

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO
TRÁFEGO DE ASCENSORES UTILIZANDO SISTEMA
A EVENTOS DISCRETOS

Clebes André da Silva

[IFG] & [PPGTPS]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
25 de outubro de 2021

INSTITUTO FEDERAL DE GOIÁS
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE
PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO
TRÁFEGO DE ASCENSORES UTILIZANDO SISTEMA
A EVENTOS DISCRETOS

Clebes André da Silva

Dissertação apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Goiás (IFG), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto e coorientação do Prof. Dr. Márcio Rodrigues da Cunha Reis.

[IFG] & [PPGTPS]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
25 de outubro de 2021

S586e Silva, Clebes André.

Modelagem, simulação e otimização do tráfego de ascensores utilizando sistema a eventos discretos / Clebes André Silva. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2021.

90 f: il.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto.

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Rodrigues da Cunha Reis.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Pró-Reitoria de Pós-Graduação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Sistemas eventos discretos. 2. Ascensores de transporte – tráfego de indivíduos. 3. Modelagem e simulação. I. Calixto, Wesley Pacheco (orientador). II. Reis, Márcio Rodrigues da Cunha (coorientador). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 519.2

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.
Sistemas a eventos discretos

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input checked="" type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Clebes André da Silva

Matrícula: 20182011140135

Título do Trabalho: **MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO TRÁFEGO DE ASCENSORES UTILIZANDO SISTEMA A EVENTOS DISCRETOS**

Autorização - Marque uma das opções

- Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
- Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ___/___/_____ (Embargo);
- Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- O documento está sujeito a registro de patente.
 O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
 Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Local _____, Goiânia, 25 / 10 / 2021.
Data

Clebes André da Silva

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

PARECER 15/2021 - GYN-CMTPS/GYN-DPPGE/CP-GOIANIA/IFG

**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CÂMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS**

CLEBES ANDRÉ DA SILVA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO TRÁFEGO DE ASCENSORES UTILIZANDO SISTEMA A EVENTOS
DISCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Energias Renováveis e Engenharia Econômica Aplicada.

Aprovada em: 26/08/2021

Presidente e Orientador: Prof. Dr. Wesley Calixto Pacheco – PPGTSP IFG

Coorientador: Dr. Márcio Rodrigues da Cunha Reis – ENGPROD/IFG Câmpus Senador Canedo

Avaliadora: Prof.^a Dr.^a Viviane Margarida Gomes – UFG

Avaliador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Bento Ribeiro – IFG Câmpus Senador Canedo

Avaliador: Prof. Dr. Aylton José Alves – PPGTSP IFG

Documento assinado eletronicamente por:

- Viviane Margarida Gomes, VIVIANE MARGARIDA GOMES - DOCENTE - UFG (01567601000143), em 21/10/2021 09:34:37.
- Wesley Pacheco Calixto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/09/2021 10:39:47.
- Aylton Jose Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/09/2021 12:16:15.
- Marcio Rodrigues da Cunha Reis, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/09/2021 07:52:16.
- Luiz Eduardo Bento Ribeiro, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 21/09/2021 19:21:32.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 24/08/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 193245

Código de Autenticação: 1d9b202eb3



“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para achar as que estão certas”.

CARL SAGAN

*A minha esposa Flávia, minhas filhas Rafaela, Natalia e
minha Mãe, pois sem o apoio delas eu não chegaria até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, sinceramente ao meu orientador Wesley Pacheco Calixto, pelos conhecimentos transmitidos, a competência, pela confiança, paciência e amizade.

Aos meus colegas e amigos, Luciano Eduardo, Letícia Chaves, Danilo Fernando, pelas dicas de programação, apoio e sugestões ao longo do trabalho.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Goiás(FAPEG) pelo apoio financeiro deste trabalho. A todos os membros do NEXT (IFG).

A minha família, pelo constante apoio e pela paciência em todos os momentos.

A todos que diretamente ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho propõe aplicação de métodos numéricos para simular e otimizar o tráfego de ascensores, minimizando o tempo de espera nas filas. Sistemas a eventos discretos para simular o sistema real de ascensores e o algoritmo de Força Bruta para otimizar os parâmetros do tráfego. Realiza-se comparação do consumo de energia elétrica antes e após a aplicação da metodologia de otimização. Os resultados obtidos são comparados com as diretrizes da Norma Brasileira de Regulamentação, indicando que a metodologia proposta é eficaz para minimizar as filas de espera nas portas dos ascensores. O estudo de caso foi realizado em edifício público na cidade de Goiânia e o processo de otimização obteve redução de $\approx 44\%$ no tempo de espera nas filas e acréscimo de $\approx 4\%$ no consumo de energia.

MODELING, SIMULATION AND OPTIMIZATION OF LIFT TRAFFIC USING A DISCRETE EVENT SYSTEM

ABSTRACT

This work proposes the application of numerical methods to simulate and optimize elevator traffic, minimizing waiting time in queues. Discrete event systems to simulate the real elevator system and the Brute Force algorithm to optimize traffic parameters. A comparison of electricity consumption is carried out before and after the application of the optimization methodology. The results obtained are compared with the directives of the Brazilian Regulatory Standard, indicating that the proposed methodology is effective in minimizing the waiting lines at the elevator doors. The case study was carried out in a public building in the city of Goiânia and the optimization process resulted in a reduction of $\approx 44\%$ in waiting time in lines and an increase of $\approx 4\%$ in energy consumption.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	23
CAPÍTULO 2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO	27
2.1 Sistema e modelo	27
2.1.1 Teoria das Filas	28
2.2 Sistema a eventos discretos	29
2.3 Simulação	31
2.3.1 Software de simulação do sistema a eventos discretos	32
2.4 Sistemas vertical em construções	33
2.5 Considerações	37
CAPÍTULO 3 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO	39
3.1 Otimização	39
3.2 Métodos de otimização	40
3.2.1 Métodos determinísticos	40
3.2.2 Métodos heurísticos	41
3.3 Método de otimização força bruta	41
3.4 Parâmetros do modelo de ascensores	43
3.5 Considerações	43
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA	45
4.1 Contextualização	45
4.2 Coleta de dados	46
4.3 Construção do simulador	47
4.4 Testes, validação e aplicação do processo de otimização	48
4.5 Análise do consumo de energia	48

4.6	Considerações	49
CAPÍTULO 5 RESULTADOS		51
5.1	Ambiente para estudo de caso	51
5.2	Coleta de dados para o estudo de caso	55
5.3	Construção do simulador e validação do modelo com o sistema	58
5.4	Obtenção da configuração utilizando processo de otimização	64
5.5	Comparação entre as configurações	65
5.6	Análise do consumo de energia	66
5.7	Discussão	67
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO		69
6.1	Contribuição do trabalho	70
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	70
APÊNDICE A Rotina do Matlab		71
APÊNDICE B Matriz probabilidade		79
APÊNDICE C Probabilidade dos ascensores		81
APÊNDICE D Parâmetros da função de densidade de probabilidade de Weibull.		83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		85

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Elementos de fila.	29
2.2 Elementos de representação do sistema a eventos discretos.	31
2.3 Trajetória típica do sistema a eventos discretos.	31
2.4 Ascensor do Chiado – Rua do Crucifixo/Portugal: (a) no ano de 1892 e (b) no ano de 1987.	34
2.5 Tecnologia empregada nos ascensor: (a) hidráulico e (b) elétrico.	36
3.1 Processo de otimização.	40
3.2 Fluxograma do método força bruta.	42
4.1 Modelo de formação de fila para um ascensor.	45
4.2 Fluxograma da metodologia proposta.	46
4.3 Matrizes de configuração.	47
5.1 Fórum Dr. Heitor Moraes Fleury.	51
5.2 Fluxograma do Fórum nos andares Térreo ao 4º.	52
5.3 Fluxograma do Fórum nos andares 5º ao 8º.	53
5.4 Fluxograma do Fórum nos andares 9º ao 12º.	53
5.5 Esquemático dos corredores do andar Térreo do Fórum.	54
5.6 Portas do Ascensor 1 e Ascensor 2 no Fórum Dr. Heitor Moraes Fleury.	54
5.7 Estratégia adotada pela gestão do Fórum.	55
5.8 Estratégia utilizada para a coleta de dados.	56
5.9 Curva de utilização dos ascensores.	57

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1	Resumo da NBR 5665. 37
5.1	Representação matricial da configuração apresentada na Figura 5.7, configuração C_0 59
5.2	Teste de aderência nos tempos de espera de cada ascensor. 60
5.3	Valores coletados e simulados da matriz de configuração C_0 60
5.4	Matriz de configuração C_1 61
5.5	Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_1 61
5.6	Matriz de configuração C_2 62
5.7	Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_2 62
5.8	Matriz de configuração C_3 62
5.9	Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_3 63
5.10	Matriz de configuração C_H 63
5.11	Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_H 63
5.12	Matriz de configuração C_{Ot} 65
5.13	Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_{Ot} 65
5.14	Resumo dos dados obtidos das configurações. 66
5.15	Análise das configurações \times consumo de energia. 67

LISTA DE SÍMBOLOS

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5, \epsilon_6$	–	Ascensores
λ	–	Taxa de chegada
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	–	Escadas de emergência
Cap	–	Carga nominal do ascensor
D_{total}	–	Demanda do ascensor
DEV	–	Demanda específica em viagem
E_1, E_2, E_3	–	Eventos
$F(X)$	–	Função de avaliação
$F(X^*)$	–	Valor otimizado da Função de avaliação
$F(T_{max})$	—	Função de avaliação
m	–	número de possíveis soluções
n	–	Número de eventos
N	–	Numero de ascensores
P	–	Probabilidade de chegada
$P_{standby}$	–	Potência do elevador em standby
POP_i	–	População de cada andar
T	–	Tempo
t_0, t_1, t_2, t_3	–	Instantes de tempo
TI	–	Intensidade de tráfego
T_m	–	Tempo máximo que o passageiro pode esperar pelo ascensor
$T_{máximo}$	–	Vetor com maior tempo de espera
$\overline{t_{max}}$	–	Média dos máximos dos tempos de espera
$\overline{t_{min}}$	–	Média das médias dos tempos de espera
$\overline{M_\sigma}$	–	Média dos desvios padrões dos tempos de espera
$t_{movimento}$	–	Tempo que o ascensor passa em movimento por dia
$t_{standby}$	–	Tempo em que o ascensor está parado por dia
ν	–	Velocidade nominal do ascensor
X	–	Vetor com todos os parâmetros
X_1, X_2, X_3	–	Estados do sistema
\vec{x}	–	Vetor contento as variáveis de entrada

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	–	Algoritmo Genético
CO ₂	–	Dióxido de carbono
FIFO	–	First in, first out
FDP	–	Funções de densidade de probabilidade
LIFO	–	Last in, first out
GPSS	–	General purpose simulation system
NBR	–	Norma Brasileira de Regulamentação
SIRO	–	Serve in random order
THV	–	Algoritmo de tráfego horizontal e vertical

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Ascensores são equipamentos utilizados para transporte vertical em construções com a finalidade de abrigar atividades humanas. Em edifícios residenciais, estes equipamentos ficam na maior parte do tempo estacionados. No entanto, em edifícios comerciais e departamentos públicos, a demanda por este tipo de transporte é alta (RAMOS, 2009).

Nas grandes cidades, parte dos serviços públicos em fóruns, hospitais, prefeituras e outros, já apresentam congestionamentos nos embarques e desembarques dos usuários. Filas são formadas nos horários de maior fluxo ocasionando transtornos aos usuários e funcionários (FORERO, 2011). A fila de espera forma-se em função do desequilíbrio entre a procura pelo serviço e a capacidade do sistema em provê-lo. Ritzman e Krajewski (2003), observam que frequência nos problemas de filas estão relacionados à imprevisibilidade de chegada dos clientes e a variação da taxa de prestação do serviço. A maior parte dos estudos sobre filas são iniciados para solucionar problemas práticos decorrentes do avanço tecnológico e da elevada concentração humana em áreas urbanizadas.

Existem concepções de fila de espera claramente distintas conforme características do serviço prestado (IGLESIAS,). O estudo do comportamento das filas possibilita analisar como mudanças no sistema pode ajudar a diminuir o tempo de espera em serviços, até mesmo realizar previsões nos sistemas (BARBOSA et al., 2009). A busca pela redução do tempo de espera no atendimento e a eliminação de atividades que não agregam valor, aumentam a qualidade e reduz a utilização de recursos da organização.

O sistema de elevador pode ser estudado através da teoria de sistemas a eventos discretos, tornando o trabalho de modelagem mais fácil de ser analisado e otimizado. Cassandras e Lafortune (2007) definem sistema a evento discreto como sendo o sistema que possui estados discretos, orientados em eventos e a evolução dos estados depende da ocorrência destes eventos ao longo do tempo. Na simulação de evento discreto, as variáveis de estado modificam-se apenas pela ocorrência de novos eventos. Estes eventos ocorrem instantaneamente em pontos separados no tempo (COELHO et al., 2009).

A teoria de sistemas a eventos discretos possui vasta utilização por sua capaci-

dade de utilizar o modelo no processo de otimização. Sobral (2011) desenvolvem método de otimização intitulado método **sobe e desce** em sistemas de ascensores. Os autores afirmam que se a informação dos andares de destino dos passageiros é definida antes que eles ingressem na cabine, o método otimiza o tempo gasto nas paradas, melhorando o sistema. Os testes com o método **sobe e desce** compara o desempenho de duas funções de distribuição de rotas, utilizando o mesmo modelo do sistema de ascensores. A comparação apresenta a existência de rotas mais ágeis que as convencionais, melhorando a eficiência com relação ao sistema implantado.

Cortés et al. (2004) avaliam os sistemas de ascensores e identificam que o tempo de espera é o objetivo prioritário para alcançar eficiência no desempenho do sistema. O tempo de espera é considerado o tempo de espera no hall mais o tempo de viagem no interior do elevador. Barney e Al-Sharif (2003) minimizam o tempo de espera no sistema de ascensores utilizando o **algoritmo de tráfego horizontal e vertical** (THV). Este algoritmo é usado em grupo de dois ou três elevadores e envia a chamada ao elevador mais próximo e na direção adequada para a viagem. O algoritmo THV leva sem interrupções, os passageiros aos andares mais altos e depois desce pegando os passageiros nos andares mais baixos. Esta ação aumenta a espera e a circulação nas escadas dos andares mais baixos e durante o tráfego nos andares mais altos, os elevadores saturam a sua capacidade.

A Norma Brasileira de Regulamentação NBR 5665 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta o cálculo do tráfego nos elevadores (ABNT, 1983). A NBR 5665 trata das condições mínimas exigíveis para o tráfego dos elevadores de passageiros, aplicando-se a todos os elevadores de transporte de pessoas. Ela trata especificamente da lotação das cabines, capacidade de tráfego, tempo de aceleração e desaceleração, tempo total de viagem, tempo de abertura e fechamento de portas, capacidade de transporte, número de paradas e intervalo de tráfegos.

Compreender o funcionamento dos elevadores é necessário para estimar o consumo de energia elétrica dos edifícios. No Brasil existem várias tecnologias de diversas épocas e os elevadores elétricos são os mais utilizados nos edifícios modernos, sendo consumidos de 3% a 10% do total de energia do edifício (ISIDRO, 2010). De acordo com Troller (2015), existem no Brasil mais de 280 mil elevadores em operação, levando em conta as projeções de aumento da população, tem-se relativo aumento no consumo de energia. Seguindo modelos implantados em outros países, Troller (2015) indica a necessidade das agências reguladoras criarem normas de regulação e fiscalização do consumo destes equipamentos, criando mercado mais eficiente.

Os ascensores são responsáveis por parcela significativa da energia consumida no mundo. Em média, mais de um terço da energia consumida mundialmente vai para os edifícios e os ascensores fazem parte desta conta. O consumo energético dos ascensores resulta em impacto direto no consumo total de energia elétrica do edifício. Os ascensores têm elevado o potencial de eficiência energética e podem contribuir indiretamente, com o decréscimo das emissões de CO_2 (ISIDRO, 2010). Edifícios novos são concebidos levando em consideração as premissas da eficiência em todos os aspectos do projeto. Os edifícios existentes, a maneira de torná-los mais econômicos no uso da energia elétrica, é através de medidas de conservação de energia que vão desde a adequação dos hábitos e rotinas de ocupação e usos, até intervenções ou trocas de equipamentos ou sistema (SERAFIN, 2010).

Troller (2015) afirma que os ascensores antigos continuam exercendo a sua função de forma satisfatória e segura. Os transtornos ocasionados, o custo do equipamento e as poucas vantagens percebidas pelo consumidor, desestimulam a modernização de ascensores antigos, resultado disto é que existem equipamentos de todos os modelos produzidos nas últimas décadas ainda operando regularmente, reduzindo a eficiência energética e o conforto. Isidro (2010) verifica a possibilidade de catalogar os ascensores por classe de consumo e conhecer o seu consumo específico de energia.

A identificação da classe de consumo e a otimização do tempo de espera possibilita a melhoria da eficiência com ganhos reais com vista a redução do consumo energético. A eficiência energética não só contribui para a redução da fatura de consumo das edificações, como beneficia a sociedade pela manutenção dos ecossistemas e dos recursos naturais, redução da poluição, menor emissão de gases do efeito estufa, disponibilidade de eletricidade para fins mais nobres e o conseqüente desenvolvimento econômico por alocação dos recursos e aumento da competitividade de bens e serviços.

Vários pesquisadores têm estudado o problema das filas e dos serviços prestados em edifícios públicos e privados (SOBRAL, 2011; STRAKOSCH; CAPORALE, 2010). Considerando a relevância que os ascensores têm para os edifícios com elevado fluxo de pessoas, qualidade no atendimento dos usuários e a redução no consumo energético, torna-se importante a implementação de modelo que leve em conta o tempo de chegada e saída dos usuários aos postos de atendimento, justificando este trabalho.

A melhoria na eficiência dos ascensores está relacionada com o decréscimo de tempo de espera e locomoção, garantindo assim as condições de trabalho e as exigências na qualidade do atendimento aos usuários. Conhecendo o problema e algumas fer-

ramentas, pode-se formular a hipótese primária: se é possível modelar o sistema de ascensores e se é possível simular este sistema de forma a validá-lo, então é possível otimizar o fluxo, a topologia e o consumo energético garantindo melhoria na eficiência de todo o sistema.

O objetivo geral deste trabalho é a criação de simulador de múltiplos ascensores para análise do tráfego de indivíduos, otimização e previsão do tempo de espera. Ainda como objetivos específicos têm-se: i) minimização do tamanho das filas de espera por ascensores, na tentativa de melhorar a prestação de serviço, ii) análise dos elementos passivos (filas) e ativos (processadores/servidores) deste sistema, iii) desenvolvimento de metodologia para simulação dos elementos passivos e ativos utilizando sistema a eventos discretos, iv) utilização de método heurístico na tentativa de encontrar a melhor configuração/topologia que minimize os tempos de espera e v) apresentação dos resultados da economia de energia antes e após o sistema ser otimizado.

Este trabalho está organizado em seis capítulos: no Capítulo 2 é abordado o tema de modelagem e simulação, apresentando os modelos e o simulador. No Capítulo 3 é apresentado o processo de otimização e no Capítulo 4 é descrita a metodologia utilizada neste trabalho. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e a análise dos dados e no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Este capítulo descreve de forma sucinta a definição de sistema, modelo e teoria de filas para o entendimento de sistema a eventos discretos e simulação. Apresenta ainda os softwares normalmente utilizados em simulação de sistema a eventos discretos. Apresenta brevemente o histórico dos ascensores com os tipos que existiram e os que existem hoje com as tecnologias atuais.

2.1 Sistema e modelo

Sistema é o conjunto de partes que interagem entre si visando o objetivo comum. No sistema, sempre há relação de causa e efeito entre as variáveis de entrada e saída que é produzida pela interação entre as partes (CHWIF; MEDINA, 2014). O sistema pode conter ou ser contido em outro sistema específico, sendo a combinação de atributos básicos que o torna sistema. Normalmente, o sistema possui estrutura organizacional limitada para estabelecer relacionamentos internos e externos. De acordo com (MOBUS et al., 2015), os atributos são universais, incluindo: i) totalidade, ii) composição, iii) organização interna e iv) organização externa.

Na propriedade **totalidade**, a coesão interna entre os elementos limitados por fronteiras, pode ser concreta, porosa, difusa ou conceitual. Para determinar o conteúdo de entrada e saída do sistema, existem condições de contorno, que são responsáveis pela troca controlada de materiais, energia e mensagens com outros sistemas (MOBUS et al., 2015; GOMES, 2020). A propriedade **composição** refere-se aos elementos e interações que compõem o sistema. Os elementos ou componentes são geralmente subsistemas, que são considerados entidades com interações potenciais representadas por suas condições de contorno e podem ser considerados caixa preta (com estrutura interna desconhecida). Cada tipo de componente possui sua própria singularidade, denominada personalidade, que representa a habilidade específica de interagir com outros tipos de componentes (MOBUS et al., 2015; GOMES, 2020).

A propriedade **organização interna** do sistema está relacionada à forma como a estrutura desempenha determinada função ou processo. Embora a estrutura esteja relacionada a padrões que persistem ao longo do tempo, a organização refere-se à dinâmica estabelecida internamente. Na propriedade **organização externa**, o sistema interagem de várias maneiras, estabelecendo conexões ascendentes, descendentes, horizontais e externas com sistemas semelhantes ou diferentes que pertencem

à mesma unidade (WILSON, 2014; GOMES, 2020).

Para modelar o sistema é necessário representá-lo de forma simplificado com as diferentes interações entre suas partes. Assim, por definição, o **modelo** consiste na abstração da realidade, tendo comportamento aproximado do sistema real e sendo mais simples que ele. O modelo é a representação de parte limitada do universo que pode interagir com o mundo externo através das fronteiras que o delimitam (CURY, 2001). Desta forma, o modelo é a representação por meio da qual são analisadas características importantes do sistema real. Se o modelo representar o sistema de forma adequada, vários estudos e análises podem ser realizados utilizando o próprio modelo, sem o custo, risco ou inconveniência da manipulação do sistema real. O modelo é capaz de representar o sistema real quando dado o mesmo conjunto de entradas, fornece o mesmo conjunto de saídas do sistema real modelado.

Ao criar o modelo do sistema real é necessário determinar seu escopo/abrangência, definindo quais os elementos e interações devem ser consideradas (GOMES, 2018). O grau de abstração utilizado deve ser suficiente para modelar o sistema real com todos os detalhes necessários, sem que sejam abordadas particularidades que nada contribuam para a observação do comportamento do sistema real modelado.

2.1.1 Teoria das Filas

O estudo das filas inicia-se em 1908 em Copenhague com Agner Krarup Erlang, estudando circuitos telefônicos. As filas são constituídas a partir de certa população, na qual surgem clientes que formam grupo e que aguardam por algum tipo de serviço (PRADO, 2004). Quando as filas passam de determinado tamanho considerado aceitável, diz-se que o sistema está congestionado. No sistema congestionado, a qualidade e a produtividade do serviço prestado tende a diminuir e o custo total da operação tende a crescer (ANDRADE, 2010).

O termo cliente/entidade é utilizado de forma genérica e pode designar tanto pessoa ou objeto que espera por atendimento. O atendimento é constituído por servidores/atendentes/canais de serviço. A característica de determinada fila influencia diretamente no serviço prestado ao cliente. Se em determinado tipo de fila, o modo de atendimento, a estrutura do sistema/balanceamento dos atendentes não seja adequado ao serviço prestado ao cliente, pode ocorrer aumento no tempo de espera na fila (ANDRADE, 2010).

O processo de chegada na fila pode ser definido como o intervalo de chegadas entre

cada cliente. Para a obtenção deste dado deve ser realizado a medição e o levantamento estatístico para inferir a distribuição de probabilidades que melhor se adequa aos dados coletados (HILLIER; LIEBERMAN, 2013). A Figura 2.1, adaptada de Prado (2004), ilustra os elementos que compõem a fila. Segundo Arenales et al. (2007), a disciplina da fila, de modo geral é a ordem em que os clientes são atendidos. Esta ordem pode ser descrita como: i) ordem de atendimento no qual o primeiro que chega é o primeiro a ser atendido (*first in, first out* – FIFO), ii) ordem de atendimento no qual o último que chega é o primeiro a ser atendido (*last in, first out* – LIFO) e iii) ordem de atendimento aleatória no qual o atendimento independe da ordem de chegada (*serve in random order* – SIRO).

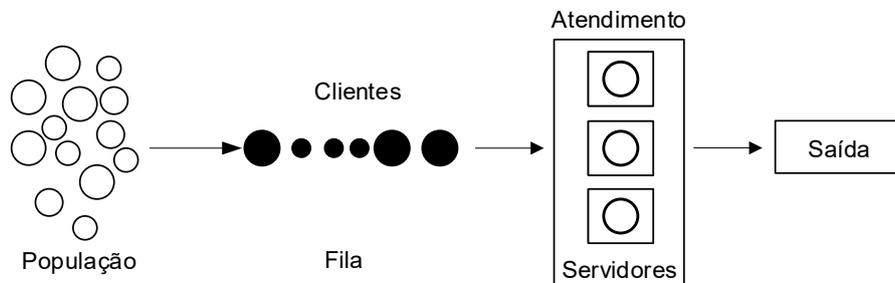


Figura 2.1 - Elementos de fila.

2.2 Sistema a eventos discretos

De acordo com Costa (2005) sistema a eventos discretos é definido como sistema cuja evolução dinâmica depende da ocorrência de eventos. O conceito de evento é caracterizado como algo sem duração e única causa possível para as mudanças de estado. Entretanto, no sistema a eventos discretos, as mudanças de estado ocorrem estritamente no conjunto enumerável de instantes de tempo. Já a ocorrência de eventos podem ser identificados como ação proposital ou o resultado da verificação de determinada condição. Os eventos produzem mudanças de estado e de modo geral, ocorrem em instante de tempo irregulares. São exemplos de eventos o início e o término de dada tarefa (mas não sua execução), a chegada de um cliente na fila ou a recepção de uma mensagem no sistema de comunicação.

A natureza discreta dos sistemas a eventos discretos faz com que os modelos matemáticos convencionais, baseados em equações diferenciais, não sejam adequados

para tratá-los. Por outro lado, a sua importância faz com que seja altamente desejável encontrar soluções para problemas relacionados ao seu controle. Em razão disto, existe intensa atividade de pesquisa voltada para a busca de modelos matemáticos adequados à sua representação (ZILLER, 1993).

Cury (2001) escreve o sistema a eventos discretos como sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência de eventos físicos, em intervalos de tempo em geral irregulares e desconhecidos. O sistema a eventos discretos pode ser definido por três características básicas: i) ciclo de funcionamento descrito através de encadeamento de eventos que determinam as tarefas realizadas ou em realização, ii) ocorrência de eventos discretos simultaneamente, isto é, vários eventos podem ocorrer ao mesmo tempo para alterar o estado do sistema e iii) necessidade de sincronização, pois para que a evolução dinâmica seja correta, o início de certos eventos requer o término dos outros na mesma entidade. De acordo com Cassandras et al. (1995) o sistema a eventos discretos contempla-se de duas propriedades básicas: i) o espaço de estado é o conjunto discreto e ii) o mecanismo de transição dos estados é orientado em evento.

Quando o espaço de estado¹ no sistema é, naturalmente, descrito por conjunto discreto como $(0, 1, 2, \dots)$, e transições de estado são apenas observados em pontos discretos no tempo, estas transições de estado com eventos é denominado sistema a eventos discretos (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2007). Na perspectiva da simulação em eventos discretos os elementos constituintes do sistema podem ser descritos como: i) entidades que representam os componentes e a força de trabalho do sistema, ii) atributos que se referem às características das entidades, iii) estado do sistema em qualquer instante é especificado pelos atributos das entidades do sistema e pelas relações entre as entidades naquele instante e iv) atividade que é o processo que ocasiona mudança no estado do sistema.

Os elementos constituinte do sistema definem quem, onde, quando e como são processados os modelos, como ilustrado na Figura 2.2, adaptada de Chwif e Medina (2014). A ocorrência entre dois eventos consecutivos, faz com que o sistema permaneça em determinado estado. A ocorrência do evento ocasiona a transição/mudança de estado no sistema, de forma que sua evolução no tempo pode ser representada pela trajetória percorrida no espaço de estados, como ilustrado na Figura 2.3, adaptada de Chwif e Medina (2014).

¹Modelo matemático de sistema físico composto de conjunto de variáveis de entrada, de saída e de estado relacionadas entre si por meio de equações diferenciais de primeira ordem.

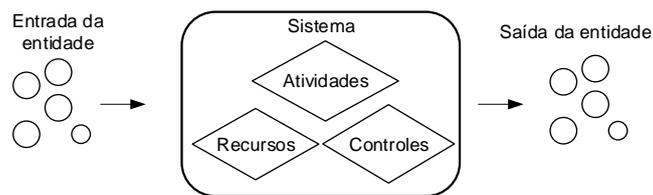


Figura 2.2 - Elementos de representação do sistema a eventos discretos.

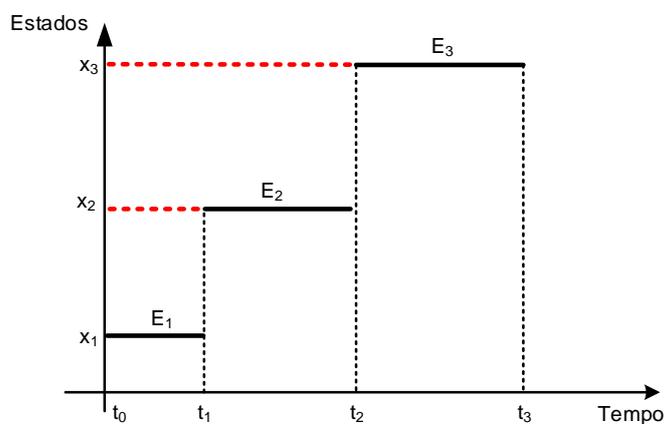


Figura 2.3 - Trajetória típica do sistema a eventos discretos.

A Figura 2.3 ilustra os eventos E_1, E_2, E_3, \dots . Estes eventos ocorrem nos instantes de tempo t_1, t_2, t_3, \dots , assumindo determinado estado X_1, X_2, X_3, \dots , por exemplo, o evento E_1 é iniciado no tempo t_0 , alterando assim o estado do sistema para X_1 . No tempo t_1 , o evento E_2 é iniciado e o sistema assume o estado X_2 . Por fim, no tempo t_2 , tem-se o estado do sistema em X_3 ao longo da ocorrência do evento E_3 . Dependendo do sistema, esta trajetória pode continuar indefinidamente (CURY, 2001).

2.3 Simulação

De acordo com Banks e II (1986) a simulação é imitação da operação de sistemas reais ou processos, em dado período de tempo. Para Harrel et al. (2002), a simulação é o processo de experimentação com o modelo representativo do sistema real para determinar o modo como este responde as mudanças em sua estrutura e ambiente.

O comportamento do sistema é estudado através do modelo de simulação, na qual este modelo geralmente utiliza diversos parâmetros sobre a operação do sistema. Uma vez desenvolvido e validado o modelo, ele pode ser usado para investigar vasta variedade de questões sobre o sistema real.

Mudanças no sistema podem ser simuladas a fim de prever o impacto no seu desempenho. A simulação pode ser utilizada para estudar sistemas na fase de concepção, antes que sejam efetivamente implementados. Assim, a simulação é utilizada como ferramenta para prever os efeitos de determinada mudança em sistemas existentes e como ferramenta de projeto para avaliar e validar o desempenho de novos sistemas (MIYAGI, 2016).

A simulação é o processo de projetar o modelo computacional ou não (como o túnel de vento) de determinado sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender o comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação. Na simulação, dado o conjunto particular de entradas, o modelo é executado e o comportamento do sistema é estudado. Este processo de alteração de variáveis de entrada no modelo resulta em conjunto de cenários a serem avaliados (MEDEIROS et al., 2015).

2.3.1 Software de simulação do sistema a eventos discretos

A história da simulação computacional remonta a II Guerra Mundial, quando da solução do comportamento dos nêutrons. Com a experimentação dos dados de entrada, obtêm-se vários cenários em que as probabilidades de eventos separados são fundidas em análise passo a passo para prever o resultado de toda a sequência de eventos. Com o sucesso da técnica sobre o problema dos nêutrons, a metodologia torna-se popular e encontra várias aplicações em todas as áreas (ROBESON; COPACINO, 1994).

A partir da década de 1960, em função da necessidade de desenvolvimento de ferramentas mais efetivas como consequência da demanda maior em termos de resultados mais confiáveis e de melhor visualização dos benefícios da simulação, surgem os softwares específicos acoplados a simuladores capazes de reproduzir graficamente o funcionamento dos sistemas reais. Dentre as vantagens da utilização dos softwares de simulação específicos, pode-se citar a facilidade de compreensão, o treinamento de pessoal e melhor visualização do sistema estudado (SILVA, 2005).

Em 1961 surge o Sistema de Simulação de uso Geral (*General Purpose Simulation System – GPSS*), que é a linguagem de programação direcionada à simulação. A

partir da década de 1980, surgem os primeiros simuladores com interface própria para minimizar as linhas de programação. Com a evolução das interfaces gráficas dos sistemas operacionais, os software de simulação ficam mais fáceis de operar. Atualmente, os simuladores têm tendência de customização para aplicações específicas, tais como: manufatura, serviços, telecomunicações, reengenharia, dentro outros (SALIBY, 1997).

Os simuladores de sistema a eventos discretos divide o tempo em pequenas parcelas e o estado do sistema é atualizado de acordo com as atividades que ocorrem em cada parcela do tempo. Como nem toda parcela do tempo possui ocorrência de atividade, a simulação é mais rápida que a simulação contínua (LAW et al., 2000). Outra facilidade aplicada a simulação a eventos discretos é em vez de utilizar somente o paradigma de programação estruturada baseada em eventos, a simulação pode ser baseada em eventos, atividades ou em processos. Alguns simuladores conhecidos de eventos discretos são: Arena Rocckwell Automation, Incontrol, Flexsim Software, Promodel, Matlab entre outros.

Para simular ascensores utiliza-se os softwares que implementam os sistemas a eventos discretos baseados em tráfegos. Normalmente as simulações de ascensores é realizada por projetistas que necessitam conhecer a natureza da demanda de transporte vertical dos edifícios e baseiam-se em especificações, normas e modelos que permitam análise das variáveis, número de pessoas e período de movimentação (FORERO, 2011).

2.4 Sistemas vertical em construções

Desde o surgimento das primeiras cidades ocorre a crescente urbanização. Pessoas deixam o campo e vão morar e trabalhar nas cidades. Para suprir este fenômeno de agrupamento, necessita-se de maior espaço, o que requer melhor aproveitamento das áreas disponíveis. Edificações com mais de um piso são necessárias desde a antiguidade, atendendo as necessidades crescentes de mais pessoas no mesmo espaço, manifestadas atualmente nos centros comerciais, torres, prédios de escritórios entre outros (ASTIAZARA, 2005).

No início meios rudimentares são utilizados, como escadas, rampas, cestas e plataformas erguidas por tração animal ou escrava. Com o aprimoramento, surgem os dispositivos baseados em trilhos verticais ou guias. Estes dispositivos rudimentares evoluem para a forma de ascensores do início dos anos 1800. Neste período, a principal utilização destes ascensores é o transporte de materiais e ocasionalmente, de

pessoas. Neste período, mecanismos de segurança não constam como parte essencial dos dispositivos ascensores e os resultados tornam-se desastrosos quando o cabo de sustentação se rompe (STRAKOSCH; CAPORALE, 2010).

Em 1823, a empresa *Briquet* cria o ascensor hidráulico, sendo este um tanque móvel com água e um contra peso que faz subir ou descer o ascensor. Quando o contrapeso está no alto, a bomba a vapor transfere a água para o reservatório que está no topo do edifício, fazendo a plataforma subir (SANTOS, 2007). Em 1880, Werner Von Siemens inova com o uso do motor elétrico na construção de ascensores. No primeiro modelo, a cabine suporta o motor elétrico que sobe pelo poço através do conjunto de engrenagens que tracionam o ascensor nos suportes ao lado do poço. Em 1887 é criado o modelo de ascensor elétrico que faz girar uma polia na qual se enrola o cabo de aço onde são suspensos o contrapeso e a cabine. As vantagens do elevador elétrico neste momento é a eficiência, baixo custo de instalação e velocidade quase constante sem levar em consideração a carga.

As evoluções nos projetos dos ascensores popularizam o uso destes para o transporte de passageiros (STRAKOSCH; CAPORALE, 2010). Em Portugal é construído e colocado em funcionamento em 15 de fevereiro de 1892 o ascensor da Rua do Crucifixo, popularmente conhecido como elevador do Chiado. Este elevador tem capacidade de fazer 48 viagens por hora, dispondo de ascensorista a bordo. A Figura 2.4 (a), apresenta o Elevador do Chiado no ano de sua construção e a Figura 2.4 (b), ambas retiradas de Tostões (2004), apresenta o Elevador do Chiado em 1987.

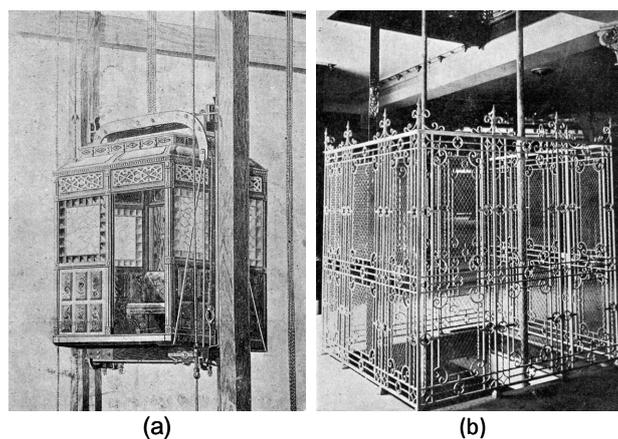


Figura 2.4 - Ascensor do Chiado – Rua do Crucifixo/Portugal: (a) no ano de 1892 e (b) no ano de 1987.

Em 1903 Otis introduz o projeto que se torna o padrão na indústria de ascensores, o sistema de tração para ascensores elétricos com máquina sem engrenagens, podendo ser empregado em edifícios de qualquer altura e operado a velocidades mais altas que o sistema a vapor. Em 1920 aparecem os primeiros ascensores com controladores eletrônicos semiautomáticos, que reduzem o trabalho dos atendentes a apenas abrir e fechar a porta, dando partida ao movimento da cabine. Em 1950, os ascensores são completamente automatizados, eliminando a necessidade de ascensorista a bordo (PEPYNE; CASSANDRAS, 1997).

Com a procura por ascensores, ocorre a discussão entre os fabricantes para decidir qual melhor tecnologia utilizar, se os ascensores hidráulicos ou os ascensores elétricos. Cada tipo tem características que o torna particularmente adaptado para aplicações específicas. Entre os anos de 1970 à 1980 as empresas produzem mais ascensores hidráulicos que ascensores elétricos. Em 1973, a produção anual de ascensores hidráulicos ultrapassa a produção de ascensores elétricos em mais de 50%.

Após alguns anos, partes mecânicas são substituídas por partes elétricas. Isto contribui com o aparecimento do primeiro ascensor com chamada de toque (botoeira). A aplicação de controladores elétricos estabiliza o tempo de viagem do ascensor, uma vez que a velocidade não mais dependia de fatores como a pressão da água (para ascensor hidráulicos) ou características mecânicas (para ascensores elétricos). Outra melhoria da utilização da eletricidade é a suavização da aceleração e desaceleração, comum nos ascensores atuais, proporcionando conforto ao passageiro (STRAKOSCH; CAPORALE, 2010).

Com a evolução da eletrônica dá-se origem à microeletrônica e esta passa a ser a tecnologia empregada no transporte vertical. Inicialmente, microcontroladores permitem gerenciar os motores, aumentando a velocidade e conseqüentemente, diminuindo o tempo de viagem. A utilização da microeletrônica em ascensores é a maior inovação neste tipo de transporte, melhorando o desempenho do sistema (STRAKOSCH; CAPORALE, 2010). O ascensor é o principal meio de acesso vertical para os usuários dos edifícios comerciais e públicos. Com os edifícios cada vez mais altos, aumenta-se o fluxo de pessoas e a utilização dos ascensores. A qualidade dos serviços prestados nestes edifícios, fica afetada pela baixa eficiência deste tipo de transporte.

Em 1980, com o emprego de microprocessadores para o controle de grupos de ascensores, torna-se possível realizar cálculos estatísticos com o registro do tráfego de momentos anteriores e conseguir prever os instantes de maior fluxo e saída de passageiros (MARJA-LIISA, 1997). Até 1980 os ascensores hidráulicos são extensivamente

adequados para edifícios baixos, até seis andares, enquanto os ascensores elétricos são adequados para edifícios mais altos. A Figura 2.5 (a), ilustra a tecnologia utilizada nos ascensores hidráulicos e a Figura 2.5 (b), ambas retirada de Tostões (2004), ilustra a tecnologia utilizada nos ascensores elétricos.

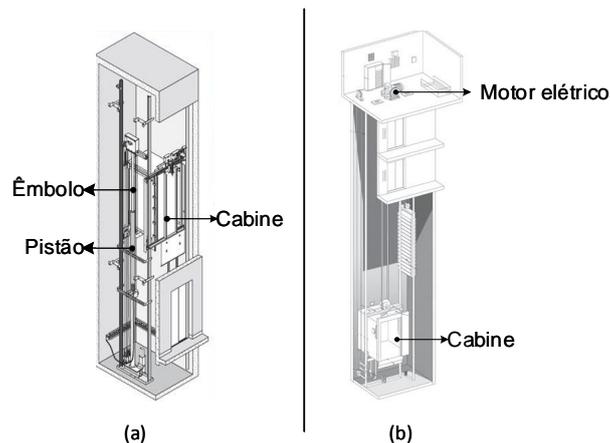


Figura 2.5 - Tecnologia empregada nos ascensor: (a) hidráulico e (b) elétrico.

Em 1986, aproximadamente 70% de todas as unidades de ascensores vendidas para novos edifícios são do tipo hidráulico. A produção de ascensores hidráulico até o ano de 2000 mantém-se entre três a quatro vezes maior que a produção de ascensores elétricos (SEDRAK, 2000).

Com o crescimento das atividades da construção civil no início da década de 1990 e o aumento do tamanho e altura dos prédios, questões como quantidade, tamanho e localização dos ascensores começam a ser levantadas (STRAKOSCH; CAPORALE, 2010). Estas questões fazem surgir técnicas para aplicar a tecnologia de ascensores em satisfazer a demanda de tráfego em prédios de múltiplos andares. Estas técnicas envolvem cuidadosos estudo da população total esperada para ocupar os pisos superiores, estudos sobre os padrões de tráfego desta população, apropriados cálculos de desempenho do sistema de ascensores e o julgamento dos resultados obtidos para então recomendar a melhor tecnologia a ser empregada (ASTIAZARA, 2005).

No Brasil é criada em 1983 a ABNT NBR 5665:1983 com o intuito de obter a qualidade dos serviços no tráfego vertical de pessoas e para assegurar as condições mínimas exigíveis, aplicando-se a todos os ascensores (ABNT, 1983). Ela trata es-

pecificamente da lotação das cabines, capacidade de tráfego, tempo de aceleração e desaceleração, tempo total de viagem, tempo de abertura e fechamento das portas, capacidade de transporte, número de paradas e intervalo de tráfego. A Tabela 2.1 dispõe o resumo da NBR 5665, na qual N_e é o número de ascensores e T_m é o tempo máximo que o passageiro pode esperar pelo elevador.

Tabela 2.1 - Resumo da NBR 5665.

N_e	Finalidade da construção	T_m [s]
1	Geral	80
2	Geral	60
3	Geral	50
	Escritórios	40
	Consultórios	40
	Hospitais	45
4 ou +	Hotéis	45
4 ou +	Escolas	45
4 ou +	Lojas	45
4 ou +	Garagens	45
4 ou +	Restaurantes	45

2.5 Considerações

Este capítulo tratou de conceitos de sistemas, modelos e simulação. Descreveu sucintamente sobre sistema a eventos discretos, que pode ser utilizado para modelar sistemas reais de elevadores. O próximo capítulo trata do processo de otimização que pode ser aplicado na simulação de elevadores.

CAPÍTULO 3

PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas as principais características do processo de otimização, descrevendo brevemente os métodos de otimização determinísticos e heurísticos. Será apresentado ainda o método de otimização força bruta e a forma de aceleração deste método. Por fim, descreve-se os parâmetros do modelo de ascensores que são utilizados no processo de otimização.

3.1 Otimização

Otimização é a tentativa de melhorar determinado sistema em torno do ponto ou pontos ótimos ou otimizados. Essencialmente, as variáveis de projeto são os parâmetros do problema que podem ser alterados para otimizar o sistema. Matematicamente, otimização consiste em encontrar os mínimos ou máximos da função de várias variáveis, com valores dentro de determinada região do espaço multidimensional. A adequação do modelo matemático a situação real também pode ser formulada como problema matemático, quase sempre de otimização (CALIXTO, 2008).

Otimização refere-se ao estudo de problemas nas mais diversas áreas, em que se pretende otimizar a função de avaliação por meio da escolha de variáveis dentro de determinado domínio, obedecendo ao conjunto de restrições. As técnicas de otimização são mecanismos empregados na busca pela melhor solução, almejando o melhor desempenho possível do sistema, utilizando critérios e parâmetros determinísticos ou estocásticos para direcionar a busca. O domínio da função é chamado de espaço de busca, sendo definido como espaço que engloba todas as soluções possíveis de determinado problema (LEE; EL-SHARKAWI, 2008; HOLTZ, 2005).

O Processo de otimização tem o intuito de simular, mudar as variáveis de entrada sistematicamente e encontrar valores ótimos ou otimizados dos parâmetros do sistema modelado ou não. Busca-se, na maioria das vezes, minimizar a função de avaliação $f(x)$, no qual \vec{x} é o vetor contendo as variáveis de entrada. A Figura 3.1, adaptada de Calixto et al. (2015), ilustra o fluxo do processo de otimização. No processo de otimização, na maioria das vezes, o simulador é composto pela modelagem matemática do sistema a ser otimizado e após a simulação é necessário avaliar cada solução encontrada. A função de avaliação é definida como a nota atribuída para a qualidade de cada solução e deve representar todo o conhecimento que se possui sobre o problema a ser resolvido. A função de avaliação, função custo ou função

objetivo, calcula o valor que reflete quão importante é cada conjunto das variáveis representadas por \vec{x} para a solução do problema.

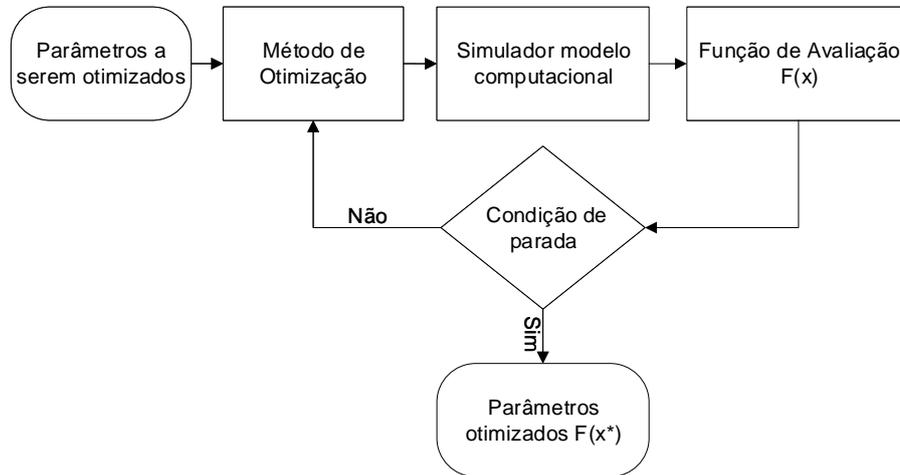


Figura 3.1 - Processo de otimização.

3.2 Métodos de otimização

Basicamente, os métodos de otimização mais utilizados no processo de otimização são: i) determinísticos, ii) heurísticos e iii) estocásticos (GOMES, 2017). O método de otimização não deve influenciar no resultado, já que o mínimo da função de avaliação independe do método utilizado. No entanto, a frequente não linearidade dos modelos, a presença de mínimos locais e a alta correlação entre os parâmetros podem dificultar a tarefa de otimizar (MARTINEZ; SANTOS, 1995).

3.2.1 Métodos determinísticos

Os métodos de otimização baseados nos algoritmos determinísticos produzem sequência determinística de possíveis soluções. Nestes métodos, a resposta final dado o mesmo conjunto de entrada \vec{x} , sempre é a mesma (CALIXTO, 2008). Os métodos determinísticos, normalmente, buscam soluções através de derivadas ou buscas nas vizinhanças. Estes métodos produzem resultados satisfatórios quando as funções são contínuas, convexas e unimodais.

Na maioria das vezes, são ineficientes quando aplicados a problemas que apresen-

tam não diferenciabilidade ou descontinuidade. Outras dificuldades comuns são: i) a convergência da solução ótima é dependente da escolha de \vec{x} inicial, ii) tendem a ficarem presos em mínimos locais, iii) algoritmo eficiente na solução de determinado problema de otimização pode não ser eficiente na solução de outro, iv) falta de eficiência em problemas discreto e v) não são adequados para computação paralela (SARAMAGO S. P. E STEFFEN JUNIOR, 2008).

3.2.2 Métodos heurísticos

Os métodos heurísticos de otimização consistem em alternativa para resolução de problemas considerados difíceis ou intratáveis pelos métodos determinísticos, se caracterizando pela introdução de parâmetros e dados aleatórios no processo de otimização. Embora estes métodos não garantam a otimalidade das soluções obtidas, existe a tendência de que os métodos heurísticos consigam alcançar, em tempo de execução razoável, resultados otimizados ou até mesmo a resposta ótima para os mais variados tipos de problemas reais (TALBI, 2009; LEE; EL-SHARKAWI, 2008; EL-SHARKAWI; LEE, 2008).

Os métodos heurísticos de otimização são em essência, conjunto de regras com intuito de encontrar soluções melhoradas, realizando elevado número de avaliações da função de avaliação em todo espaço de busca e aumentando a probabilidade de encontrar os menores valores da função de avaliação (considerando o problema de minimização). O caráter aleatório e o procedimento que avalia várias possíveis soluções previnem o método de ficar preso em mínimos locais. Os métodos heurísticos não necessitam de valor inicial de \vec{x} e não utilizam derivadas (SCHWAAB, 2005).

3.3 Método de otimização força bruta

O método de otimização força bruta consiste em estratégia para encontrar soluções de problemas nas quais valores aleatórios são gerados e testados no espaço de busca das variáveis. Baseia-se na enumeração de todas as possíveis soluções e posteriormente, a checagem de cada possível solução (CORMEN et al., 2009). O custo computacional do algoritmo de força bruta é proporcional ao número de candidatos à solução que, nos problemas reais, tende a crescer invariavelmente. Geralmente, o método de força bruta produz soluções melhores/desejadas em problemas que nenhum outro método tenha eficiência ou quando heurísticas específicas são utilizadas para reduzir o conjunto de candidatos, diminuindo o espaço de busca viável (LEVITIN, 2011).

Outra utilização deste método é quando a solução do problema é mais importante que a velocidade de execução, como nos casos de aplicações críticas na qual os erros de outros métodos possuem sérias consequências (SANTOS et al., 2010). Considerado heurística, o método força bruta também é utilizado em softwares de *benchmarking*, algoritmos de ordenação, algoritmos de busca, multiplicação de matrizes, *string matching*, dentre outros (CORMEN et al., 2009; LEVITIN, 2011; JOHNSONBAUGH; SCHAEFER, 2004; ENQVIST et al., 2011). Mesmo sendo técnica considerada ineficiente para a maioria dos casos, o método força bruta é útil para resolver problemas com instâncias pequenas, pois trabalha com busca exaustiva para gerar todas as possíveis soluções no domínio do problema (CORMEN et al., 2009). A Figura 3.2, adaptada de Santos (2016), ilustra o fluxo do método de otimização força bruta.

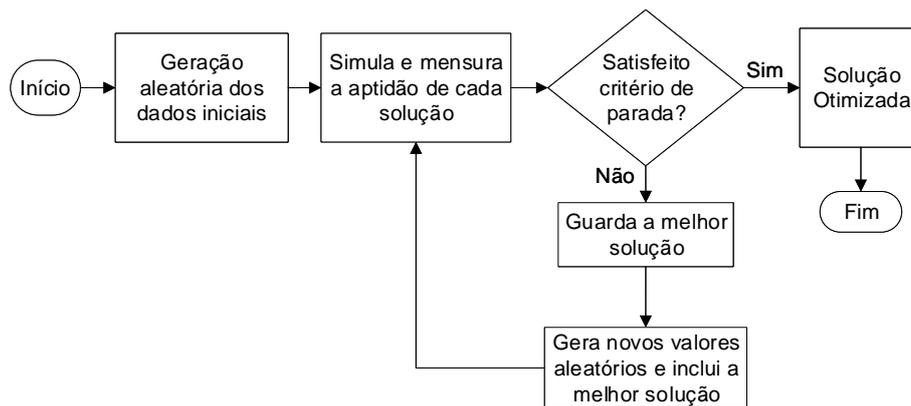


Figura 3.2 - Fluxograma do método força bruta.

Os critérios de parada do método força bruta são: i) quantidade de soluções válidas, ii) quantidade de candidatos testados, iii) tempo de processamento, iv) valor da função de avaliação e v) entre outros. Devido ao cenário de explosão combinatória², são desenvolvidas estratégias para melhorar o desempenho do método de força bruta: i) reduzir o espaço de busca com análise inicial dos parâmetros de entrada e ii) reordenar o espaço de busca testando os candidatos mais promissores primeiro

²Condição inerente a certos problemas matemáticos no qual pequeno aumento no número de elemento, de dados ou parâmetros operacionais do problema, pode levar a aumento no tempo necessário para a obtenção da solução.

(ALWAN, 2013; LINARO; STORACE, 2015).

3.4 Parâmetros do modelo de ascensores

O processo de otimização dos sistemas de ascensores considera os parâmetros de desempenho: i) capacidade de atendimento por andares, ii) capacidade máxima de carga do elevador, iii) tempo de chegada dos usuários, iv) tempo de chegada acumulada de usuários, v) consumo de energia, vi) tamanho da fila, vii) tamanho médio da fila, viii) quantidade de elevadores, ix) tempo de embarque nos ascensores, x) tempo de desembarque nos ascensores, xi) tempo de interchegada dos usuários, xii) número de andares do edifício e xiii) estratégia de parada dos ascensores (TAHA, 2008).

Os parâmetros de entrada \vec{x} a serem otimizados neste sistema, normalmente contêm valores inteiros (número de ascensores e a geometria de funcionamento) e o parâmetro observado na saída $f(x)$, normalmente são o tempo e a energia consumida (TAHA, 2008). Desta forma, existe a necessidade de formular matematicamente o modelo do sistema de ascensores para adequação dos métodos de otimização, com o intuito destes métodos receberem os parâmetros de entrada, sendo, sempre números inteiros e observada as várias saídas de tempo (tempo de chegada, tempo de chegada acumulada, tempo de embarque, tempo de desembarque e tempo de interchegada) e o consumo de energia.

3.5 Considerações

Neste capítulo foi apresentado o processo de otimização com ênfase no método de otimização força bruta. No próximo capítulo é apresentada a metodologia proposta com a descrição detalhada das ações necessárias para implementação da simulação computacional e do processo de otimização em sistema de ascensores elétricos.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para otimização do problema de tráfego em sistema de ascensores. São apresentados a forma e os dados a serem coletados, a construção do simulador e o processo de otimização a ser implementado. Ao final é descrito a forma como será validada a metodologia proposta.

4.1 Contextualização

São vários os empreendimentos com problemas de filas nos ascensores, tanto privados como públicos. Após realizada a construção, caso não tenha sido considerado corretamente o fluxo de pessoas, resolver o problema das filas nos ascensores é tarefa difícil. Na maioria das vezes, é possível solucionar parcialmente o problema com a criação de simulador para análise do tráfego vertical e previsão do tempo de espera. No caso ideal, a formação das filas na entrada dos ascensores é do tipo primeiro a chegar, primeiro a entrar (*first in, first out* – FIFO), como ilustrado na Figura 4.3, e na saída é do tipo último a entrar, primeiro a sair (*last in, first out* – LIFO).

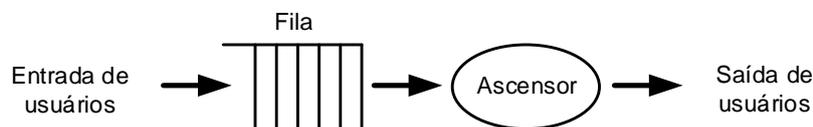


Figura 4.1 - Modelo de formação de fila para um elevador.

No entanto, na entrada é possível organizar as filas do tipo FIFO, mais na saída não é possível obter organização por tipo de fila, sendo necessário considerar a saída aleatória. O tempo de espera nos elevadores é regulamentado pela ABNT NBR 5665:1983, Tabela 2.1. A metodologia deste trabalho fornece suporte para o desenvolvimento dos modelos de sistema de elevadores com a finalidade de adequar, flexibilizar e otimizar, reduzindo o tamanho das filas. É criado simulador de múltiplos elevadores para análise do tráfego vertical de indivíduos, utilizando processo de otimização e realizando análise do consumo de energia elétrica antes e após a otimização. A Figura 4.2 ilustra o fluxo da metodologia proposta.

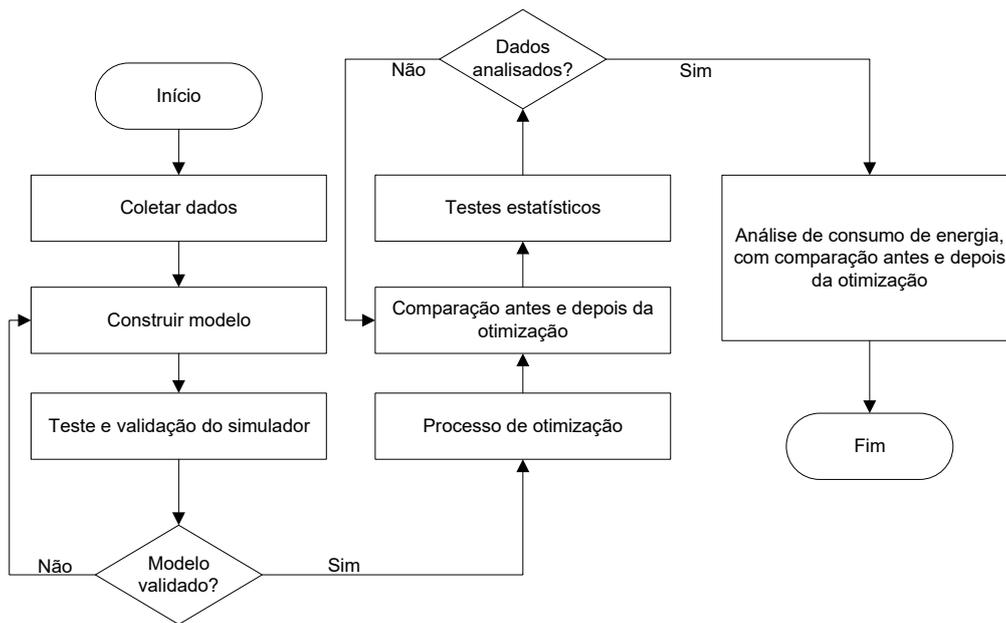


Figura 4.2 - Fluxograma da metodologia proposta.

4.2 Coleta de dados

Após identificado o local com problema de geração de fila nos ascensores, realiza-se a análise das rotinas de acesso ao sistema real. De posse da rotina de acesso, projeta-se o mapa de fluxo de indivíduos (entrada, saída, escadas entre outros), construindo as características específicas do modelo para o sistema real. A coleta dos dados necessários para simulação é realizada dentro e fora dos ascensores, no qual são coletados os dados: i) tempo de espera de cada ascensor, ii) tempo de uso diário de cada ascensor, iii) tempo de abertura e fechamento das portas de cada ascensor, iv) tempo médio de entrada e saída dos indivíduos nos ascensores, v) aceleração e desaceleração, vi) velocidade, vii) percurso, viii) tempo de parada em cada andar e ix) quantidade média de indivíduos que utilizam as escadas.

Como a maioria dos dados a serem coletados são valores médios, são realizadas várias coletas e produzida a análise estatística descritiva, obtendo os valores médios e desvio padrão. Para que os valores sejam representativos ao sistema real, deve-se levar em consideração os dias da semana, que possivelmente modifica o fluxo de indivíduo. Para realizar a análise de consumo elétrico, deve-se ter os dados de placa dos motores utilizados nos ascensores, com intuito de obter a estimativa do consumo.

4.3 Construção do simulador

O simulador é construído utilizando a teoria de sistemas a eventos discretos, modelando o sistema de elevadores. A chegada de usuário na porta do elevador é representada pela distribuição de probabilidade que mais se aproxima dos dados reais coletados. O intervalo de tempo entre chegadas também deve atender a uma distribuição de probabilidade que melhor se adequa aos dados coletados.

Para o cálculo do valor dos parâmetros: configuração dos elevadores, percurso de cada elevador e tempo de parada em cada andar, opta-se por utilizar matrizes para representar cada configuração, como ilustrado na Figura 4.3. A matriz de configuração é construída tridimensionalmente, no qual o eixo x representa os tempos de espera na fila, o eixo y representa a quantidade de elevadores e o eixo z representa as diferentes configurações a serem simuladas. Os outros parâmetros utilizados na construção do simulador são: i) tempo de espera de cada elevador, ii) tempo de uso diário de cada elevador, iii) tempo de abertura e fechamento das portas de cada elevador, iv) tempo médio de entrada e saída dos indivíduos nos elevadores, v) aceleração e desaceleração, vi) velocidade de cada elevador e vii) quantidade média de indivíduos que utilizam as escadas. Os valores destes parâmetros são obtidos na pesquisa realizada no local de estudo agregado a coleta de dados dos tempos e através do manual de utilização dos elevadores.

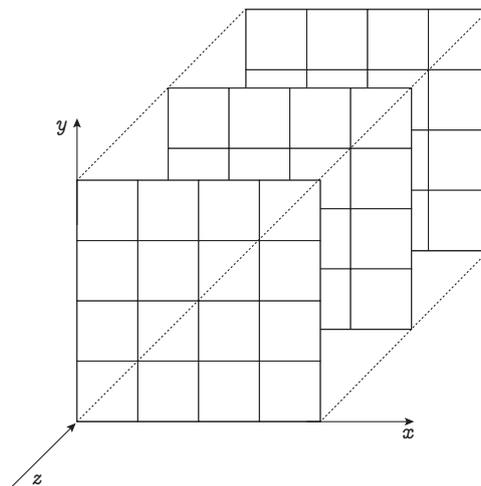


Figura 4.3 - Matrizes de configuração.

4.4 Testes, validação e aplicação do processo de otimização

O processo de validação verifica se o modelo comporta-se como o sistema real. De posse dos dados coletados no sistema real e do simulador, é possível realizar testes para comparar os valores de saída em ambos. Para garantir a fidedignidade das respostas do modelo quando comparadas com as repostas do sistema real, são realizadas réplicas das simulações com o intuito de obter média e desvio padrão próximos ao do sistema real. As modificações de ajustes produzidas no modelo são realizadas a partir de sugestões da equipe de manutenção dos ascensores, especialistas que conhecem os parâmetros do sistema real.

Após a validação do modelo/simulador, é possível realizar o processo de otimização. No sistema real de múltiplos ascensores, são várias as possíveis configurações capazes de reduzir as filas. A ideia é encontrar a configuração que, no pior caso, deixe o sistema dentro dos limites regulamentados pela norma técnica NBR 5665/1983: Tráfego nos elevadores. O método de otimização utilizado é o força bruta, no qual seleciona variáveis em determinado domínio e obedece o conjunto de restrições. É escolhido o método de força bruta por enumerar todas as possíveis soluções e verificar quais satisfazem a NBR 5665/1983. Este método possui implementação simples quando comparada a outros métodos de otimização.

No processo de otimização, a matriz de configuração (Figura 4.3) é representada pela matriz $m \times n \times t$ que mapeia o conjunto de dados de entrada, na qual m é o somatório dos tempos de espera na fila, n é o número de ascensores e t é a quantidade de configuração simulada. Desta forma, busca-se a configuração que proporcione o menor tempo de espera na fila do elevador. O algoritmo de força bruta busca por novas matrizes modificando aleatoriamente os valores limitados no espaço de busca definido. O processo de busca é repetido até que seja encontrada a configuração desejada.

4.5 Análise do consumo de energia

A análise do consumo de energia elétrica é realizada utilizando os dados coletados do sistema real (antes da otimização) e os dados otimizados. Para mensurar este consumo utiliza-se a demanda total dada por:

$$D_{total} = \frac{(t_{standby}) \cdot (P_{standby}) + (t_{movimento}) \cdot (\nu) \cdot (Cap) \cdot (DEV)}{(t_{movimento}) \cdot (\nu) \cdot (Cap)} \quad (4.1)$$

na qual D_{total} é a demanda total de energia elétrica do ascensor $\left[\frac{Wh}{m \cdot kg}\right]$, $t_{standby}$ é o tempo em que o ascensor fica parado por dia, em horas, $P_{standby}$ é a potência do elevador em standby $[W]$, $t_{movimento}$ é o tempo que o ascensor movimenta-se por dia, em horas, ν é a velocidade nominal do ascensor $\left[\frac{m}{s}\right]$, Cap é a carga nominal do ascensor e DEV é a demanda específica em viagem $\left[\frac{Wh}{m \cdot kg}\right]$. Para obter a demanda específica em cada viagem para determinado ascensor, é necessário escolher a viagem de referência com consumo de energia conhecido, dado em Wh e dividir este valor pela distância percorrida (em m) e pela carga nominal do elevador (em kg).

4.6 Considerações

Este capítulo descreve a metodologia proposta neste trabalho. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado o ambiente para o estudo de caso, os dados coletados e os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos do processo de otimização. Ao final os resultados comparativos do consumo de energia elétrica antes e após a otimização.

5.1 Ambiente para estudo de caso

O local de realização dos estudos é o Fórum Dr. Heitor Moraes Fleury. O Fórum é órgão do poder judiciário que atende usuários de todo o estado de Goiás e está localizado no Setor Oeste na Cidade de Goiânia, como apresentado na Figura 5.1. Sua diretoria possui planos para melhorar o atendimento aos usuários com algumas intervenções internas. Com relação a estes aspectos uma das intenções é minimizar o tamanho das filas de espera formadas nas portas dos ascensores.

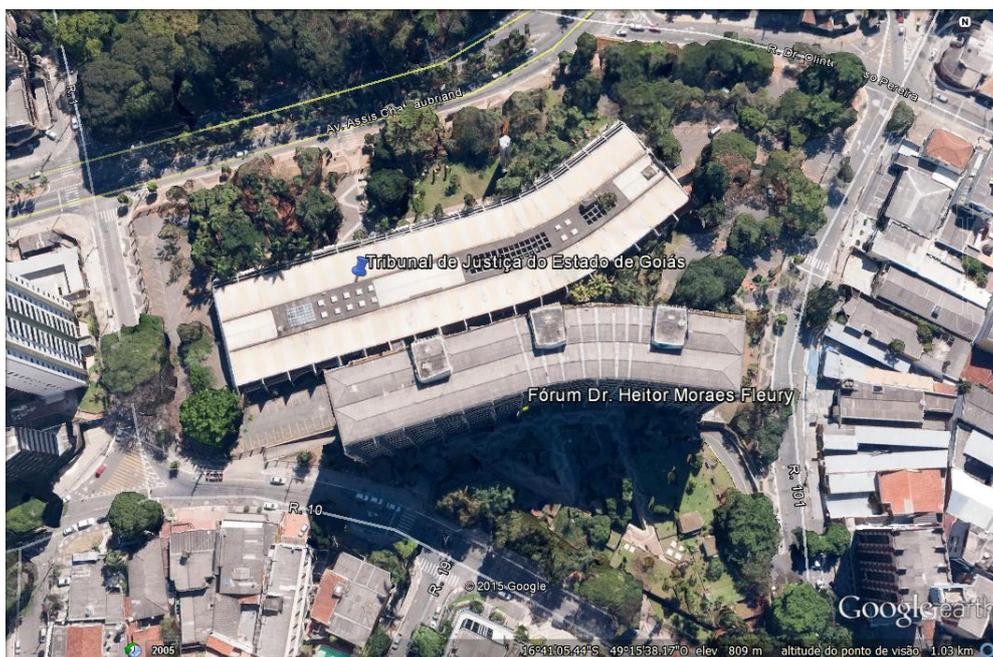


Figura 5.1 - Fórum Dr. Heitor Moraes Fleury.

O Fórum Dr. Heitor Moraes Fleury tem sede na cidade de Goiânia e jurisdição em todo o território estadual, assegurando serviço acessível, ágil, eficaz e efetivo. Todos os dias milhares de usuários procuram pelos serviços do Fórum. No espaço físico está

localizado o poder judiciário, também conhecido por tribunais judiciais. O Fórum fica anexo ao edifício do Tribunal de Justiça do Estado de Goiás e está localizado na Rua 10 nº 150 no setor Oeste, nele se concentra varas cíveis, ambientais, de crimes dolosos contra a vida e de precatórios da cidade de Goiânia.

O Fórum Dr. Heitor Moraes Fleury funciona em edifício de quatorze pavimentos, no qual todos os serviços prestados aos usuários do Fórum ficam distribuídos em onze pavimentos. Os Andar 1, Andar 2 e Andar 3 são utilizados como arquivos, sendo área restrita aos usuários e com acesso somente para servidores credenciados. As Figura 5.2, Figura 5.3 e Figura 5.4 apresentam o fluxograma de identificação dos espaços do Fórum, que tem horário de atendimento das 08:00h as 18:00h de segunda a sexta-feira.

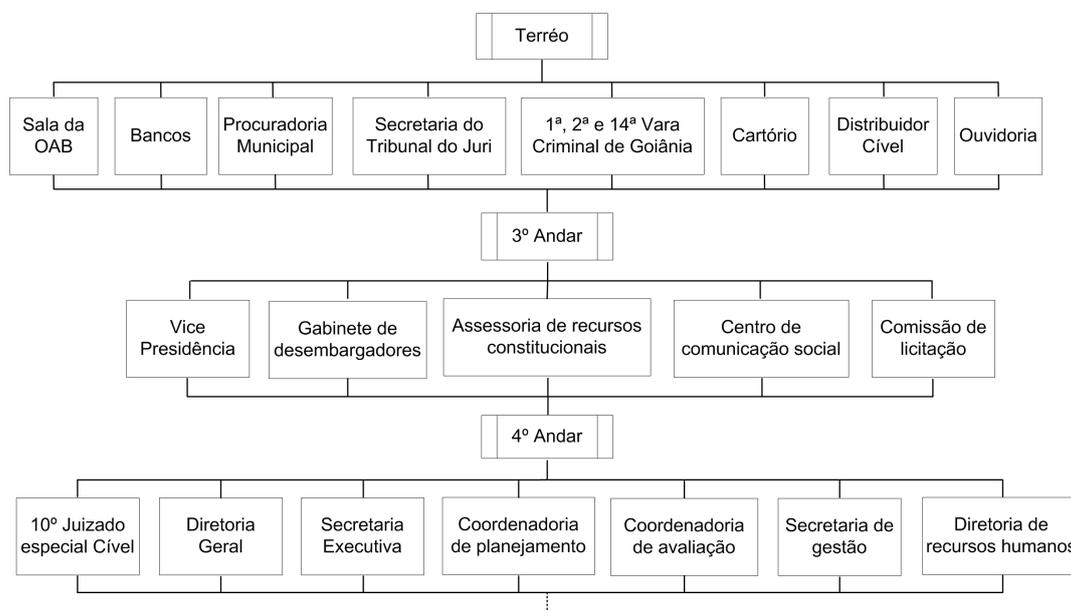


Figura 5.2 - Fluxograma do Fórum nos andares Térreo ao 4º.

O Fórum Dr. Heitor Moraes Fleury recebe elevado fluxo de usuários e servidores que transitam em seu interior durante todo o expediente. Para suprir este elevado fluxo de pessoas há a necessidade de transporte eficiente, eficaz e de alta qualidade para promover o acesso aos seus andares, atendendo as demandas do Fórum. O edifício do Fórum contém seis ascensores, como apresentado na Figura 5.5. Os ascensores são do modelo *Schindler* AL 1000 com capacidade máxima para **vinte e cinco passageiros**, fabricados no ano de 1983 e estão dispostos no corredor como apresentado na Figura 5.6.

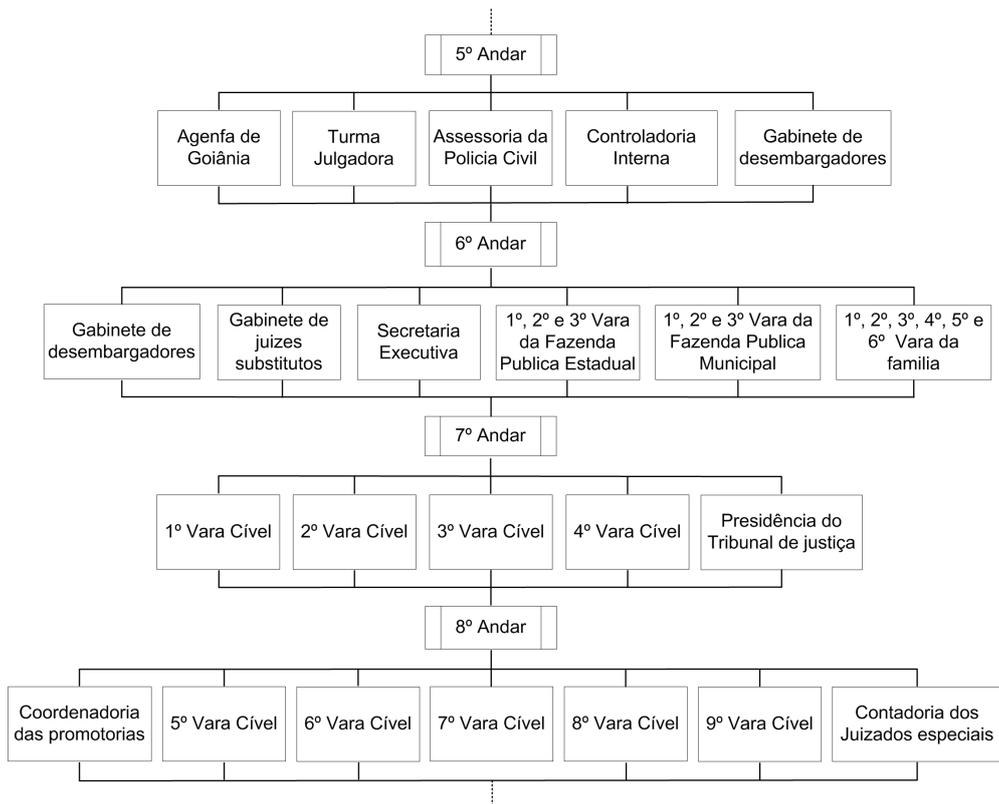


Figura 5.3 - Fluxograma do Fórum nos andares 5º ao 8º.

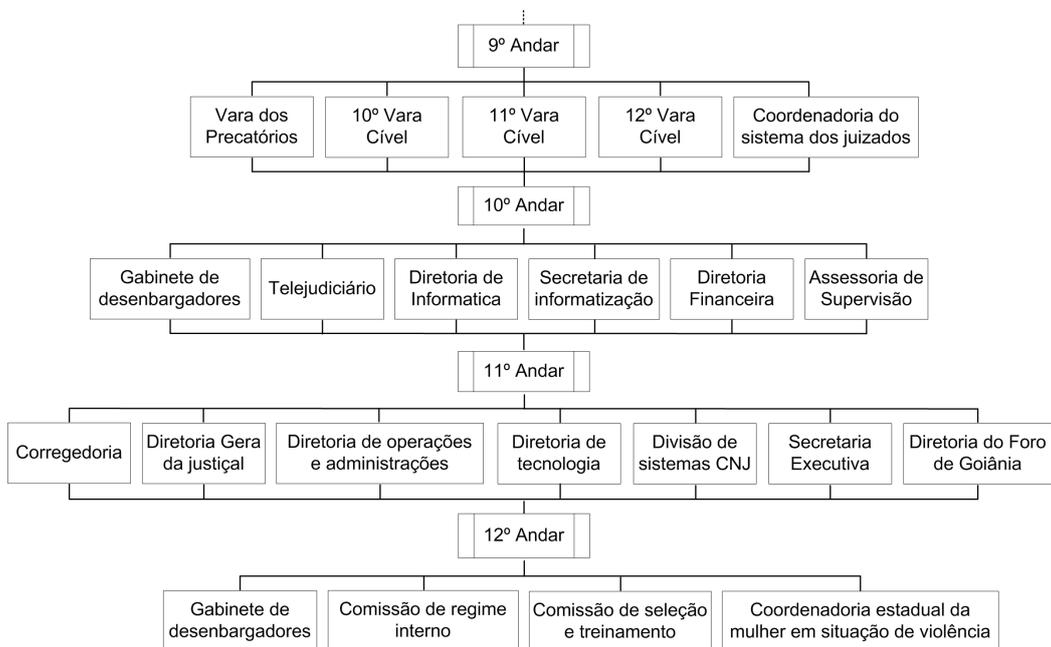


Figura 5.4 - Fluxograma do Fórum nos andares 9º ao 12º.

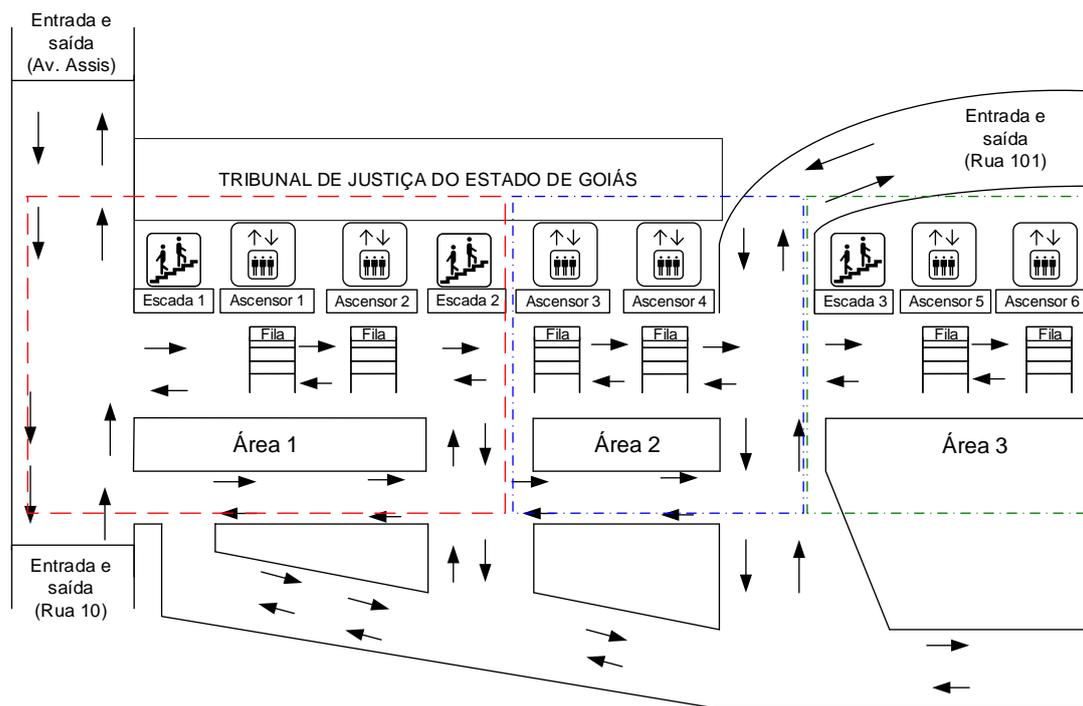


Figura 5.5 - Esquemático dos corredores do andar Térreo do Fórum.



Figura 5.6 - Portas do Ascensor 1 e Ascensor 2 no Fórum Dr. Heitor Moraes Fleury.

A Figura 5.5 apresenta o fluxo de pessoas que passam por uma das três entradas/saídas e se dirigem ao corredor principal onde se encontram os elevadores. As **Área 1**, **Área 2** e **Área 3** são regiões de aglomeração de pessoas. A gestão do Fórum desenvolveu um método para diminuir a aglomeração, utilizando a estratégia:

i) o **Ascensor 1** atende os andares Térreo, 5, 6, e 8, ii) o **Ascensor 2** atende os andares Térreo, 6, 7 e 9, iii) o **Ascensor 3** atende os andares Térreo, 4, 10, 11 e 12, iv) o **Ascensor 4** atende todos os andares e é privativo para juízes e desembargadores, v) o **Ascensor 5** e **Ascensor 6** atendem todos os andares. A Figura 5.7 apresenta o fluxograma resumido da estratégia adotada pela gestão do Fórum, na qual: ϵ_1 até ϵ_6 representam os ascensores, de **Ascensor 1** até **Ascensor 6** e σ_1 , σ_2 e σ_3 representam as escadas de emergência.

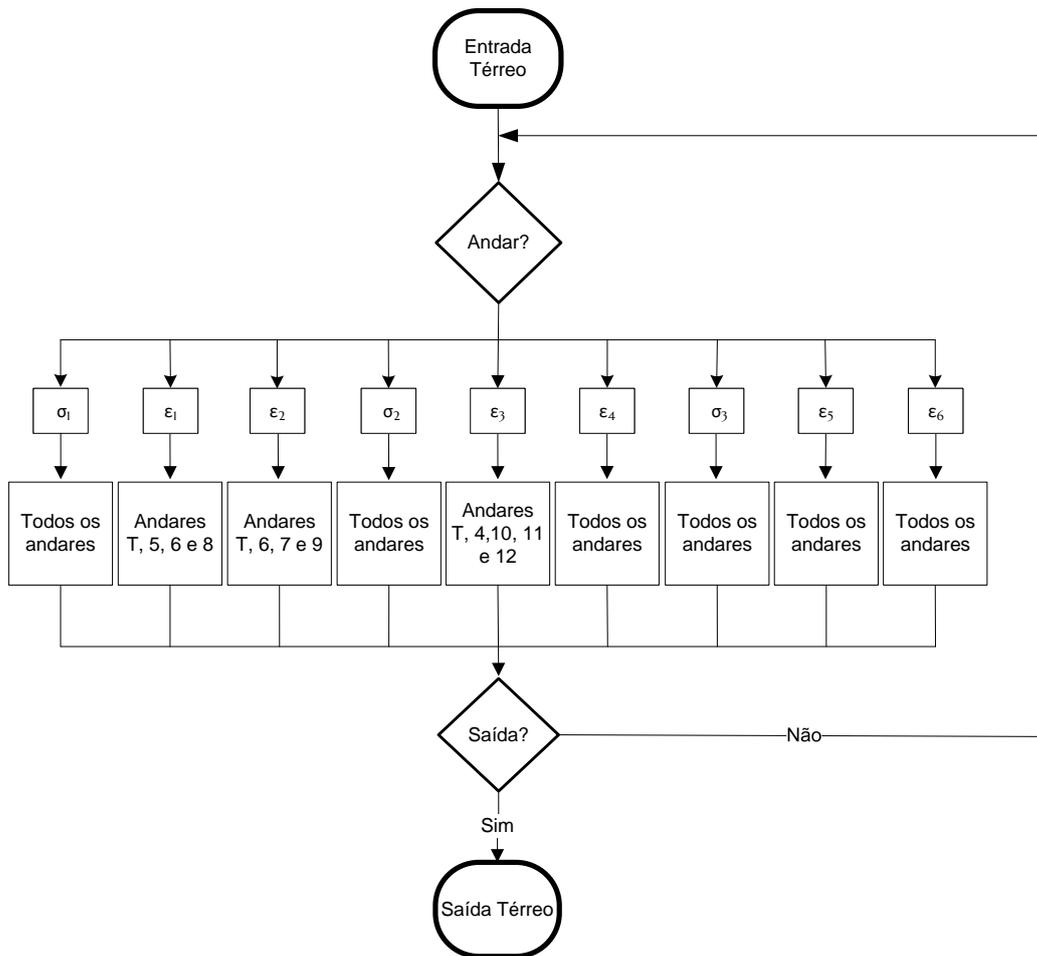


Figura 5.7 - Estratégia adotada pela gestão do Fórum.

5.2 Coleta de dados para o estudo de caso

O Fórum não possui dados históricos das rotinas de funcionamento dos ascensores o que tornou necessária a coleta de dados tanto de forma quantitativa quanto qua-

litativa. Desta forma, realizou-se coleta de dados com o intuito de mapear a rotina de uso dos ascensores do Fórum. A técnica de entrevista foi utilizada na coleta de dados, contendo as seguintes etapas: i) coleta de informações iniciais, ii) visita a locais com problema de filas nas portas dos ascensores, iii) mapeamento da dinâmica de funcionamento do Fórum com contagem de indivíduos que entram e saem dos ascensores, iv) entrevistas com: as ascensoristas (pessoas que trabalham dentro do ascensor), contagem de indivíduos (realizada pelas ascensoristas), servidores (pessoas que atendem os usuários) e usuários (pessoas que procuram os serviços do fórum) e v) tratamento e análise dos dados coletados. A Figura 5.8 apresenta o fluxo realizado para a coleta de dados.

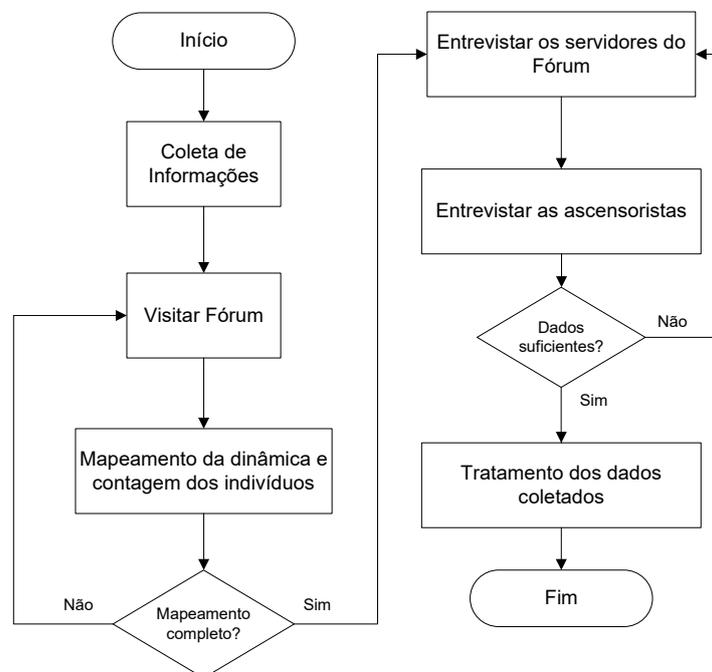


Figura 5.8 - Estratégia utilizada para a coleta de dados.

Após produzido o trabalho extracampo, foram realizadas visitas e reuniões com a diretoria do Fórum, com o intuito de obter autorização para a realização da pesquisa e dos trabalhos internos. Autorizada a realização da pesquisa, inicia-se os estudos para compreender a dinâmica do Fórum. Desta forma, foi possível entender a rotina dos servidores, os locais mais frequentados pelos usuários e realizar o mapeamento do fluxo de pessoas.

A entrevista com os servidores foi a etapa de maior relevância entre as etapas da co-

leta de dados. Nesta entrevista foi possível comparar a contagem dos indivíduos que circulam pelo Fórum/ascensores com o conhecimento vivenciado pelos servidores, além de obter informações relevantes de todo processo.

A entrevista com as ascensoristas foi de fundamental importância, uma vez que elas têm informações específicas, como por exemplo: se existe um ascensor mais utilizado que outro ou um andar em que o ascensor ficaria mais tempo parado, entre outras informações. O serviço de ascensorista é prestado por empresa terceirizada com jornada de trabalho de 6h diárias, com descanso de 15min a cada 45min trabalhados. Assim, os ascensores sempre estão em serviço, pois para a ascensorista em descanso, sempre há uma ascensorista substituta, sendo que os ascensores não podem trabalhar sem ascensoristas. Com isto, a contagem dos indivíduos que entram e saem dos ascensores foi realizada de forma contínua em todo o período de funcionamento do Fórum durante 120 dias.

A Figura 5.9 apresenta a curva média de utilização dos ascensores nas terças-feiras, na qual no eixo das ordenadas são as médias de indivíduos que utilizaram os seis ascensores do Fórum no período de 365 dias, das 08:00h as 18:00h. Observa-se três picos nos horários de 9h, 13h e 17h com média de 1000 indivíduos utilizando os ascensores no intervalo de uma hora e dois vales nos horários de aproximadamente 10:30h e 15h com média de 350 indivíduos utilizando os ascensores no intervalo de uma hora.

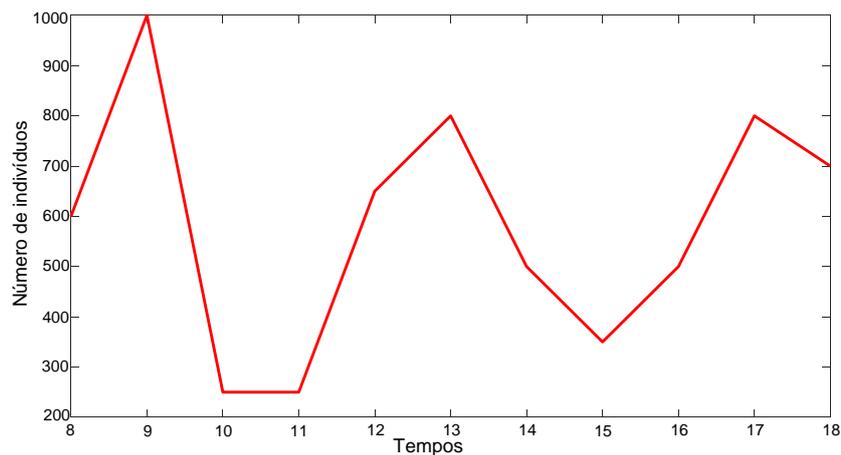


Figura 5.9 - Curva de utilização dos ascensores.

5.3 Construção do simulador e validação do modelo com o sistema

No processo de construção do simulador proposto, foram observados os critérios estabelecidos nas Norma Brasileira de Regulamentação: i) NBR 16042/2012 – Ascensores elétricos de passageiros: requisitos de segurança para construção e instalação de ascensores sem casa de máquinas, ii) NBR 15597/2010 – Requisitos de segurança para a construção e instalação de ascensores existentes: requisitos para melhoria da segurança dos ascensores elétricos de passageiros e ascensores elétricos de passageiros e cargas, iii) NBR 12892/2009 – Ascensores unifamiliares ou de uso restrito à pessoa com mobilidade reduzida: requisitos de segurança para construção e instalação.

Ainda foram utilizadas as Normas: iv) NBR 313/2007 – Ascensores de passageiros: requisitos de segurança para construção e instalação e requisitos particulares para a acessibilidade das pessoas, incluindo pessoas com deficiência, v) NBR 267/2002 – Ascensores hidráulicos de passageiros: requisitos de segurança para construção e instalação, vi) NBR 196/1999 – Ascensores de passageiros e monta-cargas: guias para carros e contrapesos Perfil T, vi) NBR 207/1999 – Ascensores elétricos de passageiros: requisitos de segurança para construção e instalação, vii) NBR 14364/1999 – Ascensores e escadas rolantes: Inspectores de ascensores e escadas rolantes, qualificação e viii) NBR 10982/1990 – Ascensores elétricos: dispositivos de operação, sinalização e padronização.

Na construção do simulador proposto foi utilizada a teoria de sistema a eventos discretos. Os parâmetros de entrada do simulador são: i) número de ascensores, ii) tempo médio de entrada e saída dos usuários, iii) tempo médio de abrir e fechar a porta dos ascensores, iv) número máximo de usuários para cada elevador, v) número de andares atendido por elevador, vi) tempo de aceleração e desaceleração de cada elevador e vii) quantidade média de usuários que utilizam as escadas. Os parâmetros de saída da simulação são: os tempos máximos, mínimos, média e desvio padrão de espera dos usuários na fila dos elevadores.

A linguagem de programação utilizada na construção do simulador foi a *M*-código, usada no Software MatLab. A linguagem *M*-código é especialmente construída para trabalhar com matrizes. Desta forma, existe a necessidade de transformar os dados coletados em matrizes que identifiquem as configurações para cada elevador. Por exemplo, a configuração descrita na Figura 5.7 deve ser escrita na forma matricial, disposta na Tabela 5.1.

Na Tabela 5.1 os **zeros** (0) representam os andares onde determinado elevador não

Tabela 5.1 - Representação matricial da configuração apresentada na Figura 5.7, configuração C_0 .

Andar\ Ascensor	A_t	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
ϵ_1	×	0	×	×	0	×	0	0	0	0
ϵ_2	×	0	0	×	×	0	×	0	0	0
ϵ_3	×	×	0	0	0	0	0	×	×	×
ϵ_4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_6	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

irá parar, os \times representam os andares no qual determinado ascensor irá parar, os ϵ_1 até ϵ_6 representam os ascensores e A_t , A_4 até A_{12} representam os andares, na qual A_t é o Andar Térreo e A_4 é o Andar 4, respectivamente. As simulações são realizadas em ambiente Microsoft Windows, utilizando máquina com processador Intel Pentium i7, 8GB de memória DDR 3, placa de vídeo NVIDIA GeForce GT540 2GB e HD de 1TB. As rotinas/códigos de programação em M -código são dispostas nos Apêndice A até Apêndice C.

De posse dos dados coletados e tratados é possível realizar as simulações. O primeiro passo nesta etapa são a **verificação** e a **validação**. A confiabilidade dos dados de entrada na simulação desempenha papel importante no processo de verificação e o intuito do processo de validação é verificar se o modelo/simulador construído se comporta como o sistema real. Desta forma, considerando que os dados de entrada foram coletados corretamente e foi utilizada a estratégia adotada atualmente pela gestão do Fórum no modelo (Figura 5.7), se os dados de saída do simulador forem próximos aos valores obtidos na coleta de dados, o modelo é considerado validado.

Como o trabalho utiliza valores de tempo discreto gerado randomicamente, necessita-se conhecer a função de densidade de probabilidade que melhor se adequa aos dados coletados de tempo de espera de cada ascensor. Desta forma, realiza-se o teste de aderência utilizando o critério de informação de Akaike (AIC), que reconhece a existência de modelo real que descreve os dados coletados e tenta escolher dentre o grupo de modelos avaliados, o com menor valor AIC. O modelo com menor valor de AIC é considerado o modelo de melhor ajuste.

Dentre as funções de densidade de probabilidade (FDP) que poderiam representar o modelo do tempo de espera nas filas dos ascensores, as que melhores se adequaram foram: Weibull, Nakagami, Gamma, Lognormal e Exponencial. Utilizando estas cinco funções de densidade de probabilidade, realiza-se o teste de aderência AIC para

os dados coletados de tempo de espera dos seis ascensores. A Tabela 5.2 dispõe os valores médios de AIC para cada uma das cinco FDP testada. Para os dados referentes as escadas, foi considerado que 5% das pessoas sobem pelas escadas, pois a quantidade de pessoas que utilizam as escadas é pequena e a FDP para esta entidade interfere infimamente nos resultados da simulação.

Tabela 5.2 - Teste de aderência nos tempos de espera de cada ascensor.

FDP	AIC
Weibull	71330
Nakagami	71620
Gamma	72810
Lognormal	74480
Exponencial	74970

Neste trabalho considera-se que o erro percentual médio abaixo de 10% valida o modelo e admite que o simulador está apto para ser utilizado. A função que medirá o desempenho de cada configuração será a média do tempo máximo de espera nas filas dos ascensores (M_{TM}). Assim, foi realizado a comparação entre os valores coletados das M_{TM} e os valores obtidos através da simulação. A Tabela 5.2 dispõe os valores medidos, simulados e o erro percentual entre eles. A média do erro percentual foi de 4,94% e os valores de tempo apresentados são referentes a média dos valores máximo de cada ascensor.

Tabela 5.3 - Valores coletados e simulados da matriz de configuração C_0 .

Ascensor	Coletado [s]	Simulado [s]	Desvio [%]
ϵ_1	179,00	168,80	5,69
ϵ_2	175,00	169,90	2,91
ϵ_3	175,00	171,46	2,05
ϵ_4	28,00	25,03	10,06
ϵ_5	187,00	174,68	6,58
ϵ_6	203,00	198,17	2,37

Na Tabela 5.3 o ascensor ϵ_4 tem valor de tempo de espera menor que os demais ascensores, tanto o valor coletado quanto o valor simulados. O ascensor ϵ_4 tem a restrição para somente servir de acesso aos magistrados e presos de justiça acompanhado de escolta militar. Desta forma, este procedimento foi inserido no processo de simulação, como solicitado pela diretoria do Fórum.

A partir do simulador validado é possível realizar novas simulações utilizando novas configurações para os ascensores. Assim, quatro novas configurações são testadas:

i) configuração C_1 que todos os ascensores param em todos os andares, ii) configuração C_2 na qual parte dos ascensores atende os andares inferiores e parte dos ascensores atende os andares superiores, iii) configuração C_3 que particionou os andares em três partes (inferior, médio e superior) e definiu ascensores para cada parte e iv) configuração C_H que considerou a implementação hipotética de mais um ascensor no Fórum.

A primeira configuração a ser avaliada utiliza a matriz de configuração C_1 , disposta na Tabela 5.4, na qual todos os ascensores param em todos os andares. A Tabela 5.5 dispõe os valores da média dos máximos dos tempos de espera $\overline{t_{max}}$, a média dos mínimos dos tempos de espera $\overline{t_{min}}$, a média das médias dos tempos de espera \overline{M} e a média dos desvios padrões dos tempos de espera $\overline{M_\sigma}$ de cada ascensor da configuração C_1 .

Tabela 5.4 - Matriz de configuração C_1 .

Andar\ Ascensor	A_t	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
ϵ_1	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_3	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_6	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Tabela 5.5 - Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_1 .

Tempo\ Ascensor	$\overline{t_{max}}$ [s]	$\overline{t_{min}}$ [s]	\overline{M} [s]	$\overline{M_\sigma}$ [s]
ϵ_1	132,351	17,437	58,673	27,356
ϵ_2	142,701	14,021	56,354	26,334
ϵ_3	154,653	10,399	49,003	25,798
ϵ_4	23,817	2,109	6,953	4,069
ϵ_5	173,489	10,846	66,031	35,367
ϵ_6	143,025	14,563	57,033	26,425

A configuração C_2 utiliza a matriz disposta Tabela 5.6, na qual os ascensores ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 atendem os andares A_t ao A_6 e os ascensores ϵ_5 e ϵ_6 atende os andares A_6 ao A_{12} . O ascensor ϵ_4 atende a todos os andares conforme restrição imposta pela diretoria do Fórum. A Tabela 5.7 dispõe os valores da média dos máximos dos tempos de espera $\overline{t_{max}}$, a média dos mínimos dos tempos de espera $\overline{t_{min}}$, a média das médias dos tempos de espera \overline{M} e a média dos desvios padrões dos tempos de espera $\overline{M_\sigma}$

de cada ascensor da configuração C_2 .

Tabela 5.6 - Matriz de configuração C_2 .

Andar\ Ascensor	A_t	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
ϵ_1	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0
ϵ_2	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0
ϵ_3	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0
ϵ_4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_5	0	0	0	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_6	0	0	0	×	×	×	×	×	×	×

Tabela 5.7 - Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_2 .

Tempo\ Ascensor	$\overline{t_{max}}$ [s]	$\overline{t_{min}}$ [s]	\overline{M} [s]	$\overline{M_\sigma}$ [s]
ϵ_1	129,787	17,012	56,314	8,001
ϵ_2	134,163	15,631	51,134	12,031
ϵ_3	153,745	9,736	48,765	15,744
ϵ_4	17,984	1,961	6,897	2,378
ϵ_5	174,061	11,001	63,576	18,629
ϵ_6	136,528	14,588	54,364	16,846

A configuração C_3 utiliza a matriz disposta na Tabela 5.8, na qual o ascensor ϵ_1 e o ascensor ϵ_5 atende os andares A_t ao A_6 , o ascensor ϵ_2 atende os andares A_6 ao A_8 , o ascensor ϵ_3 atende os andares A_8 ao A_{12} , o ascensor ϵ_4 atende todos os andares conforme restrição e o ascensor ϵ_6 atende os andares A_6 ao A_{12} . A Tabela 5.9 dispõe os valores da média dos máximos dos tempos de espera $\overline{t_{max}}$, a média dos mínimos dos tempos de espera $\overline{t_{min}}$, a média das médias dos tempos de espera \overline{M} e a média dos desvios padrões dos tempos de espera $\overline{M_\sigma}$ de cada ascensor da configuração C_3 .

Tabela 5.8 - Matriz de configuração C_3 .

Andar\ Ascensor	A_t	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
ϵ_1	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0
ϵ_2	0	0	0	×	×	×	0	0	0	0
ϵ_3	0	0	0	0	0	×	×	×	×	×
ϵ_4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_5	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0
ϵ_6	0	0	0	×	×	×	×	×	×	×

Na configuração C_H , Tabela 5.10, é realizada a hipótese de que novo ascensor pode

Tabela 5.9 - Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_3 .

Tempo\ Ascensor	$\overline{t_{max}}$ [s]	$\overline{t_{min}}$ [s]	\overline{M} [s]	$\overline{M_\sigma}$ [s]
ϵ_1	166,123	18,588	60,557	23,194
ϵ_2	169,871	10,982	56,372	31,356
ϵ_3	170,511	10,432	50,987	27,426
ϵ_4	21,069	1,873	7,099	3,731
ϵ_5	169,808	10,379	63,016	33,568
ϵ_6	170,099	10,894	52,017	28,747

ser implementado no Fórum, supondo assim a distribuição do acesso aos andares em sete ascensores. Para a configuração C_H o ascensor ϵ_1 e o ascensor ϵ_5 atendem os andares A_t ao A_6 , o ascensor ϵ_2 atende os andares A_6 ao A_8 , o ascensor ϵ_3 atende os andares A_8 ao A_{12} , o ascensor ϵ_4 atende a todos os andares conforme restrição, o ascensor ϵ_6 atende os andares A_6 ao A_{12} e o ascensor ϵ_7 atende a todos os andares. Na Tabela 5.11 são dispostos os valores da média dos máximos dos tempos de espera $\overline{t_{max}}$, a média dos mínimos dos tempos de espera $\overline{t_{min}}$, a média das médias dos tempos de espera \overline{M} e a média dos desvios padrões dos tempos de espera $\overline{M_\sigma}$ de cada ascensor da configuração C_H .

Tabela 5.10 - Matriz de configuração C_H .

Andar\ Ascensor	A_t	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
ϵ_1	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0
ϵ_2	0	0	0	×	×	×	0	0	0	0
ϵ_3	0	0	0	0	0	×	×	×	×	×
ϵ_4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_5	×	×	×	×	0	0	0	0	0	0
ϵ_6	0	0	0	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_7	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Tabela 5.11 - Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_H .

Tempo\ Ascensor	$\overline{t_{max}}$ [s]	$\overline{t_{min}}$ [s]	\overline{M} [s]	$\overline{M_\sigma}$ [s]
ϵ_1	105,924	19,051	43,125	14,084
ϵ_2	89,563	9,351	33,363	14,607
ϵ_3	86,456	6,333	24,441	14,028
ϵ_4	21,036	1,462	7,993	4,321
ϵ_5	98,521	6,431	37,911	20,110
ϵ_6	123,009	8,590	34,107	20,034
ϵ_7	97,148	9,335	38,154	17,111

É possível avaliar várias configurações e escolher a que melhor se adéqua a dinâmica

do ambiente em estudo. Esta dinâmica está inserida nos dados coletados, que são os parâmetros alvos para validar o simulador. Dentre as configurações C_1 , C_2 , C_3 e C_H , a que apresentou os melhores tempos foi a configuração hipotética C_H , com média de tempo ≈ 88 [s]. No entanto, para implementar a configuração C_H seria necessária a construção de mais um ascensor. Analisando os seis ascensores existente, a configuração que obteve os melhores tempos foi a configuração C_2 , com média de tempo ≈ 124 [s] e os menores desvios padrões. A configuração C_3 obteve a maior média de tempo e os maiores desvios padrões.

5.4 Obtenção da configuração utilizando processo de otimização

Com o objetivo de tornar mais rápido o conjunto de manipulações para encontrar a melhor configuração para o problema das filas dos ascensores no Fórum, foi aplicado o processo de otimização. Neste processo foi adotado o método de força bruta e utilizada a mesma máquina/computador usado para simular. No método de otimização foi empregada a minimização da função de avaliação dada por:

$$F(T_{max}) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \overline{t_{max_i}} + \sigma_{max_i} \quad (5.1)$$

na qual $F(T_{max})$ é a média dos máximos de todos os ascensores em determinada configuração, N é o número de ascensores, $i = 1, 2, \dots, N$, σ_{max_i} é o maior desvio padrão do ascensor i e t_{max} é o maior valor do tempo de espera na fila do ascensor i . Na expressão (5.1), quando $F(T_{max})$ for o menor valor possível, este será o melhor cenário.

As Tabela 5.12 e Tabela 5.13 dispõem a configuração encontrada pelo método de força bruta (configuração C_{Ot}) e os valores da média dos máximos dos tempos de espera $\overline{t_{max}}$, a média dos mínimos dos tempos de espera $\overline{t_{min}}$, a média das médias dos tempos de espera \overline{M} e a média dos desvios padrões dos tempos de espera $\overline{M_\sigma}$ de cada ascensor da configuração C_{Ot} .

Em todos os ascensores foi utilizado a FDP Weibull indicada pelo teste de aderência AIC. A dinâmica do sistema é mapeado pelo fator de forma k e fator de escala c de Weibull. Cada ascensor tem os valores de k e c com base nos valores coletados, Tabela 5.3. Assim, cada ascensor responde com dinâmica predefinida que depende dos dados coletados. Isto ocasiona diferenças nos valores de $\overline{t_{max}}$ para cada ascensor, de acordo com a dinâmica mapeada na coleta de dados. O Apêndice D dispõe os

Tabela 5.12 - Matriz de configuração C_{Ot} .

Andar\ Ascensor	A_t	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}
ϵ_1	0	0	×	0	0	0	0	×	0	×
ϵ_2	×	0	0	×	×	0	0	0	0	0
ϵ_3	×	×	×	×	×	×	0	×	×	×
ϵ_4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ϵ_5	×	0	0	×	0	×	×	×	0	0
ϵ_6	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

Tabela 5.13 - Tempo de espera dos ascensores para a matriz C_{Ot} .

Tempo\ Ascensor	$\overline{t_{max}}$ [s]	$\overline{t_{min}}$ [s]	\overline{M} [s]	$\overline{M_\sigma}$ [s]
ϵ_1	110,121	18,031	53,133	23,321
ϵ_2	50,496	34,986	38,763	24,602
ϵ_3	115,356	34,349	68,763	34,432
ϵ_4	10,786	4,961	6,998	3,561
ϵ_5	98,124	37,313	64,974	33,412
ϵ_6	117,889	34,432	68,033	35,329

valores do fator de forma k e do fator de escala c para todos os ascensores.

Para a configuração C_{Ot} , o ascensor ϵ_1 atende três andares que estão instalados comissões e diretorias do Fórum, Figura 5.4. Estas comissões e diretorias necessitam de acesso uma com as demais, utilizando o ascensor. Neste caso, o tempo de espera na fila pelo ascensor ϵ_1 é incrementado. O ascensor ϵ_2 atende três andares e apesar de atender o A_6 , um dos andares com maior fluxo de pessoas por pertencer a vara de família, ele atende o A_7 onde localiza a presidência do Tribunal de Justiça com baixo fluxo de pessoas. O ascensor ϵ_3 atende todos os andares exceto o A_9 e o ascensor ϵ_4 atende todos os andares com a restrição imposta pela diretoria do Fórum. O ascensor ϵ_5 atende cinco andares entre eles o A_6 e o ascensor ϵ_6 atende todos os andares, obtendo o maior valor das $\overline{t_{max}}$.

Na realização do processo de otimização foi analisada ≈ 30 matrizes de configuração. Para cada matriz de configuração foi considerado 261 dias uteis, não sendo considerados os 52 sábados e 52 domingos, período que não foram realizadas coletas. Para realizar o processo de simulação e otimização foram consumidas ≈ 72 horas.

5.5 Comparação entre as configurações

Para a realização da análise macroscópica, constrói-se o resumo dos valores obtidos em todas as configurações estudadas, dispostas na Tabela 5.14. Observa-se que a configuração C_{Ot} obteve a melhor $\overline{t_{max}} = 83,87$ e a configuração C_H obteve valor

próximo ao da configuração C_{Ot} , com $\approx 6\%$ maior. No entanto, a configuração C_H é a configuração hipotética que considera um ascensor a mais. Considerando somente os ascensores existentes, a configuração C_2 obteve valor das $\overline{t_{max}}$ de $\approx 48\%$ maior que o valor da configuração C_{Ot} e $\overline{M_\sigma}$ com $\approx 52\%$ menor.

Tabela 5.14 - Resumo dos dados obtidos das configurações.

Configuração	$\overline{t_{max}}$ [s]	$\overline{t_{min}}$ [s]	\overline{M} [s]	$\overline{M_\sigma}$ [s]
C_0	151,340	11,789	52,388	26,646
C_1	128,339	9,864	49,007	24,224
C_2	124,579	11,654	46,841	12,271
C_3	144,579	10,524	48,341	24,670
C_H	88,951	8,650	31,299	14,89
C_{Ot}	83,870	27,345	50,110	25,776

A configuração utilizada pelo Fórum (configuração C_0) obteve os maiores valores de: $\overline{t_{max}}$, \overline{M} e $\overline{M_\sigma}$. A configuração C_{Ot} apresenta-se com menor valor de $\overline{t_{max}}$, porém, tem o maior valor de $\overline{t_{min}}$ e os segundos maiores valores de \overline{M} e $\overline{M_\sigma}$.

5.6 Análise do consumo de energia

Atualmente está em pauta no mundo o diálogo da aplicação das estratégias para diminuir o consumo de energia elétrica. Há a busca por aperfeiçoamentos na eficiência energética dos equipamentos, no qual os ascensores são responsáveis por parte significativa deste consumo, resultando em 3% a 10% do total de energia consumida em edifícios comerciais (ISIDRO, 2010).

Analisando a Tabela 5.14, pode-se tomar a decisão de utilizar a matriz de configuração C_{Ot} . No entanto, há a necessidade de contabilizar o consumo de energia para cada matriz de configuração estudada. Nos ascensores elétricos, o consumo de energia ocorre com o ascensor em viagem ou parado em determinado andar. Para o cálculo deste consumo é utilizada a expressão (4.1). A Tabela 5.15 dispõe o comparativo do consumo de energia elétrica entre as várias configurações estudadas.

Algumas das variáveis da expressão (4.1) foram obtidas utilizando estratégias como: i) a velocidade nominal dos ascensores utilizou placa de prototipagem eletrônica com acelerômetro MPU 6050 e ii) a condição de carga foi realizada em horários e dias diferentes pelos funcionários da manutenção dos ascensores, horário de picos com carga total, horário de intervalo com carga média e horário com carga leve. De posse destes dados foram realizadas média para cada ascensor.

Tabela 5.15 - Análise das configurações \times consumo de energia.

Configurações	<i>KWh</i>
C_0	5493,77
C_1	5967,34
C_2	5398,13
C_3	5699,05
C_H	6329,22
C_{Ot}	5731,64

Na Tabela 5.15, a configuração C_H obteve o maior consumo de energia por considerar um ascensor a mais. Na sequência, a configuração C_{Ot} obtém consumo de energia maior que das configuração C_0 , configuração C_2 e configuração C_3 . A configuração C_2 obteve o menor consumo de energia. É necessário observar que o consumo dos ascensores parado é menor que o consumo em viagem. Na configuração C_{Ot} os ascensores são mais utilizados, ficando mais tempo em viagem $t_{movimento}$ enquanto nas demais configurações o tempo dos ascensores parado $t_{standby}$ é maior.

De posse da Tabela 5.14 e Tabela 5.15, pode-se realizar a tomada de decisão de forma mais assertiva. Por exemplo, a configuração C_2 obteve redução em $\overline{t_{max}}$ e redução no consumo de energia de $\approx 1,7\%$, quando comparado com a configuração C_0 . No entanto, a configuração C_2 provoca transtorno para os indivíduos que acessarão andares acima do A_6 , neste caso necessitarão realizar a troca de ascensor (veja Tabela 5.7). A configuração C_{Ot} obteve o menor $\overline{t_{max}}$, porém, o consumo de energia aumentou em $\approx 4\%$. Levando em consideração a redução da $\overline{t_{max}}$, o aumento de $\approx 4\%$ e a eficiência produzida pela configuração C_{Ot} (não há necessidade de troca de ascensor), esta pode ser considerada a melhor configuração deste estudo.

5.7 Discussão

Neste trabalho foi considerado o problema real que ocorre no Fórum Dr. Heitor Moraes Fleury, na Cidade de Goiânia/Goiás. As maiores dificuldades neste trabalho foram: i) a realização da coleta de dados e ii) obtenção dos dados elétricos dos ascensores. Neste último, como os ascensores são antigos, não foi possível conseguir a ficha de dados, sendo necessário realizar medidas elétricas no local.

Para o consumo de energia dos ascensores não foi levado em consideração o sistema de iluminação. Os ascensores utilizam sistema de iluminação ineficiente, encontrando-se ativada/ligada permanentemente, quer o equipamento esteja em viagem ou parado. O desejo dos autores deste trabalho era que o processo de otimização pudesse resolver o problema das filas no Fórum. No entanto, mesmo obtendo valores

menores das $\overline{t_{max}}$, quando comparados com as melhores configurações (redução de $\approx 30\%$) e até mesmo com a configuração utilizada pelo Fórum (redução de $\approx 44\%$), o valor da $\overline{t_{max}} = 83,87$ é elevado, se analisada a quantidade de indivíduos que circulam pelo Fórum.

Infelizmente, a alternativa tomada pela diretoria do Fórum foi construir novo edifício com ascensores modernos em outro local, uma vez que a troca dos ascensores e a implementação/inserção de novos ascensores no sistema em estudo, seria oneroso financeiramente e não resolveria outros problemas de fluxo de indivíduos como dimensões dos ambientes internos.

Este trabalho oportunizou espaço para conhecer a realidade pouco observada dos indivíduos que trabalham e transitam nos Fóruns. Possibilitou a produção do saber científico proporcionando intervenções nas fragilidades encontradas no sistema estudado, mapeando variáveis/situações diversas. A pesquisa estimulou o olhar minucioso e investigador, na busca de aplicações prática que auxiliaria na facilitação dos trabalhos realizados no sistema estudado.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

O intuito desse trabalho foi construir o simulador de múltiplos ascensores para analisar as condições de tráfego vertical de pessoas. Consequentemente, foi otimizado o tempo de espera de cada ascensor e analisado o consumo de energia antes e após o processo de otimização do tempo de espera dos ascensores.

Diante da proposta de minimizar o tempo de espera nas filas dos ascensores, levando em consideração os resultados obtidos, a metodologia proposta reduziu o tempo de espera nas portas dos ascensores em $\approx 44\%$, podendo ser utilizada para simular sistemas reais de múltiplos ascensores.

Comparando a NBR 5665 (ABNT, 1983) com os resultados obtidos, pôde-se verificar que os itens indicados na norma foram atendidos pelo método de otimização utilizado. Outras configurações foram geradas e observou-se que essas novas configurações também atenderam aos requisitos da NBR 5665. Desta forma, o administrador do edifício pode escolher os parâmetros ideais que melhor se adequam a dinâmica do sistema.

A melhor configuração antes do processo de otimização, a configuração C_2 com seis ascensores, apresentou redução no tempo de espera de $\approx 17\%$ e a configuração C_H com sete ascensores apresentou redução no tempo de espera de $\approx 41\%$. Com o modelo otimizado através do método de força bruta, a configuração C_{Ot} com seis ascensores apresentou redução no tempo de espera de $\approx 44\%$.

Comparando o consumo de energia dos ascensores com as novas configurações, antes e após o processo de otimização, a configuração C_2 proporcionou redução no consumo de energia em $\approx 1,7\%$, a configuração C_H proporcionou aumento de $\approx 15\%$ e a configuração C_{Ot} obteve aumento de $\approx 4\%$. Porém, a eficiência no atendimento dos usuários foi maior devido a redução das filas nestas três configurações.

Após a validação do simulador, este encontra-se apto a ser utilizado em edificações com múltiplos ascensores. Assim, este trabalho apresentou a importância da avaliação das filas em portas de ascensores nos edifícios antigos, os quais não possuem ascensores modernos e inteligentes. O estudo apresentou que substituir ascensores antigos por ascensores modernos é opção onerosa financeiramente. Portanto, utilizando o modelo proposto neste trabalho, é possível reduzir o tamanho das filas em portas de ascensores encontrando configuração otimizada para o sistema.

6.1 Contribuição do trabalho

As contribuições deste trabalho pode assim ser descritas:

- Construção de simulador computacional para o tráfego de múltiplos ascensores;
- Simulador para previsões, utilizando dados probabilísticos que representem o sistema real.
- Produção bibliográfica:

Artigos:

- SILVA, C. A., Silva, D. F. A., Vitor, L. R., Pinheiro Neto, D., Kazu, L., Calixto, W. P. Modeling, simulation and optimization of people traffic in elevators. In: 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). IEEE, 2019.
- SILVA, C. A., Oliveira, M. N., Santos, L. E., Barbosa, J. L. F., Silva, D. F. A., Calixto, W. P. Simulation and minimization of waiting time in rows of elevators of public buildings. In: 2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON). IEEE, 2017.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicar outros métodos de otimização heurística no problema para eventual comparação dos resultados.
- Utilizar a metodologia de simulação desenvolvida para gerar previsões do sistema de ascensores.
- Realizar estudo do consumo de energia considerando melhoria no sistema de iluminação dos ascensores.
- Utilizar otimização multiobjetivo com foco no tempo e na economia de energia elétrica concomitantemente.

APÊNDICE A

Rotina do Matlab

```
1 format long ; close all; clear all; clc; ...
   warning('off','MATLAB:xlswrite:AddSheet');
2 tic;
3
4 %% Elevadores Forum
5 % inicacao de parametros
6 % Tempo de simulacao
7
8 time = 28800; %tempo em segundos referente a 8 horas, periodo ...
   comercial
9 dias = 365; %quantidade de dias da simulacao
10 mediaIdeal = 50; %referencia para validacao da otimizacao
11 desvioIdeal = 10; %referencia para avaliacao da otimizacao
12 mediaAtual = 10000; %referencia inicial para entrar no laco
13 melhorResultado = 10000;%referencia inicial para comparacao e ...
   manutencao do melhor resultado
14 desvioAtual = 500; %referencia inicial para entrar no laco
15 qtdadeInt = 1; %quantidade de interacoes/cenarios avaliados
16 q_elevador = 6; %quantidade de elevadores
17 q_andar = 10; %quantidade de andares
18 contDimensao = 1; %contador de dimensoes
19 qtdDimensao = 10; %quantidade de dimensoes
20
21 %% Inicio dos cenarios
22
23 %%%% Matrix de probabilidade de elevadores em cada andar
24 matriz_prob = geraMatriz(q_andar,q_elevador,qtdDimensao);
25
26 % laco condicional para verificacao de alcance da mÃodia ...
   Ideal+desvio Ideal
27 % ou a quantidade de interacoes
28 while (((mediaIdeal+desvioIdeal)<(mediaAtual+desvioAtual)) && ...
   qtdadeInt<=100)
29
30 %laco de repeticao para testar cada dimensao
31 for contDimensao=1:1:10
32
33 %%Inicio do laco da simulacao equivalente a 365 dias
34 for cont=1:1:dias
35 %%%% tempo de espera do elevador no andar %%
```

```

36 t_andar = randi(21)+9;
37 t_andar1 = randi(21)+9;
38 t_andar2 = randi(21)+9;
39 t_andar3 = randi(21)+9;
40 t_andar4 = randi(21)+9;
41 t_andar5 = randi(21)+9;
42 t_andar6 = randi(21)+9;
43 t_andar7 = randi(21)+9;
44 t_andar8 = randi(21)+9;
45 t_andar9 = randi(21)+9;
46
47 %%%% Vetor de que demonstra uso dos elevadores %%%%%%%%%%%%%%%
48 j_elevador = [1/5 1/5 1/5 1/15 1/6 1/6];
49
50 %%%%%%%%%%%%%% Probabilidade da entidade no andar
51 m_andar_1 = matriz_prob(1, :, contDimensao);
52 m_andar_2 = matriz_prob(2, :, contDimensao);
53 m_andar_3 = matriz_prob(3, :, contDimensao);
54 m_andar_4 = matriz_prob(4, :, contDimensao);
55 m_andar_5 = matriz_prob(5, :, contDimensao);
56 m_andar_6 = matriz_prob(6, :, contDimensao);
57
58 %% Time-Based Entity Generator
59 %%Definicao do andar
60 %Distribuicao abribraria discreta
61 pd = makedist('weibull');
62 v_andar = [1:1:q_andar]; % vetor de valores do andar
63 prob_andar = random(pd, q_andar, 1);
64 p_andar = prob_andar./sum(prob_andar);
65 p_andar = p_andar(:);
66 v_elevador = [1:1:q_elevador]; % vetor de valores do elevador
67 prob_elevador = random(pd, q_elevador, 1);
68 p_elevador = prob_elevador./sum(prob_elevador);
69 p_elevador = p_elevador(:);
70
71 %% Iniciacao da simulacao
72 oldFormat = get(0, 'format');
73 format long;
74 modelname = 'Elevadores_Forum_Clebes';
75 load_system(modelname);
76 se_randomize_seeds(modelname);
77 sim(modelname);
78 format(oldFormat);
79 clear modelname oldFormat;
80

```

```

81 elevador_1 = [ elev_1_3(end) elev_1_4(end) ...
82 elev_1_5(end) elev_1_6(end) elev_1_7(end) elev_1_8(end)...
83 elev_1_9(end) elev_1_10(end) elev_1_11(end) elev_1_12(end)];
84
85 elevador_2 = [ elev_2_3(end) elev_2_4(end) ...
86 elev_2_5(end) elev_2_6(end) elev_2_7(end) elev_2_8(end)...
87 elev_2_9(end) elev_2_10(end) elev_2_11(end) elev_2_12(end)];
88
89 elevador_3 = [ elev_3_3(end) elev_3_4(end) ...
90 elev_3_5(end) elev_3_6(end) elev_3_7(end) elev_3_8(end)...
91 elev_3_9(end) elev_3_10(end) elev_3_11(end) elev_3_12(end)];
92
93 elevador_4 = [ elev_4_3(end) elev_4_4(end) ...
94 elev_4_5(end) elev_4_6(end) elev_4_7(end) elev_4_8(end)...
95 elev_4_9(end) elev_4_10(end) elev_4_11(end) elev_4_12(end)];
96
97 elevador_5 = [ elev_5_3(end) elev_5_4(end) ...
98 elev_5_5(end) elev_5_6(end) elev_5_7(end) elev_5_8(end)...
99 elev_5_9(end) elev_5_10(end) elev_5_11(end) elev_5_12(end)];
100
101 elevador_6 = [ elev_6_3(end) elev_6_4(end) ...
102 elev_6_5(end) elev_6_6(end) elev_6_7(end) elev_6_8(end)...
103 elev_6_9(end) elev_6_10(end) elev_6_11(end) elev_6_12(end)];
104
105 %
106 % figure
107 % subplot(1,2,1,'align');
108 % bar(x,elevador_1)
109 % xlim([2.5 12.5])
110 % title('Elevador 1','FontSize',14,'FontWeight','bold');
111 % xlabel ('Andares','FontSize',14,'FontWeight','bold');
112 % ylabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold');
113 % subplot(1,2,2,'align');
114 % plot(elev_1_f);
115 % title('Tempo de Espera do Elevador ...
    1','FontSize',14,'FontWeight','bold');
116 % xlabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold');
117 % ylabel ('Tempo','FontSize',14,'FontWeight','bold');
118 %
119 % figure
120 % subplot(1,2,1,'align');
121 % bar(x,elevador_2);
122 % xlim([2.5 12.5]);
123 % title('Elevador 2','FontSize',14,'FontWeight','bold');
124 % xlabel ('Andares','FontSize',14,'FontWeight','bold');

```

```

125 % ylabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold');
126 % subplot(1,2,2,'align');
127 % plot(elev_2_f)
128 % title('Tempo de Espera do Elevador ...
      2','FontSize',14,'FontWeight','bold');
129 % xlabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold');
130 % ylabel ('Tempo','FontSize',14,'FontWeight','bold');
131 %
132 % figure
133 % subplot(1,2,1,'align');
134 % bar(x,elevador_3);
135 % xlim([2.5 12.5]);
136 % title('Elevador 3','FontSize',14,'FontWeight','bold');
137 % xlabel ('Andares','FontSize',14,'FontWeight','bold');
138 % ylabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold')
139 % subplot(1,2,2,'align');
140 % plot(elev_3_f)
141 % title('Tempo de Espera do Elevador ...
      3','FontSize',14,'FontWeight','bold');
142 % xlabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold');
143 % ylabel ('Tempo','FontSize',14,'FontWeight','bold');
144 %
145 %
146 % figure
147 % subplot(1,2,1,'align');
148 % bar(x,elevador_4);
149 % xlim([2.5 12.5]);
150 % title('Elevador 4','FontSize',14,'FontWeight','bold');
151 % xlabel ('Andares','FontSize',14,'FontWeight','bold');
152 % ylabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold');
153 % subplot(1,2,2,'align');
154 % plot(elev_4_f)
155 % title('Tempo de Espera do Elevador ...
      4','FontSize',14,'FontWeight','bold');
156 % xlabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold');
157 % ylabel ('Tempo','FontSize',12,'FontWeight','bold');
158 %
159 %
160 % figure
161 % subplot(1,2,1,'align');
162 % bar(x,elevador_5);
163 % xlim([2.5 12.5]);
164 % title('Elevador 5','FontSize',12,'FontWeight','bold');
165 % xlabel ('Andares','FontSize',12,'FontWeight','bold');
166 % ylabel ('Usuarios','FontSize',12,'FontWeight','bold');

```

```

167 % subplot(1,2,2,'align');
168 % plot(elev_5_f)
169 % title('Tempo de Espera do Elevador ...
      5','FontSize',12,'FontWeight','bold');
170 % xlabel ('Usuarios','FontSize',12,'FontWeight','bold');
171 % ylabel ('Tempo','FontSize',12,'FontWeight','bold');
172 %
173 %
174 % figure
175 % subplot(1,2,1,'align');
176 % bar(x,elevador_6);
177 % xlim([2.5 12.5]);
178 % title('Elevador 6','FontSize',14,'FontWeight','bold');
179 % xlabel ('Andares','FontSize',14,'FontWeight','bold');
180 % ylabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold');
181 % subplot(1,2,2,'align');
182 % plot(elev_6_f)
183 % title('Tempo de Espera do Elevador ...
      6','FontSize',14,'FontWeight','bold');
184 % xlabel ('Usuarios','FontSize',14,'FontWeight','bold');
185 % ylabel ('Tempo','FontSize',14,'FontWeight','bold');
186
187
188 %Quantidade de pessoas por elevador
189 total_pessoas_ele_1(cont,1) = sum (elevador_1);
190 total_pessoas_ele_2(cont,1) = sum (elevador_2);
191 total_pessoas_ele_3(cont,1) = sum (elevador_3);
192 total_pessoas_ele_4(cont,1) = sum (elevador_4);
193 total_pessoas_ele_5(cont,1) = sum (elevador_5);
194 total_pessoas_ele_6(cont,1) = sum (elevador_6);
195
196
197 %           %tempo maximo de espera na fila
198 %           t_espera_1 = (max (elev_1_f));
199 %           t_espera_2 = (max (elev_2_f));
200 %           t_espera_3 = (max (elev_3_f));
201 %           t_espera_4 = (max (elev_4_f));
202 %           t_espera_5 = (max (elev_5_f));
203 %           t_espera_6 = (max (elev_6_f));
204 %           t_total = t_espera_1 + t_espera_2 + t_espera_3 + ...
      t_espera_4 + t_espera_5 + t_espera_6;
205
206 %           % tempo medio de espera na fila
207 %           m_media_1(cont,1) = (mean (elev_1_f));
208 %           m_media_2(cont,1) = (mean (elev_2_f));

```

```

209 %           m_media_3(cont,1) = (mean (elev_3_f));
210 %           m_media_4(cont,1) = (mean (elev_4_f));
211 %           m_media_5(cont,1) = (mean (elev_5_f));
212 %           m_media_6(cont,1) = (mean (elev_6_f));
213
214 %tempo de fila
215 Vf_1(cont,1) = max (elev_1_f);
216 Vf_2(cont,1) = max (elev_2_f);
217 Vf_3(cont,1) = max (elev_3_f);
218 Vf_4(cont,1) = max (elev_4_f);
219 Vf_5(cont,1) = max (elev_5_f);
220 Vf_6(cont,1) = max (elev_6_f);
221
222 end
223
224 %reunindo os maximos de cada elevador em uma matriz maxs
225 maxs(1,1) = max(Vf_1);
226 maxs(1,2) = max(Vf_2);
227 maxs(1,3) = max(Vf_3);
228 maxs(1,4) = max(Vf_4);
229 maxs(1,5) = max(Vf_5);
230 maxs(1,6) = max(Vf_6);
231
232 mediaAtual = mean(maxs);%media dos maximos de todos os elevadores
233 desvioAtual = std(maxs);%desvio padrao dos maximos de todos os ...
           elevadores
234
235 if((mediaAtual+desvioAtual)<melhorResultado)
236 melhorResultado = mediaAtual+desvioAtual;
237 melhorCenario = matriz_prob(:, :, contDimensao);
238 %           melhorCenario(1,11,1) = melhorResultado;
239 end
240
241 end
242 % Matrix de probabilidade de elevadores em cada andar menos
243 matriz_prob = geraMatriz(q_andar,q_elevador, qtdDimensao);
244
245 matriz_prob(:, :, 10) = melhorCenario;
246
247 qtdadeInt = qtdadeInt + 1; %contador de interacoes
248 end
249
250 % fprintf('O melhor resultado da configuracao Ã© %d: \n', ...
           melhorResultado);

```

```
251 % fprintf('O melhor cenario de configuracao Ã© %d: \n', ...
    melhorCenario);
252
253
254 toc
```


APÊNDICE B

Matriz probabilidade

```
1     function [M] = geraMatriz(Na,Ne,Ni)
2     %
3     % Ne = 6;
4     % Na = 10;
5     % Ni = 10;
6
7     M = zeros(Ne,Na);
8
9     for ic = 1:Ni
10    for ia = 1:Ne
11    m = randi([1,Na]); %quantidade de andares que vai parar
12    n = randperm(Na,m); %andares onde o elevador vai parar
13    for ib = 1:m %o primeiro laco fixa a posicao da linha da matriz
14    for im = 1:Na %o segundo laco vai andando pelas colunas
15    if n(ib) == im %faz a comparacao do valor que esta dentro do ...
        vetor n para saber se nessa posicao o elevador atual ira ...
        parar.
16    M(ia,im,ic) = 1/m; %faz a atribuicao da porcentagem de cada ...
        posicao de acordo com a relacao 1/qtdade de paradas
17    end
18    end
19    end
20    end
21    end
22
23    M(4, :, :) = 1/10;
```


APÊNDICE C

Probabilidade dos ascensores

```
1
2   format compact; close all; clear all; clc;
3
4
5   % gera uma matriz 6x10 com nÃºmeros [0 1]
6   r = randi([0 1], 6, 10);
7
8   % gera a matriz de probabilidade 6x10 preenchida com zeros
9   matriz_prob = zeros(6,10);
10
11  % percorrendo as linhas da matriz 'r'
12  for i = 1:size(r,1)
13
14  % localiza todos os numeros '1' da linha da matriz 'r'
15  aux = find(r(i,:));
16
17  % probabilidade da linha corrente
18  t = 1 / length(aux);
19
20  % atualizando os valores na matriz de probabilidade
21  for j = 1:size(aux, 2)
22  matriz_prob(i,aux(j)) = t;
23  end
24
25
26  end
27
28  r
29  matriz_prob
```


APÊNDICE D

Parâmetros da função de densidade de probabilidade de Weibull.

Ascensor	k	C
ϵ_1	3,0989	173,9404
ϵ_2	2,9875	173,8790
ϵ_3	2,9951	176,7846
ϵ_4	1,0240	58,0857
ϵ_5	3,2122	174,0125
ϵ_6	3,3521	174,4217

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas - nbr 5665 **Cálculo de tráfego nos elevadores**, procedimentos versão corrigida 1987. São Paulo, SP, Brasil, 1983. 24, 36, 69
- ALWAN, N. A. Systolic parallel architecture for brute-force autoregressive signal modeling. **Computers & Electrical Engineering**, v. 39, n. 4, p. 1358 – 1366, 2013. 43
- ANDRADE, S. F. **Simulação baseada em agentes para alocação de pessoal em procedimento de classificação de risco na emergência de um hospital**. Tese (Doutorado) — COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010. 28
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. [S.l.: s.n.], 2007. 29
- ASTIAZARA, M. V. **Protótipo de Simulador de elevador**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Luterana do Brasil, 2005. 33, 36
- BANKS, J.; II, J. S. C. Introduction to discrete-event simulation. In: ACM. **Proceedings of the 18th conference on Winter simulation**. [S.l.], 1986. 31
- BARBOSA, R.; RODRIGUES, T.; ALMEIDA, R.; ESPINDOLA, J.; MOREIRA, D. A modelagem e análise do sistema de filas de caixas de pagamento em uma drogaria: Uma aplicação da teoria das filas. **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Salvador: ENEGEP, 2009. 23
- BARNEY, G. C.; AL-SHARIF, L. **Elevator traffic handbook: theory and practice**. [S.l.]: Routledge, 2003. 24
- CALIXTO, W. P. **Aplicação do mapeamento conforme no cálculo do fator de Carter**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, 2008. 39, 40
- CALIXTO, W. P.; COIMBRA, A. P.; MOTA, J. C. D.; WU, M.; SILVA, W. G.; ALVARENGA, B.; BRITO, L. d. C.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G.; NETO, P. D. Troubleshooting in geoelectrical prospecting using real-coded genetic algorithm with chromosomal extrapolation. **International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**, Wiley Online Library, v. 28, n. 1, p. 78–95, 2015. 39

- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to discrete event systems**. [S.l.]: Springer, 2007. 23, 30
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S.; OLSDER, G. J. **Introduction to the modelling, control and optimization of discrete event systems**. [S.l.]: Springer, 1995. 30
- CHWIF, L.; MEDINA, A. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos**. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2014. 27, 30
- COELHO, R. J.; LANA, P. F.; SILVA, A. C.; SANTOS, T. F.; FIORONI, M. M.; FRANZESE, L. A. G.; MOTA, D. de O.; SILVA, L. B. D. Operational simulation model of the raw material handling in an integrated steel making plant. In: **IEEE Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter**. [S.l.], 2009. 23
- CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. **Introduction to Algorithms, Third Edition**. 3rd. ed. [S.l.]: The MIT Press, 2009. 41, 42
- CORTÉS, P.; LARRAÑETA, J.; ONIEVA, L. Genetic algorithm for controllers in elevator groups: analysis and simulation during lunchpeak traffic. **Applied Soft Computing**, Elsevier, v. 4, n. 2, p. 159–174, 2004. 24
- COSTA, E. M. M. **Introdução aos Sistemas a Eventos Discretos e à Teoria de Controle Supervisório**. [S.l.]: Editora alta Books, 2005. 29
- CURY, J. E. R. Teoria de controle supervisório de sistemas a eventos discretos. In: **V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. Canela, Rio Grande do Sul, Brasil: [s.n.], 2001. 28, 30, 31
- EL-SHARKAWI, M. A.; LEE, K. Y. **Modern heuristic optimization techniques:: theory and applications to power systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. 41
- ENQVIST, O.; JIANG, F.; KAHL, F. A brute-force algorithm for reconstructing a scene from two projections. In: **Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. 42
- FORERO, A. A. P. **Estudo e simulação de técnicas de controle de tráfego de grupo de elevadores usando automação industrial**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2011. 23, 33

GOMES, F. A. **Processo de otimização aplicado em método descritivo da análise de dados**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2018. 28

GOMES, P. H. G. **Geometria de dutos de escape otimizada para aplicação na cogeração da produção de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2017. 40

GOMES, V. M. **Complexidade natural de sistemas com base em análise de sensibilidade**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Goiás, 2020. 27, 28

HARREL, C. R.; MOTT, J. R.; BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J. **Simulação otimizando os sistemas**. São Paulo: Belge IMAM, 2002. 31

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2013. 29

HOLTZ, G. C. d. C. **Traçado automático de envoltórias de esforços em estruturas planas utilizando um algoritmo evolucionário**. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005. 39

IGLESIAS, F. **Comportamentos em filas de espera: Uma abordagem multimétodos**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. 23

ISIDRO, L. M. D. S. **Sistemas de automação e manutenção de edifícios: eficiência energética dos sistemas de elevação vertical para transporte de pessoas**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010. 24, 25, 66

JOHNSONBAUGH, R.; SCHAEFER, M. **Algorithms**. [S.l.]: Pearson Education, 2004. 42

LAW, A. M.; KELTON, W. D.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2000. 33

LEE, K. Y.; EL-SHARKAWI, M. A. **Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. 39, 41

LEVITIN, A. **Introduction to the Design and Analysis of Algorithms**. 3rd. ed. [S.l.]: Pearson, 2011. 41, 42

- LINARO, D.; STORACE, M. bal: A library for the brute-force analysis of dynamical systems. **Computer Physics Communications**, 2015. 43
- MARJA-LIISA, S. **Elevator group control with artificial intelligence**. [S.l.]: Helsinki University of Technology, 1997. 35
- MARTINEZ, J. M.; SANTOS, S. A. Métodos computacionais de otimização. **Colóquio Brasileiro de Matemática**, v. 20, 1995. 40
- MEDEIROS, L. F.; MOSER, A.; SANTOS, N. D. A simulação computacional como técnica de pesquisa na administração. **Revista Intersaberes**, v. 9, n. Espec, p. 463–485, 2015. 32
- MIYAGI, P. Introdução a simulação discreta. **São Paulo: USP**, v. 10, p. 4–15, 2016. 32
- MOBUS, G. E.; KALTON, M. C. et al. **Principles of systems science**. [S.l.]: Springer, 2015. 27
- PEPYNE, D. L.; CASSANDRAS, C. G. Optimal dispatching control for elevator systems during uppeak traffic. **Control Systems Technology, IEEE Transactions on, IEEE**, v. 5, n. 6, p. 629–643, 1997. 35
- PRADO, D. Usando o arena em simulação, série pesquisa operacional. 2^a. **Edição. Belo Horizonte: INDG-Instituto de Desenvolvimento Gerencial**, 2004. 28, 29
- RAMOS, D. H. **A guerra dos lugares nas ocupações de edifícios abandonados do centro de São Paulo**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009. 23
- RITZMAN, L. P.; KRAJEWSKI, L. J. **Administração da produção e operações**. [S.l.]: Prentice Hall, 2003. 23
- ROBESON, J. F.; COPACINO, W. C. **The Logistics handbook**. [S.l.]: Simon & Schuster, 1994. 32
- SALIBY, E. Softwares para simulação. **Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro**, v. 16, n. 1, p. 67–71, 1997. 33
- SANTOS, A. B. D. **A interface do elevador na arquitetura. Aspectos projetuais, éticos e sociais**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007. 34

SANTOS, L. E. B. D. **Otimização do atendimento médico-hospitalar emergencial utilizando sistema a eventos discretos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Goiás, 2016. 42

SANTOS, M. D. M.; COELHO, G. M.; SANTOS, D. M. D.; LÉLIO, F. F. Prospecção de tecnologias de futuro: métodos, técnicas e abordagens. **Parcerias estratégicas**, v. 9, n. 19, p. 189–230, 2010. 42

SARAMAGO S. P. E STEFFEN JUNIOR, V. Introdução técnicas de otimização çã em engenharia. **Horizonte científico**, v. 1, n. 9, 2008. 41

SCHWAAB, M. **Avaliação de algoritmos heurísticos de otimização em problemas de estimação de parâmetros**. Dissertação (Mestrado) — COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005. 41

SEDRACK, D. Hydraulic elevators: A look at the past, present and future. **Elevator World**, THE ELEVATOR WORLD SOURCE, v. 48, n. 6, p. 100–106, 2000. 36

SERAFIN, R. M. **Avaliação da redução do consumo de energia elétrica em função do retrofit no edifício sede da Eletrosul**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. 25

SILVA, W. A. D. **Otimização de parâmetros da gestão baseada em atividades aplicada em uma célula de manufatura**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2005. 32

SOBRAL, T. D. O. **Estudo e Análise de Desempenho de Algoritmos para Elevadores Inteligentes**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011. 24, 25

STRAKOSCH, G. R.; CAPORALE, B. **The vertical transportation handbook**. [S.l.]: Wiley Online Library, 2010. 25, 34, 35, 36

TAHA, H. A. **Pesquisa operacional**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2008. 43

TALBI, E.-G. **Metaheuristics: from design to implementation**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. 41

TOSTÕES, A. Construção moderna: as grandes mudanças do século XX. **Momentos de Inovações e Engenharia em Portugal no Século XX**. Lisboa: Dom Quixote, p. 131–153, 2004. 34, 36

TROLLER, E. **Eficiência energética em elevadores**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. 24, 25

WILSON, M. P. General system theory: Towards the unification of science. In: **Proceedings of the 58th Annual Meeting of the ISSS-2014 United States**. [S.l.: s.n.], 2014. 28

ZILLER, R. M. A abordagem ramadge-wonham no controle de sistemas e eventos discretos: contribuições à teoria. 1993. 30