz de resolver um SBRP de grande porte. Como resultado, nas 112 instâncias analisadas, obteve-se eficiente desempenho na identificação das soluções ótimas ou próximas do ideal para o problema.

2.2. Seleção do ônibus a partir de uma frota disponível

Este subproblema determina qual ônibus deve ser utilizado para atender a demanda de alunos de cada nó (parada), considerando dada frota – homogênea ou heterogênea (KE, CARON e ANEJA, 2005).

Para tal, consiste em atender todas as paradas utilizando a frota de ônibus disponível. Adotando como parâmetros: custo fixo diário total, custo unitário variável com a distância,

custo dependente do horário e a capacidade máxima de alunos que pode ser transportada por cada veículo.

Os estudos acerca do tema ainda são incipientes, tendo em Cunha e Gualda (1997) a proposta de três estratégias heurísticas de solução, baseadas no problema de roteamento de veículos com janela de tempo e na relaxação Lagrangiana das restrições de atendimento a cada nó – esta tratando-se de uma decomposição do problema de forma a explorar a sua estrutura relaxando suas restrições. Duas dessas heurísticas são voltadas a problemas com veículos idênticos e uma terceira, direcionada a problemas de frota heterogênea.

Quanto a decisão ao tipo de veículo que deve ser utilizado em cada *cluster* de alunos, para Cunha e Gualda (1997), na frota homogênea a ordem de utilização não é necessária, uma vez que se tratam de veículos iguais. Já para a frota heterogênea, deve ser considerada uma vez que adota a prioridade de uso dos veículos a partir de uma ordem crescente de custo fixo por unidade de capacidade, devendo-se ordenar, desta forma, o quociente do menor ao maior, a fim de obter qual veículo possui maior eficiência. Para isso, basearam-se na observação de que os veículos maiores têm por unidade de capacidade, custos fixos e variáveis reduzidos.

2.3. Geração da rota do ônibus

A construção das rotas escolares segundo Bodin e Berman (1979), podem ser classificadas em duas abordagens: “roteia primeiro e agrupa depois” e a da “agrupa primeiro e roteia depois”.

A primeira abordagem trata-se do Problema do Caixeiro Viajante, no qual o veículo, tendo que visitar certo número de cidades localizadas numa região, deve achar a sequência que minimize o percurso total (NOVAES, 2007). Tal fundamento consiste em construir uma rota passando por todos os pontos de paradas, dividindo-as, posteriormente, em um número menor de rotas viáveis.

Já na segunda abordagem, os alunos são agrupados em paradas de ônibus de forma a construir, posteriormente, rotas econômicas para cada agrupamento. Por exemplo, no estudo de Dulac, Ferland e Forgues (1980), aplicado a um ambiente urbano as fases para a obtenção de tal técnica foram: primeiramente, selecionar as paradas para cada escola, agrupando os

alunos aos nós, e, posteriormente, gerar uma rota para cada parada, resolvendo o problema para cada escola.

Contudo, em geral, as soluções obtidas podem não ser satisfatórias (BODIN e BERNAM, 1979); (DULAC, FERLAND e FORGUES, 1980). Por isso, requer-se a aplicação de métodos heurísticos de melhoria às rotas geradas, como, por exemplo, os propostos por Lin e Kernighan (1973): *2-opt* e o *3-opt*, os quais se destinam a realizar alterações tomando-se dois a dois arcos e três a três arcos do roteiro, respectivamente.

2.4. Ajuste ao tempo de início da aula

Para Bodin *et al.* (1983), trata-se de um problema fundamental para minimizar os custos de transporte e reduzir o número de ônibus demandado. Uma vez definido os horários de início e término da aula, tal abordagem busca maximizar o número de rotas que podem ser atendidas sequencialmente pelo mesmo ônibus, reduzindo, desta forma, a quantidade de ônibus a serem utilizados (PARK e KIM, 2010).

Desrosiers *et al.* (1981), buscaram selecionar por heurística o horário de início e término das aulas em um dia escolar, de forma que o número máximo de rotas necessárias tenha o intervalo de tempo minimizado. Já Bodin *et al.* (1983), ao adotar a abordagem de Desrosiers *et al.* (1981), constatou que as cidades com menos de cinquenta escolas e traslado de intervalo de tempos pequenos, à hora de início e término das aulas, podem ser resolvidos manualmente, por aproximação.

2.5. Programação das rotas

A programação de rotas tem por função especificar o horário de início e término de cada rota, determinando um mapa de rotas que pode ser executado sucessivamente por um mesmo ônibus (PARK e KIM, 2010).

Bodin e Berman (1979), bem como Newton e Thomas (1974), desenvolveram modelos considerando múltiplas escolas para determinar as linhas de ônibus. Assumiram, para isso, a existência de escolas com janelas de tempo diferentes. Contudo, a abordagem de Bodin e

Berman (1979) pode apresentar o tempo de conclusão do período anterior maior do que o do período seguinte, o que pode tornar a abordagem inviável.

Posteriormente outros autores, como Braca *et al.* (1997) resolveram o problema abrangendo todas as escolas em uma única etapa. Para isso, construíram inicialmente uma rota entre uma casa selecionada aleatoriamente e a escola, onde o aluno residente desta casa, estuda. Em seguida, alocaram em pares, casas e escolas, escolhendo para a formação da rota, primeiramente os pares que minimizassem a distância total do itinerário, garantindo, ainda, que todas as restrições estariam satisfeitas.

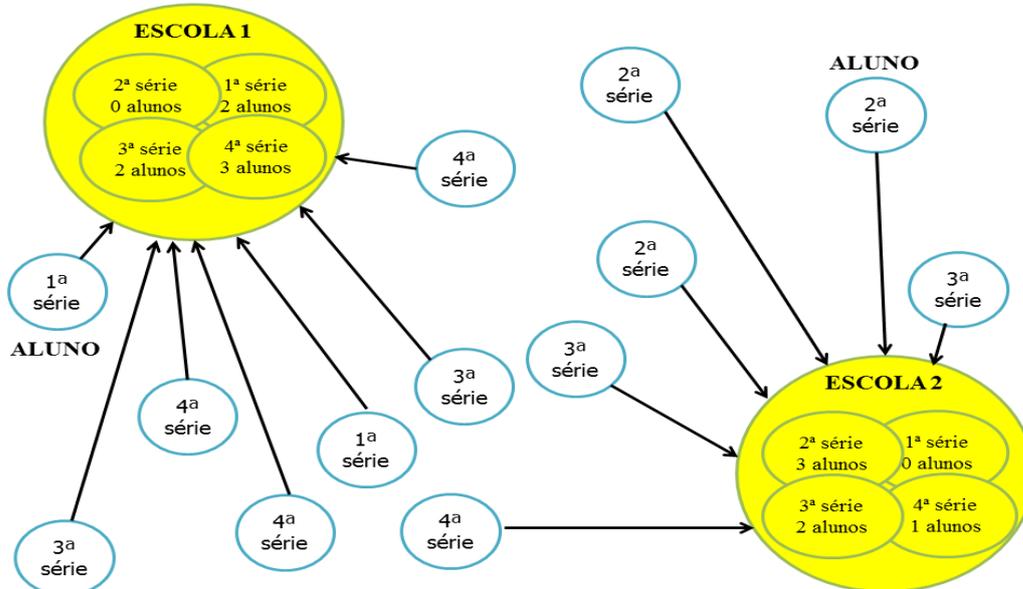
Já Li e Fu (2002) aplicaram o algoritmo do caminho mais curto de ordem k - *Lawler* na solução do problema, o que significa mover uma rota maior para uma menor, consolidando assim, a geração do itinerário com melhorias. Recentemente, Spada e Bierlaire (2005) com abordagens heurísticas para o estudo de múltiplas escolas consideraram os horários de aula dessas, em ordem crescente, implementando para a construção de rotas, um algoritmo guloso. E depois, melhorou-as utilizando heurística por meio de um método matemático criado no estudo que permitiu-lhes visualizar a solução proposta e testar sua robustez caso os dados do problema original sejam modificados.

2.6. Problema de Nucleação de Alunos

A nucleação de alunos conota o problema em que, dado um conjunto de alunos que cursam séries distintas, faz-se necessário particioná-los em agrupamentos com características semelhantes (localização espacial e séries) e com restrição quanto à capacidade de sua alocação nas escolas (*clusters*),– caracterizando-o como um Problema de Agrupamento Capacitado (*Capacitated Clustering Problem – CCP*).

Neste sentido, trata-se de otimizar os agrupamentos formados de tal modo a reduzir o percurso de traslado de cada aluno à escola, o que resulta em uma otimização de tempo, redução do custo da viagem, melhor bem-estar do aluno e incremento do processo de aprendizagem.

Figura 2 - problema de nucleação de alunos no transporte escolar



Fonte:

Adaptado de Kloeckner (2015, p.35)

Kloeckner (2015), aplicou este problema a uma instância de alunos da rede pública de um município do Ceará, onde dada a capacidade de alunos por sala e quantidade de escolas do problema, propôs-se a formulação de um modelo matemático que determinou a alocação de alunos à escola mais próxima possível da sua residência. Para isso considerou-se além dos dados citados, a série demandante por cada estudante bem como a origem (coordenadas da residência) e dela obtido a distância de cada aluno a escola (Figura 2). Tal estudo, corresponde a única referência encontrada na literatura sob a perspectiva de um problema de otimização combinatória.

3. Categorização do problema

Segundo Assad (1988), um dos obstáculos para classificar os problemas de roteamento de forma eficiente encontra-se no que o tal problema deve se basear, ou seja, se se deve levar em consideração os requisitos para solução do problema em si ou se se deve desenvolvê-los a partir das técnicas de solução propostas.

Pela aproximação à realidade e para melhor explanação, o Quadro 1 a seguir tem como objetivo citar e descrever os elementos utilizados na maioria das soluções voltadas aos problemas de projeto de redes de transporte escolar, quando aos seus aspectos práticos.

Quadro 1 - Categorização dos principais elementos quanto a abordagem e características.

Categorização de elementos	Abordagem	Características	Principais autores
Número de Escolas a serem atendidas	Única escola	Soluções derivadas do Problema de Roteamento de Veículos tradicionais; o ônibus após atender ao último aluno retorna para um nó (<i>driver nodes</i>)	Aksen, Ozyurt e Aras (2007)
	Múltiplas escolas	Duas opções de solução: uma que toma como referência a escola (<i>school-based</i>) e outra como referência a residência do aluno (<i>home-based</i>) para um conjunto de rotas e frota de veículos.	Spada e Bierlaire (2005)
Ambiente do Transporte	Urbano	Alocação de alunos conforme a capacidade total do ônibus; agrupamento em paradas de ônibus.	Bodin e Berman (1979)
	Rural	Alocação de alunos conforme a capacidade total do ônibus; nós de atendimento: local da residência de cada aluno, dada baixa demanda pelo serviço.	
Turno de Atendimento	Diurno	Considera-se para a solução a dispersão da janela de tempo (início e término da aula) de cada escola, buscando e retomando o aluno ao final da jornada ao ponto de origem.	Bodin e Berman (1979) Braca <i>et al.</i> (1997)
	Vespertino		
	Diurno e Vespertino		
	Noturno		-
Características do Estudante	Estudantes em geral	Adota-se o problema de roteamento com colhida e retorno a residência do aluno (nó), ponderando o problema ser combinado com estudando em geral.	Braca <i>et al.</i> (1997) Park e Kim (2010) Ripplinger (2005)
	Demandantes de educação especial	Implementa-se ainda no caso especial, restrições de tempo de traslado, respeitando horário de início e término da aula.	
Transporte de Passageiros	Único	Alocação de alunos de uma mesma escola alocados em um mesmo ônibus.	Bodin <i>et al.</i> (1993) Braca <i>et al.</i> (1997) Park e Kim (2010)
	Misto	Alocação de alunos de diferentes escolas em um mesmo ônibus. Algoritmo de transporte misto com regra de inserção simples.	
Capacidade de cada ônibus da frota	Homogênea	Adoção do problema de roteamento com veículo de única capacidade. Contudo, por imposição da escola quando a lotação, tais capacidades podem ser móveis.	Newton e Thomas (1974) Bowerman, Hall e Calamai (1995)
	Heterogênea	Define o problema de roteamento com veículo de múltiplas capacidades	Park e Kim (2010)

Fonte: elaborado pelo autor

Para Park e Kim (2010), grande parte das abordagens em problemas de projeto de redes de transporte escolar tem por objetivo reduzir o número de ônibus utilizados, bem como, a distância total do percurso.

Em outros estudos, como o de Savas (1978) *apud* Park e Kim (2010), destacam-se critérios de equidade. E, nesse sentido, faz-se necessário a abordagem de três medidas que avaliam o

desempenho fornecido. São elas: eficiência, eficácia e equidade, explicadas no quadro a seguir:

Quadro 2 – caracterização dos objetivos

Categorização de elementos	Abordagem	Características	Principais autores
Objetivos	Eficiência	Medida avaliativa do nível de serviço pelos custos dos recursos.	Park e Kim (2010)
	Eficácia	Medida dada pelo tempo total gasto na viagem e pela distância do percurso até a parada para atendimento a demanda.	
	Equidade	Medida entre a carga e o tempo de viagem do ônibus. Observada ao definir a eficiência e eficácia do serviço.	

Fonte: elaborado pelo autor

Já quanto as restrições, de acordo com Park e Kim (2010), várias são as consideradas no SBRP. Sendo as referenciadas no Quadro 3 abaixo, as postuladas por Braca, *et al.*(1997), Spada e Bierlaire. (2005) e Bodin *et al* (1983) e as que foram mais utilizadas em trabalhos posteriores sobre o tema.

Quadro 3 – Características quanto as restrições dos problemas de SBRP

Categorização de elementos	Abordagem	Principais autores
Restrições	Quanto à capacidade do ônibus para transportar certo número de alunos.	Bodin <i>et al.</i> (1983) Braca <i>et al.</i> (1997) Spada e Bierlaire (2005) Park e Kim (2010)
	Quantidade mínima de ônibus necessários para uma rota (configura também como variável de decisão).	
	Tempo máximo de deslocamento do ônibus de cada nó (aluno) até a escola.	
	Máxima distância admissível do percurso dos alunos até as paradas.	
	Janela de tempo do ônibus com base no horário de início e término da aula.	
	Quantidade máxima de alunos por parada(s).	
	Quantidade mínima de alunos para criação de uma rota.	
Menor tempo para buscar um aluno em um nó.		

Fonte: elaborado pelo autor

4. Conclusão e sugestão para estudos futuros

Em suma, as abordagens do SBRP constituem-se em problemas combinatórios NP-Completo, como os de Bodin *et al.* (1983), Boweman *et al.* (1995), Braca *et al.* (1997) e Spada Bierlaire (2005), (2005) e Kloeckner (2015), onde uma vez que a característica de resolução do

problema em sua otimalidade pode não ser satisfeita, seja pelo porte do problema e por peculiaridade da instância necessita-se de bastante recurso computacional.

Assim, com tempo polinomial aceitável, algoritmos (métodos) que retornam soluções próximas do ótimo, tais como as heurísticas e meta-heurísticas são amplamente adotadas. Tais métodos, permitem a obtenção da eficiência no uso dos recursos envolvidos no problema, permitindo melhor alocação destes, redução dos custos e melhoria do nível de serviço ofertado.

Mediante a essa explanação, sugere-se como direcionamento para estudos futuros a apresentação e comparação dos modelos matemáticos e os métodos de solução, chegando-se assim a conclusão quanto a eficiência dos problemas de SBRP citados aqui.

REFERÊNCIAS

AKSEN, D.; OZYURT, Z; ARAS, N. Open vehicle routing problem with driver nodes and time deadlines.

Journal of the Operational Research Society. n.58. p.1223 -1234. 2007.

ASSAD, A. A. Modeling and Implementation issues in vehicle routing. In: Golden, L. B., Assad, A. A. (eds.)

Vehicle Routing: Methods and Studies. North Holland, Amsterdam, p.7-46, 1988.

BODIN, L.D.; BERMAN, L. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. **Computers and**

Operations Research. n.10. p.113-129. 1979.

BODIN, L. D.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M. O. Routing and scheduling of vehicles and crews: the

state of the art. **Computers and Operations Research**. vol.10. p.63-211. 1983.

BOWERMAN, R.; HALL, B. CALAMAI, P. A multi-objective optimization approach to urban school bus routing: formulation and solution method. **Transportation Research**. Vol.29. n.2, p.107-123, 1995.

BRACA, J.; J. BRAMEL, B.; POSER, D.; SIMCHI, L. A computerized approach to the New York City school bus routing problem. Technical report, Graduate School of Business, **Columbia University**, New York: 1997.

CUNHA, C. B.; GUALDA, N. D. F. Heurísticas baseadas em relaxação lagrangiana para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais. In: XI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes.

Anais... Rio de Janeiro: ANPET, 1997. v.2., p.843-855.

DESROSIERS, J.; FERLAND, J. A.; ROUSSEAU, G. M.; LAPALME, G.; CHAPLEAU, L. A school busing system. Centre de Recherche sur Les Transports, Montreal. n.164. **University of Montreal**: april, 1980.

DULAC, G; FERLAND, J. A.; FORGUES, P. A. School bus routes generator in urban surroundings.

Computers and Operations Research. vol.7. p.199 – 213. Canada: Elsevier, 1980.

KE, X. W.; CARON, R. J.; ANEJA, Y. P. The school bus routing and scheduling problem with homogeneous bus capacity: formulations and their solutions. University of Windsor: Ontario. Agust, 2005.

LI, L.; FU, Z. The school bus routing problem: a case study. **Journal of the Operational Research Society**.

n.53. p.552 – 558. 2002.

KLOECKNER, N. V. R. O Problema de nucleação de alunos no transporte escolar. 2015. 57 f. Dissertação (Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, **Universidade Federal do Ceará**, Fortaleza, 2015.

NOVAES, A. G. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**: estratégia, operação e avaliação. 3ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

OSMAN, I. H.; CHRISTOFIDES, N. Capacitated clustering problems by hibrid simulated annealing and Tabu Search. **Int. Transportation Optimization Research**. v. 1. n.3. p. 317-336. Elsevier: Great Britain, 1994.

PARK, J.; KIM, B. L. The School Bus Routing Problem – A Review. **European Journal of Operational Research**. n.202, p.311–319. Elsevier, 2010.

RIPPLINGER, D. **Rural school vehicle routing problem**. Transportations Research Record. n.1992. p.105 – 110. 2005.

SCHITTEKAT, P.; KINABLE, J.; SORENSEN, K.; SEVAUX, M.; SPIEKSMASMA, F.; SPRINGAEL, J. A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection. **European Journal of Operation Research**. n.229, p.518-528. Elsevier, 2013.

SPADA, M.; BIERLAIRE, T. M. L. Decision-Aiding Methodology for the School Bus Routing and Scheduling Problem. **Transportation Science**. n.394. p.477-490. 2005.