

Utilizando Modelagem e Simulação para Avaliação do Grau de Esforço no Deslocamento de Usuários de Cadeiras de Rodas

Gleydson Alves de Brito

Programa de Pós Graduação em Informática Aplicada
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Recife, Brasil
gleydson.brito@ufrpe.br

Abstract—Ao avaliar os deslocamentos de cadeirantes, usualmente observamos fatores críticos de acessibilidade como rampas de acesso, adequação de calçadas, cruzamentos sinalizados etc. Esses pontos causam grande impacto no dia a dia desses usuários e prejudicam sua inclusão social, limitando sua autonomia. Normalmente, as condições de esforço empregado no deslocamento não são levadas em consideração no momento de planejar rotas para esse tipo de usuário. Assim, este trabalho tem o objetivo de demonstrar o impacto que rotas não otimizadas para cadeirantes podem ter em seu deslocamento. Nas simulações realizadas, em três cenários distintos, uma pessoa usuária de cadeira de rodas chegou a aplicar 50,53% a mais de força para se deslocar que um usuário não cadeirante, e a aplicação de força média ficou em torno de 38,50% maior. Dada sua baixa velocidade média de deslocamento, as simulações mostraram que seu tempo para trafegar nos mesmos trajetos é, aproximadamente, 60% maior que o tempo utilizado para usuários não cadeirantes. Esse fato se agrava ainda mais quando consideramos a biomecânica dos movimentos. Os membros superiores não são propriamente adaptados para efetuar tal esforço em comparação aos membros inferiores, uma vez que o ser humano é amplamente adaptado à forma ereta e bípede de caminhar. Muitas vezes, por aspectos estruturais, o trajeto utilizado por cadeirantes é maior que o trajeto para um usuário não cadeirante. Pois, é necessário que haja estrutura de acessibilidade disponível. Outro aspecto importante indentificado, é que trajetos com mais incidências de trechos com active e declive aumentam ainda mais a força aplicada e o trabalho realizado. O estudo também observou que, para os trechos simulados, o trabalho realizado do cadeirante ficou em média 36,45% maior.

Index Terms—modelagem, simulação, omnet++, cadeirantes, rotas, acessibilidade

I. INTRODUÇÃO

O planejamento de rotas é uma funcionalidade já muito bem incorporada ao cotidiano das pessoas. A todo momento, ferramentas de auxílio à navegação, como aplicativos Google Maps ¹, Waze ² etc, são utilizadas com o intuito de obter informações sobre rotas. Buscamos as ferramentas para descobrir trajetos menos congestionados, rotas mais rápidas, ou caminhos alternativos que diminuam nosso tempo de deslocamento. Contudo, os sistemas de navegação não são

¹<https://www.google.com.br/maps>

²<https://www.waze.com/business/>

exclusivos para obtenção de rotas para veículos motorizados. Vale ressaltar que sistemas de navegação para pedestres são de grande importância, sobretudo quando tratamos de indivíduos com restrições de mobilidade ou dificuldade de locomoção. Ferramentas que auxiliam pessoas com deficiência em seu deslocamento podem promover acessibilidade, inclusão e autonomia. Alguns estudos já buscam analisar o impacto da falta de acessibilidade e seus efeitos de exclusão social [4]. Além de facilitar o deslocamento para usuários com algum tipo de restrição de mobilidade, sistemas como estes podem ter aplicações muito relevantes em situações específicas. Hashemi [5] aborda a evacuação de emergência, propondo um modelo espacial para ambientes internos considerando requisitos específicos para pessoas com deficiência. O sistema leva em conta a existência de piso tátil, largura das portas e a existência e localização de saídas de emergência, na definição de rotas de evacuação. Sobek [6] utiliza o algoritmo de Dijkstra [13] para definir rotas para pessoas com mobilidade reduzida, avaliando três características de mobilidade: mobilidade sem ajuda; mobilidade com ajuda de bengalas ou muletas e cadeirante. Diante da relevância do tema, e das inúmeras aplicações, este trabalho visa avaliar o grau de esforço aplicado por cadeirantes em deslocamentos. O objetivo é contribuir para construção de sistemas de navegação baseados em critérios de acessibilidade para pessoas com mobilidade reduzida; demonstrando, através de simulações, o impacto de rotas não otimizadas para esse tipo de usuário.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Diversas áreas do conhecimento têm utilizado técnicas de modelagem e simulação para avaliar o comportamento de sistemas e processos. Essas técnicas permitem saber quais parâmetros têm maior ou menor impacto em determinados problemas. É possível observar o comportamento do sistema sob condições de estresse e avaliar condições de difícil obtenção no mundo real. A seguir serão apresentados alguns trabalhos da literatura que fazem uso das técnicas de modelagem e simulação para a resolução de problemas complexos. Utilizando o simulador Opportunistic Network Environment (ONE), Stewart [1] propôs um protocolo para evitar congestion-



amento de rotas em redes tolerantes a perturbações e atrasos utilizando caminhos mínimos. Esse algoritmo busca encontrar rotas diretas entre a origem e o destino, evitando congestionamento de pacotes e ajustando dinamicamente as rotas quando houver alterações na topologia da rede. Para definir rotas o algoritmo avalia constantemente dois parâmetros: a medida de proximidade e tempo de espera na fila de destino da rede. A medida de proximidade é uma função que retorna o valor 1 quando os nós possuem uma conexão entre si e 0 para nós desconectados. O tempo de espera na fila de destino da rede mede quanto tempo determinado pacote demora até chegar ao seu destino a partir de determinado nó. Quanto maior a fila de espera em um determinado nó, maior seu tempo de atingimento do destino e consequentemente maior será o congestionamento deste caminho. Cada nó possui como parâmetro o tempo estimado de entrega dos pacotes entre ele mesmo e o destino. Esses dados são guardados em uma tabela que é compartilhada por todos os nós e constantemente atualizada. Utilizando esses parâmetros o algoritmo busca o menor caminho entre dois nós tendo como base o nível de congestionamento de cada caminho.

Nurdian [2] busca aplicar o algoritmo de Dijkstra para maximizar a produção de almôndegas, otimizando o tempo de distribuição através da utilização da técnica de caminhos mínimos. O processo de produção e distribuição foi modelado e simulado utilizando AnyLogic, um software muito utilizado para modelar e simular o processo de produção industrial. A partir da construção do grafo de locais de destinação dos produtos, o algoritmo de Dijkstra é aplicado para a localização da rota com caminho mínimo entre os destinos. Esses dados são obtidos e adicionados ao modelo para realização das simulações. Com a simulação foi possível obter uma clara visão sobre os estágios do processo de produção de almôndegas e como otimizar o processo de entrega.

Faizian [7] demonstrou, através de modelagens e simulações, que com a utilização do algoritmo de k-caminhos mínimos (*k-shortest path*) [10] em Grafos Generalizados de De Bruijn (GDBG *Generalized De Bruijin Graph*), uma versão determinística dos RRG (*Random Regular Graphs*), é possível se aproximar do ponto ótimo para utilização em redes de topologia interconectada para futuros *data centers* de larga escala em relação ao RRG. RRG é um digrafo especial, onde cada nó possui o mesmo grau de entrada e saída. O trabalho avaliou a utilização do RRG em termos de diâmetro, tamanho médio dos k-caminhos mínimos e do balanceamento de carga que é quantificado pela carga máxima do link para comunicação de todos para todos os nós. Em termos da média do tamanho dos k-caminhos mínimos o RRG funciona de forma satisfatória. Porém, em relação ao diâmetro e o balanceamento de carga, não. As simulações demonstraram que o GDBG, para a maioria das configurações de redes, consegue chegar muito próximo do ótimo em relação ao diâmetro, média do tamanho dos k-caminhos mínimos e balanceamento de carga em digrafos.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreverá de forma detalhada a construção dos experimentos e a definição das métricas. Descreverá também como os dados foram obtidos e analisados, assim como a construção do modelo de simulação foi realizada.

A. Representação do problema e obtenção dos dados

O modelo para realização das simulações foi definido como um grafo $G(V, E)$, composto por um conjunto de vértices $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$, onde cada vértice v_n é ligado a outro vértice por uma aresta E . Cada nó do grafo possui suas informações de latitude, longitude e altitude, e cada par de nós possui uma aresta que os conecta e que guarda as informações de distância e nível de inclinação. O nível de inclinação é obtido pela seguinte expressão:

$$IL = (h_f - h_i)/D \quad (1)$$

Onde o nível de inclinação (IL) é dado pela razão da diferença entre a altura final (h_f), a altura inicial (h_i) e a distância D . Os dados cartográficos das coordenadas e distância foram obtidos através da plataforma Google Maps¹, utilizando uma função de medir distância. E os dados de altitude foram obtidos pela plataforma Google Earth². Para este estudo, todos os dados cartográficos foram obtidos manualmente através das plataformas supra citadas.

B. Implementação

Para a implementação, foi utilizado o framework *Omnet++*³, um framework modular, de software livre, baseado em componentes e amplamente utilizado para construir simuladores de redes de telecomunicação. Conceitualmente, uma rede de telecomunicação é um grafo, com nós interconectados que são capazes de transportar mensagens em formato de dados, denominados pacotes, de certa origem a determinado destino. Desta maneira, o framework foi adaptado para ser utilizado para a simulação do problema de deslocamento de pessoas usuárias de cadeiras de rodas, uma vez que a representação computacional é semelhante. Nesta simulação, o sinal que trafega entre os nós representará o deslocamento de pessoas, usuários ou não de cadeiras de rodas, pelo trajeto definido. Para esta implementação, foram definidos três módulos que representam os nós do problema. Um para o nó inicial, outro para o nó final, e outro para representar uma abstração dos nós intermediários. A rede foi construída com a junção dos nós por um canal (*channel*), que implementa uma classe *Edge* que armazena os atributos de conexão entre os nós.

C. Parâmetros e métricas

Para poder avaliar o esforço executado em deslocamento, algumas métricas devem ser medidas afim de que seja possível entender as diferenças existentes entre o deslocamento de uma

¹<https://www.google.com.br/maps>

²<https://earth.google.com/web/>

³<https://omnetpp.org/>

peessoa usuária de cadeiras de rodas e uma pessoa sem esta necessidade. Assim os seguintes parâmetros foram levados em consideração para uma compreensão maior do problema:

- Distância total percorrida;
- Tempo estimado do trajeto;
- Nível de inclinação do trajeto;
- Esforço aplicado;
- Trabalho.

A seguir todos os parâmetros serão detalhados para melhor compreensão:

1) *Distância percorrida*: É o somatório da distância executada entre todos os nós a partir do nó de partida até o nó de destino;

2) *Tempo estimado*: O tempo estimado da viagem é obtido a partir da razão entre o espaço percorrido e a velocidade média. Segundo Lorena [8], a velocidade média estimada para uma pessoa utilizando cadeiras de rodas manual em situação de lazer é de $0,70m/s$ ($2,52km/h$). Já Bohannon [9] identifica que uma pessoa sem necessidade de cadeira de rodas, com idade variando de 20 a 29 anos, caminha em situação normal a cerca de $1,35m/s$ ($4,85km/h$). Desta forma, essas velocidades médias foram utilizadas nas simulações como constantes.

3) *Nível de inclinação do trajeto*: O nível de inclinação é obtido a partir da Eq.(1) e é calculado entre todos os pares de nós. Esse nível de inclinação é utilizado tanto na obtenção da força aplicada, quanto para o cálculo do grau de elevação e trabalho.

4) *Esforço aplicado*: Para realizar o cálculo de esforço são necessárias as definições de algumas constantes para obtenção dos resultados. Primeiramente vamos considerar que cada indivíduo terá uma massa corporal média padrão e constante $m=75kg$. Para pessoas que utilizam cadeiras de rodas, acrescenta-se o peso médio de uma cadeira de rodas manual simples⁴, que é $15kg$, totalizando a massa de $90kg$. O cálculo do esforço dá-se pelas expressões:

$$F = p * \sin \theta + fat \quad (2)$$

A força aplicada F , grandeza vetorial medida em *Newtons*, é obtida pelo produto de $p = m * g$, onde m é a massa, e g é a aceleração da gravidade constante ($9,8m/s^2$), pelo seno do ângulo θ , somado ao fator de atrito (fat). Podemos definir o fator de atrito como:

$$fat = \mu * m * g * \cos \theta \quad (3)$$

Onde $\mu = 0.85$ é uma constante que representa o coeficiente de atrito cinético da borracha em cimento seco [11]; m , é a massa corporal; g , a aceleração da gravidade e $\cos \theta$ o cosseno do ângulo θ . Assim, aplicando as Eq.(1) e (2) podemos obter a força aplicada para deslocar uma determinada massa m por uma distância d [3]. O cálculo da força aplicada é realizado entre todos os pares de nós e acumulado para obtenção da força total aplicada em todo o trajeto.

⁴<https://www.reabilitmais.com.br/cadeira-de-rodas-manual-dobavel-em-aco-modelo-centro-1011-jaguaribe>

5) *Trabalho*: É uma grandeza física que mede transferência ou transformação de energia e sua unidade de medida é o *joule* [12]. O cálculo do trabalho pode ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$\tau = F * \Delta d \quad (4)$$

Onde trabalho τ é o produto de força F pela variação de espaço Δd . O trabalho aplicado, assim como a força, é calculado entre todos os pares de nós.

D. Definição dos cenários de simulação

Para fins destas simulações, foram utilizados três pontos de interesse que são frequentemente utilizados pelos estudantes do campus Sede da Universidade Federal Rural de Pernambuco: O Centro de Ensino de Graduação Obra-Escola (Cegoe), o Restaurante Universitário (RU) e a Biblioteca Central (BC). A partir destes pontos de interesse, 3 cenários foram definidos para serem analisados, quais sejam:

1) Cenário 1:

- Deslocamento entre o Cegoe e RU para pessoas cadeirantes e não cadeirantes;

2) Cenário 2:

- Deslocamento entre Cegoe e BC para pessoas cadeirantes e não cadeirantes;

3) Cenário 3:

- Deslocamento entre Cegoe e BC por trajeto alternativo favorável a pessoas cadeirantes;

IV. RESULTADOS

A. Cenário 1.1

O Cenário 1.1 (Fig.1) descreve o trajeto, para cadeirantes, que liga o Cegoe ao Restaurante Universitário. É composto por 12 nós e tem distância total de $677m$, com níveis de altitude variando entre 10 e 18 metros acima do nível do mar.

B. Cenário 1.2

O Cenário 1.2 (Fig.2) descreve o trajeto, para não cadeirantes, que liga o Cegoe ao Restaurante Universitário. É composto por 8 nós e tem distância total de $453m$, com níveis de altitude variando, também, entre 10 e 18 metros acima do nível do mar.

Diferente do trajeto 1.1, o trajeto 1.2 conta com menor distância, uma vez que não se faz necessário levar em consideração passeios com condições mínimas para o deslocamento com cadeiras de rodas. Assim, em alguns trajetos é possível observar que a ausência de condições mínimas para o deslocamento de pessoas com cadeiras de rodas pode gerar um esforço muito maior, se comparado às distâncias enfrentadas por pessoas não cadeirantes. Para obter uma visão mais aprofundada, serão detalhados os aspectos de aplicação de força, trabalho realizado, distância total percorrida, tempo total do trajeto e velocidade média para cadeirantes (CD) e não cadeirantes (NCD).

Em todos os trajetos do trabalho, quatro métricas principais foram analisadas: A força aplicada no deslocamento (F); O

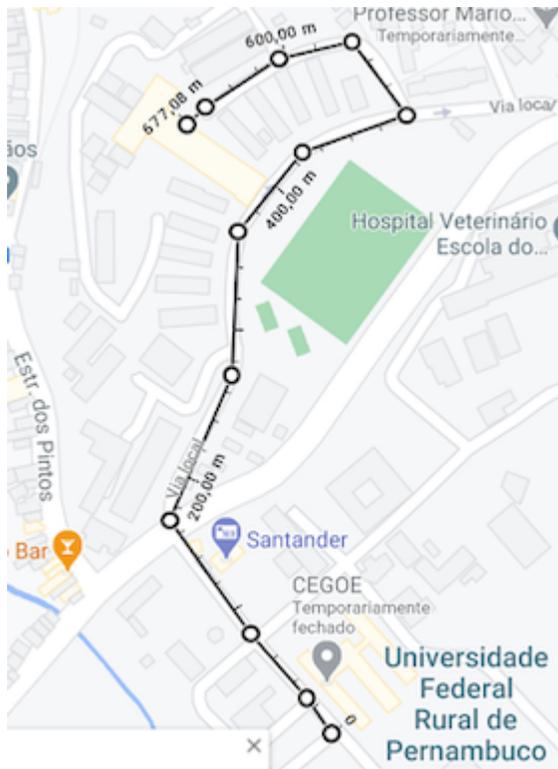


Fig. 1. Trajeto Cegoe-RU para Cadeirantes. Fonte: Google Maps

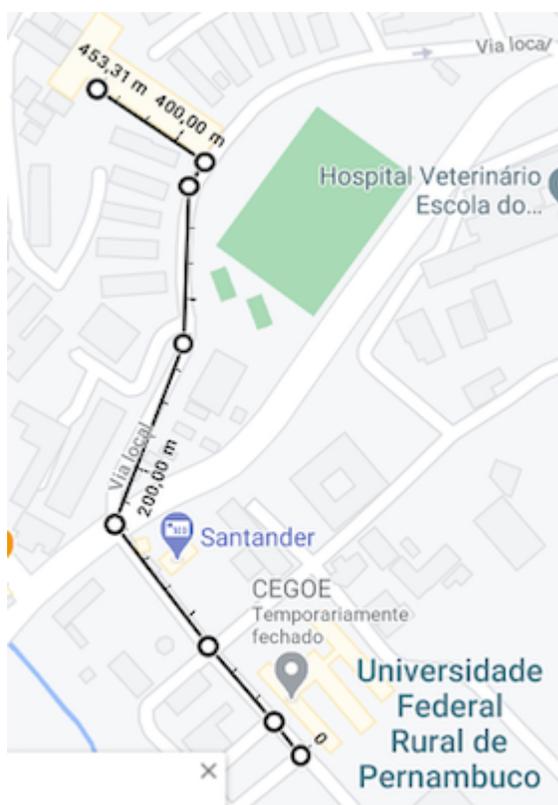


Fig. 2. Trajeto Cegoe-RU para Não Cadeirantes. Fonte: Google Maps

TABLE I
CENÁRIO 1

	$F(N)$	τJ	$D(m)$	$Time(min)$	$Vm(km/h)$
CD	9201,72	518762,32	677	16,12	2,52
NCD	4551,80	287960,91	453	5,6	4,86

trabalho realizado (τ); a distância total e o tempo total do percurso.

A partir dos dados da tabela 1 e considerando o cenário 1.1 comparado ao cenário 1.2, para alcançar o destino RU, partindo do Cegoe, pessoas cadeirantes precisam percorrer uma distância 33,04% maior em relação aos não cadeirantes; aplicam 50,53% mais força, realizando um trabalho 44,49% maior. Além de consumirem 65,28% mais tempo em relação aos não cadeirantes.

C. Cenário 2.1

O Cenário 2.1 (Fig.3) descreve o trajeto, para cadeirantes, que liga o Cegoe à Biblioteca Central. É composto por 12 nós e tem distância total de 704m, com níveis de altitude variando, também, entre 10 e 15 metros acima do nível do mar.



Fig. 3. Trajeto Cegoe-BC para Cadeirantes. Fonte: Google Maps

D. Cenário 2.2

O Cenário 2.2 (Fig.4) descreve o trajeto, para não cadeirantes, que liga o Cegoe à Biblioteca Central. É composto por 9 nós e tem distância total de 596m, com níveis de altitude variando, também, entre 10 e 15 metros acima do nível do mar.

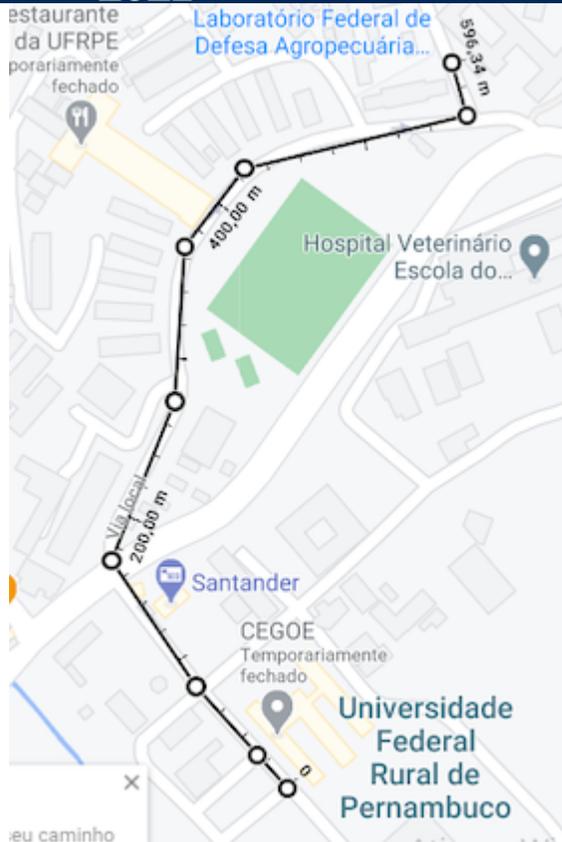


Fig. 4. Trajeto Cegoe-BC para Cadeirantes. Fonte: Google Maps

O trajeto da Fig.4, Cenário 2.2, foi propositalmente selecionado visando minimizar os níveis de aclave e declive, uma vez que passeios com esse tipo de características consomem mais energia de pessoas cadeirantes em seu deslocamento, pois é necessária a aplicação maior de força para deslocar-se em ambientes com inclinações.

A tabela 2 realiza uma descrição mais detalhada das métricas utilizadas.

TABLE II
CENÁRIO 2

	$F(N)$	τJ	$D(m)$	$Time(min)$	$Vm(km/h)$
CD	8329,76	532304,61	704	16,77	2,52
NCD	5108,00	380898,00	596	7,36	4,86

A partir dos dados da tabela 2 e considerando o cenário 2.1 comparado ao cenário 2.2, para alcançar o destino BC, partindo do Cegoe, pessoas cadeirantes precisam percorrer uma distância 15, 32% maior em relação aos não cadeirantes; aplicam 38, 68% mais força, realizando um trabalho 28, 44% maior. Além de consumirem 56, 09% mais tempo em relação aos não cadeirantes.

E. Cenário 3: Caminho alternativo

Por fim, um terceiro cenário foi estabelecido para realizar uma comparação mais equitativa entre os dois tipos

de usuários. Este cenário também liga o Cegoe à Biblioteca central, porém, atualmente não é acessível a cadeirantes. Este trajeto foi idealizado por proporcionar o melhor cenário no que se refere a níveis de inclinação para pessoas cadeirantes, e para simular o impacto quando utilizado por pessoas com cadeiras de rodas. Assim serão simulados os deslocamentos de ambos usuários neste trajeto e comparadas as métricas extraídas, bem como compararemos esse trajeto alternativo com o trajeto disponível atualmente, cenário 2.1, o trajeto atual mais bem adaptado para cadeirantes.

O Cenário 3 (Fig.5) descreve o trajeto que liga o Cegoe à Biblioteca Central para ambos usuários. É composto por 9 nós e tem distância total de 596m, com níveis de altitude variando, também, entre 10 e 15 metros acima do nível do mar, porém com uma diferença entre os demais cenários: entre quaisquer pares de nós, não há uma diferença de altitude maior que 1m.

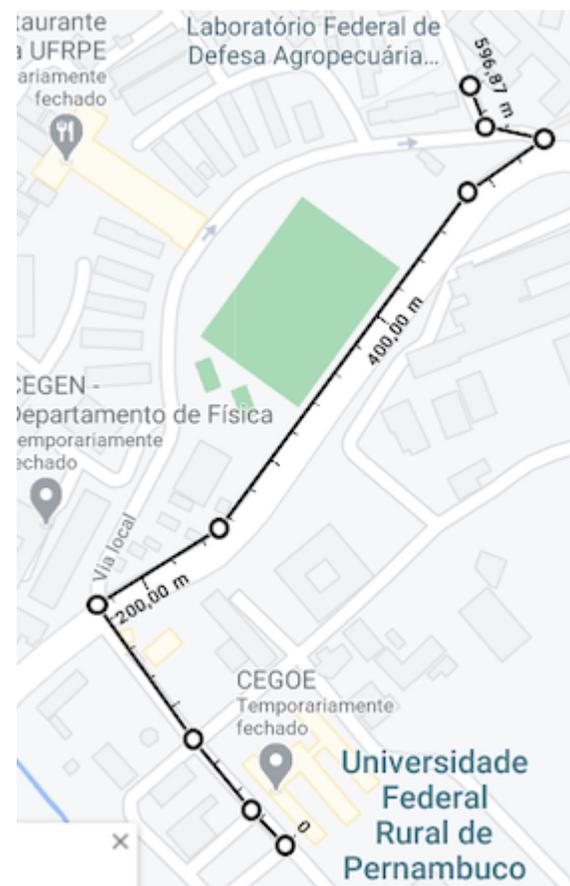


Fig. 5. Trajeto Alternativo Cegoe-BC. Fonte: Google Maps

TABLE III
CENÁRIO 3

	$F(N)$	τJ	$D(m)$	$Time(min)$	$Vm(km/h)$
CD	6103,36	451911,40	704	14,21	2,52
NCD	5086,93	376592,81	596	7,37	4,86

Com exceção da distância que era igual e do tempo total do trajeto, em que houve uma variação de 48, 15% de tempo gasto

por uma pessoa cadeirante, em relação a uma não cadeirante; todas as demais métricas variaram em 16,67%. Esse valor se deve ao fato de as métricas de força e trabalho quando aplicadas as mesmas condições, variam em função da massa. Então, como a massa considerada para o cadeirante foi de 90kg (75kg do usuário, mais 15kg da cadeira) e do usuário não cadeirante foi de 75kg, e esses valores representam uma diferença de 16,67% entre si, esse percentual permaneceu constante em todas as outras métricas.

Por fim, uma comparação entre o cenário 2.1 e o cenário 3, ambos para pessoas cadeirantes, foi realizada para avaliar o impacto da adoção de caminhos mais eficientes e adequados para esse tipo de usuário. A tabela 4 traz um resumo das métricas coletadas.

TABLE IV
COMPARATIVO: CENÁRIO 2.1 X CENÁRIO 3

	$F(N)$	τJ	$D(m)$	$Time(min)$	$Vm(km/h)$
CD2.1	8329,76	532304,61	704	16,77	2,52
CD3	6103,36	451911,40	704	14,21	2,52

Considerando mesma origem e destino, e analisando um trajeto mais adequado para pessoas cadeirantes, pudemos observar que ao se deslocar em uma rota não otimizada (cenário 2.1) o usuário aplicou 23,73% a mais de força total, com um trabalho aplicado 15,10% maior. Percorreu uma distância 15,34% mais longa e levou cerca de 15,27% a mais de tempo total no percurso.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A partir de todas as simulações realizadas, foi possível constatar que usuários de cadeira de roda aplicam muito mais força e trabalho em seus deslocamentos que usuários não cadeirantes. Embora empiricamente essa conclusão pareça óbvia, analisando os dados obtidos com as simulações podemos ter maior dimensão do quão diferente é o cenário para cada tipo de usuários. Desta forma, o grande objetivo do trabalho é mostrar o impacto que rotas não otimizadas têm no deslocamento de usuários de cadeiras de rodas. A partir do momento em que não há rotas otimizadas, a distância entre os pontos de interesse pode aumentar consideravelmente, uma vez que é necessário buscar pontos acessíveis para efetuar os deslocamentos. Como a velocidade média dos cadeirantes é reduzida, em comparação aos demais usuários, nota-se que é de suma importância buscar minimizar os trajetos proporcionando pontos de acessibilidade adequados que possam encurtar as distâncias, sempre que possível. Outras questões a se avaliar, ao considerar pontos de acessibilidade e os trajetos de modo geral, é a minimização dos níveis de inclinação no trajeto.

Para trabalhos futuros, são sugeridas a adoção de outras métricas não consideradas neste trabalho, a exemplo da quantidade e localização das rampas de acesso, e a consideração da qualidade da infraestrutura de calçadas. Outra questão a ser explorada é a utilização dos fatores de aleatoriedade das ferramentas de simulação. Gerando um grafo completo com todas as suas conexões, é possível, inclusive, extrair

pontos deficientes em relação à acessibilidade. É possível identificar quais pares de ponto de interesse não conseguem estabelecer conexões entre si na atual infraestrutura disponível. Mais uma questão que fica evidente com as simulações é o grande número de objetivos que precisam ser otimizados para a geração de rotas eficientes levando em conta a distância, tempo, níveis de inclinação, qualidade das vias de acesso, pontos de acessibilidade etc. Desta maneira, Algoritmos de caminhos mínimos como Dijkstra [13] não são eficientes, uma vez que trabalham com um único objetivo. Dada a complexidade de otimização de múltiplos objetivos, heurísticas, como algoritmos evolucionários e algoritmos multi objetivos [14] [15] [16] [17], são fortes candidatos para resolução deste problema.

REFERENCES

- [1] STEWART, Michael et al. CASPaR: Congestion avoidance shortest path routing for delay tolerant networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 13, n. 11, p. 1550147717741264, 2017.
- [2] NURDIAN, Risky Agung et al. Pemodelan Simulasi Produksi Bakso dan Sistem Distribusi. *Jurnal Technopreneur*, v. 8, n. 1, p. 59-64, 2020.
- [3] RAHAMAN, Mohammad Saiedur et al. CAPRA: A contour-based accessible path routing algorithm. *Information Sciences*, v. 385, p. 157-173, 2017.
- [4] CHEN, Na; AKAR, Gulsah. How do socio-demographics and built environment affect individual accessibility based on activity space? Evidence from Greater Cleveland, Ohio. *Journal of Transport and Land Use*, v. 10, n. 1, p. 477-503, 2017.
- [5] HASHEMI, Mahdi; KARIMI, Hassan A. Indoor spatial model and accessibility index for emergency evacuation of people with disabilities. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 30, n. 4, p. 04015056, 2016.
- [6] SOBEK, Adam D.; MILLER, Harvey J. U-Access: a web-based system for routing pedestrians of differing abilities. *Journal of geographical systems*, v. 8, n. 3, p. 269-287, 2006.
- [7] FAIZIAN, Peyman et al. Random Regular Graph and Generalized De Bruijn Graph with k -Shortest Path Routing. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, v. 29, n. 1, p. 144-155, 2017.
- [8] DE FREITAS PEREIRA, Lorena et al. Condições de Caminhabilidade de cadeirantes na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).
- [9] BOHANNON, Richard W.; ANDREWS, A. Williams. Normal walking speed: a descriptive meta-analysis. *Physiotherapy*, v. 97, n. 3, p. 182-189, 2011.
- [10] YEN, Jin Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. *management Science*, v. 17, n. 11, p. 712-716, 1971.
- [11] GIANSANTE, Daniel Bruno Zanini. ESTUDO DE UM MANIPULADOR DE PNEUS DE CAMINHÃO PARA MINERAÇÃO. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [12] HELERBROCK, Rafael. "Trabalho de uma força"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/trabalho-uma-forca.htm>. Acesso em 02 de março de 2021.
- [13] DIJKSTRA, Edsger W. et al. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269-271, 1959.
- [14] BARCZY SZYN, Guilherme L. et al. A collaborative system for suitable wheelchair route planning. *ACM Transactions on Accessible Computing (TACCESS)*, v. 11, n. 3, p. 1-26, 2018. <https://doi.org/10.1145/3237186>
- [15] CONWAY, Matthew Wigginton; STEWART, Anson F. Getting Charlie off the MTA: a multiobjective optimization method to account for cost constraints in public transit accessibility metrics. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 33, n. 9, p. 1759-1787, 2019. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.160507>
- [16] GAZAWA, Frédéric Guidana et al. An Evolutionary Algorithm Coupled to an Outranking Method for the Multicriteria Shortest Paths Problem. *American Journal of Operations Research*, v. 9, n. 03, p. 114, 2019. <https://doi.org/10.4236/ajor.2019.93007>
- [17] ZHU, Siying; ZHU, Feng. Multi-objective bike-way network design problem with space-time accessibility constraint. *Transportation*, v. 47, n. 5, p. 2479-2503, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11116-019-10025-7>