

**DÉBORAH APARECIDA SOUZA DOS REIS**

**PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTAS  
DE INSPEÇÃO EM PLANTAS INDUSTRIAIS  
VISANDO A MINIMIZAÇÃO DA DOSE DE RUÍDO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**2020**

**DÉBORAH APARECIDA SOUZA DOS REIS**

**PROCEDIMENTO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE INSPEÇÃO  
EM PLANTAS INDUSTRIAIS VISANDO A MINIMIZAÇÃO DA  
DOSE DE RUÍDO**

Tese apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica  
da Universidade Federal de Uberlândia,  
como parte dos requisitos para obtenção  
do título de **DOUTOR EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Mecânica dos  
Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Antonio  
Viana Duarte.

**Uberlândia – MG  
2020**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R375 Reis, Deborah Aparecida Souza dos, 1982-  
2021 Procedimento de Otimização de Rotas de Inspeção em  
Plantas Industriais Visando a Minimização da Dose de  
Ruído [recurso eletrônico] / Deborah Aparecida Souza dos  
Reis. - 2021.

Orientador: Marcus Antonio Viana Duarte.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.30>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Duarte, Marcus Antonio  
Viana, 1959-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III.  
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secpomec@mecanica.ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, nº 308, COPEM				
Data:	15/01/2021	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	11713EMC008				
Nome do Discente:	Déborah Aparecida Souza dos Reis				
Título do Trabalho:	Procedimento de Otimização de Rotas de Inspeção em Plantas Industriais Visando a Minimização da Dose de Ruído				
Área de concentração:	Mecânica dos Sólidos e Vibrações				
Linha de pesquisa:	Dinâmica de Sistemas Mecânicos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Controle de Ruído Industrial				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Elias Bitencourt Teodoro - FEMEC/UFU; Fran Sérgio Lobato - FEQUI/UFU; Max de Castro Magalhães - UFMG; Rodrigo Eduardo Catai - UTFPR; e Marcus Antonio Viana Duarte - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Elias Bitencourt Teodoro, Fran Sérgio Lobato, Marcus Antonio Viana Duarte e a Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG; Max de Castro Magalhães desde a cidade de Belo Horizonte/MG; e Rodrigo Eduardo Catai desde a cidade de Curitiba/PR, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Marcus Antonio Viana Duarte, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(as) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador.php?acao=documento\\_imprimir\\_web&acao\\_origem=arvore\\_visualizar&id\\_documento=2817054&infra\\_sistema=100000100&infra\\_unidade\\_atual=110000271&infra\\_hash=887c9...](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=2817054&infra_sistema=100000100&infra_unidade_atual=110000271&infra_hash=887c9...) 1/2

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Eduardo Catai, Usuário Externo**, em 15/01/2021, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Antonio Viana Duarte, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/01/2021, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elias Bitencourt Teodoro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/01/2021, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fran Sérgio Lobato, Professor(a) do Magistério Superior**, em 15/01/2021, às 11:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Max de Castro Magalhães, Usuário Externo**, em 15/01/2021, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2499652** e o código CRC **6D30E03D**.

*Dedico este trabalho a Deus, ao meu  
esposo Jorge e à minha filha Juliana.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – Brasil.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio para a realização da pesquisa que resultou no presente trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Marcus Antonio Viana Duarte pela orientação realizada durante todo o desenvolvimento deste trabalho e aos professores da banca pelas suas contribuições ao trabalho.

Esta tese é fruto do trabalho que vem sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisa de Desenvolvimento de Soluções Acústicas para Controle de Ruído Industrial e Segurança do Trabalho. A autora desta tese é membro deste grupo de pesquisa. Este grupo de pesquisa faz parte do LAV – Laboratório de Acústica e Vibrações da FEMEC – Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU – Universidade Federal de Uberlândia.

Também agradeço aos colegas do Laboratório de Acústica e Vibrações – LAV pelo apoio.

Agradeço ao Prof. Dr. Jorge von Atzingen dos Reis pelos conselhos recebidos.

Agradeço ao Prof. Me. Pedro Nishida pelo aprimoramento do ambiente de trabalho no laboratório e aos professores do LAV pelo apoio.

Agradeço ao Prof. Dr. Valder Steffen Junior, Prof. Dr. Fran Sérgio Lobato e ao Prof. Elias Teodoro, Phd, pelas contribuições para com este trabalho.

Agradeço aos professores, às secretárias e aos técnicos da Faculdade de Engenharia Mecânica.

Além disso, gostaria de agradecer a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução do mesmo.

REIS, D. A. S. **Procedimento de Otimização de Rotas de Inspeção em Plantas Industriais Visando a Minimização da Dose de Ruído**. 2020. 117f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### Resumo

Esta tese trata do desenvolvimento de um sistema de otimização para minimizar a exposição de inspetores e lubrificadores ao ruído. Sabe-se da literatura que a exposição contínua a altos níveis de ruído pode ocasionar sobrecarga no coração, estresse, fadiga e aumento na quantidade de acidentes numa linha de produção. Faz-se necessário o desenvolvimento de soluções acústicas a nível industrial para minimizar a ocorrência de falhas e acidentes que podem custar vidas. As normas que regulamentam a exposição permitem uma avaliação do grau de exposição e correção posterior. Assim, realizou-se a simulação de condições da exposição ocupacional ao ruído por meio de modelos matemáticos implementados para atuar de forma prévia minimizando a ocorrência da PAIRO (Perda Auditiva Induzida por Ruído). A partir dos valores das doses, TWA, *Time Weighted Average* e distâncias percorridas, pode-se obter uma rota de forma a minimizar a exposição e evitar a ocorrência da PAIRO pela otimização simultânea. Observou-se a necessidade do equilíbrio das doses entre os funcionários. Implementou-se o Problema de Designação, ou seja, com as rotas obtidas fez-se uma alocação eficiente dos funcionários às tarefas. Assim, obteve-se doses minimizadas e equilibradas. Este modelo foi aplicado em uma planta real que não será identificada, por motivos de confidencialidade. O método utilizado foi o PRV – Problema de Roteamento de Veículos implementado por meio da programação linear. Após a otimização das rotas, como as doses estavam acima dos valores permitidos otimizou-se a escolha das fontes de ruído a serem tratadas e obteve-se uma redução da exposição de aproximadamente 67% e doses adequadas.

REIS, D. A. S. **Procedure for Optimizing Inspection Routes in Industrial Plants Aiming to Minimize Noise Dose.** 2020. 117f. D. Sc. Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### **Abstract**

This thesis deals with the development of an optimization system to minimize the exposure of inspectors and lubricators to noise. It is known from the literature that continuous exposure to high levels of noise can cause overload in the heart, stress, fatigue and an increase in the number of accidents in a production line. It is necessary to develop acoustic solutions at an industrial level to minimize the occurrence of failures and accidents that can cost lives. The rules that regulate exposure allow an assessment of the degree of exposure and subsequent correction. Thus, the simulation of conditions of occupational exposure to noise was carried out by means of mathematical models implemented to act in a previous manner, minimizing the occurrence of PAIRO (Noise-Induced Hearing Loss). From the values of doses, TWA, Time Weighted Average and distances covered, it is possible to obtain a route in order to minimize exposure and avoid the occurrence of PAIRO by simultaneous optimization. There was a need to balance doses between employees. The Designation Problem was implemented, that is, with the routes obtained, an efficient allocation of employees to tasks was made. Thus, minimized and balanced doses were obtained. This model was applied to a real plant that will not be identified, for reasons of confidentiality. The method used was the PRV - Vehicle Routing Problem implemented through linear programming. After the optimization of the routes, as the doses were above the permitted values, the choice of the noise sources to be treated was optimized and an exposure reduction of approximately 67% was obtained and adequate doses were obtained.

**Keywords:** *Dosimetry. Optimization. PAIRO. Acoustics.*



## SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
Introdução.....	1
1.1. Objetivo.....	5
1.2. Objetivos Específicos.....	6
1.3. Estrutura do Trabalho.....	6
CAPÍTULO II.....	7
2.1. Dosimetria Virtual.....	7
2.2. Nível de pressão sonora.....	8
2.3 Cálculo da dose diária.....	9
2.4. Níveis de ruído confortáveis e perigosos.....	10
2.5. Ruído Médio Equivalente Global.....	11
2.6. Pesquisa Operacional e Programação Linear.....	12
2.6.1 Modelagem Matemática – Problema do Caixeiro Viajante.....	19
2.6.2 Meta-heurísticas.....	21
2.7. Modelagem Matemática – Problema de Roteamento de Veículos.....	22
2.8. Método da ponderação (Weighted Sum).....	24
2.9. Modelagem Matemática – Problema de Designação.....	25
CAPÍTULO III.....	27
3.1. Metodologia.....	27
3.2. Materiais e Métodos.....	29
3.3. SAFETYNOISE – Dosimetria.....	33
3.3.1. Modelo Acústico SAFETYNOISE.....	34
3.3.2. Procedimento de Identificação.....	35
3.3.3. Rota.....	36
3.3.4. Dosimetria Virtual.....	37
3.4. Método Simplex.....	40
3.4.1. Método Gráfico e Método Algébrico.....	41
CAPÍTULO IV.....	45
4.1. Simulações iniciais.....	45
4.2. PCV considerando TWA.....	48
4.3. PCV considerando a distância total percorrida.....	48
4.4. PCV considerando a dosimetria.....	49
4.5. PRV considerando TWA.....	50
4.6. PRV considerando a distância total percorrida.....	51
4.7. PRV considerando a dosimetria.....	51
4.8. PCV comparativo de desempenho entre softwares.....	52
4.9. PRV comparativo de desempenho entre softwares.....	53
4.10. PRV Dois fatores – dose 80%, distância 20% e capacidade 5.....	54
4.11. PRV Dois fatores – dose 20%, distância 80% e capacidade 5.....	55
4.12. PRV Dois fatores – dose 10%, distância 90% e capacidade 5.....	56
4.13. PRV Dois fatores – dose 80%, distância 20% e capacidade 6.....	57
4.14. PRV Dois fatores – dose 80%, distância 20% e capacidade 7.....	58

4.15. PRV Três fatores – dose 30%, distância 30%, TWA 30% e capacidade 5.....	59
4.16. PRV Três fatores – dose 80%, distância 10%, TWA 10% e capacidade 5.....	60
4.17. PRV Três fatores – dose 80%, distância 10%, TWA 10% e capacidade 7.....	61
4.18. PD – Problema de Designação.....	62
4.19. PRV e PD – Planta real.....	63
4.20. Planta real – PCV.....	71
4.21. Planta real – PRV FATOR 0,28.....	71
4.22. Planta real - PRV FATOR 0,25.....	72
4.23. Planta real – PRV FATOR 0,30.....	73
4.24. Planta real – PRV FATOR 0,50.....	74
4.25. Planta real – PRV FATOR 0,75.....	74
4.26. Comparativo Estação de Trabalho versus Computador.....	75
4.27. PRV fator automático 1 funcionário.....	76
4.28. PRV fator automático 2 funcionários.....	77
4.29. Conclusões da planta de geração de energia.....	78
4.30. Conclusões da planta real.....	79
4.31. Histórico PRV Implementados.....	80
4.32. Fluxograma do Sistema de Otimização.....	80
4.33. O tratamento acústico.....	82
4.33.1 PRV tratamento acústico uma fonte.....	83
4.33.2 PRV tratamento acústico duas fontes.....	83
4.33.3 PRV tratamento acústico três fontes.....	84
4.33.4 PRV tratamento acústico quatro fontes.....	85
4.33.5 PRV tratamento acústico cinco fontes.....	86
4.33.6 PRV tratamento acústico seis fontes.....	86
4.33.7 PRV tratamento acústico dez fontes.....	87
CAPÍTULO V.....	90
5.1. Principais conclusões.....	90
5.2. Possibilidades de trabalhos futuros.....	91
5.3. Publicações 2017-2020.....	92
Referências.....	94
ANEXO A.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Tempo de permanência planta simplificada pelo Método 1.....	46
Tabela 4.2. Método 2 para cálculo do tempo de permanência planta simplificada....	46
Tabela 4.3. Valores usuais da rota antes da otimização.....	47
Tabela 4.4. Resultados experimentais para TWA.....	48
Tabela 4.5. Resultados para o modelo de caminho mínimo.....	48
Tabela 4.6. Resultados Modelo PCV Dosimetria.....	50
Tabela 4.7. Resultados experimentais para TWA.....	50
Tabela 4.8. Resultados para o modelo de caminho mínimo.....	51
Tabela 4.9. Resultados Modelo PRV Dosimetria.....	51
Tabela 4.10. Comparativo desempenho softwares – PCV.....	52
Tabela 4.11. Comparativo desempenho softwares – PRV.....	54
Tabela 4.12. Resultados PRV: 80% dose 20% distância.....	55
Tabela 4.13. Resultados PRV: 20% dose 80% distância.....	56
Tabela 4.14. Resultados PRV: 10% dose 90% distância.....	57
Tabela 4.15. Resultados PRV: 80% dose 20% distância capacidade 6.....	58
Tabela 4.16. Resultados PRV: 80% dose 20% distância capacidade 7.....	59
Tabela 4.17. Resultados PRV: 30% dose 30% distância 30% TWA.....	59
Tabela 4.18. Resultados PRV: 80% dose 10% distância 10% TWA.....	60
Tabela 4.19. Resultados PRV: 80% dose 10% distância 10% TWA e capacidade 7.....	61
Tabela 4.20. Resultados PD: alocação de tarefas para dois funcionários.....	62
Tabela 4.21. Valores de NPS para os equipamentos da planta real.....	70
Tabela 4.22. Resultados PCV da planta real.....	71
Tabela 4.23. Resultados PRV da planta real com capacidade 0,28.....	72
Tabela 4.24. Resultados PRV da planta real com capacidade 0,25.....	73
Tabela 4.25. Resultados PRV da planta real com capacidade 0,30.....	73
Tabela 4.26. Resultados PRV da planta real com capacidade 0,50.....	74
Tabela 4.27. Resultados PRV da planta real com capacidade 0,75.....	75
Tabela 4.28. Configurações Estação de Trabalho e Computador.....	76
Tabela 4.29. Resultados PRV automático da planta real para 1 funcionário.....	77
Tabela 4.30. Resultados PRV automático da planta real para 2 funcionários.....	77
Tabela 4.31. PRV 2 funcionários e uma fonte.....	83
Tabela 4.32. PRV 2 funcionários e duas fontes.....	84
Tabela 4.33. PRV 2 funcionários e três fontes.....	85
Tabela 4.34. PRV 2 funcionários e quatro fontes.....	85
Tabela 4.35. PRV 2 funcionários e cinco fontes.....	86
Tabela 4.36. PRV 2 funcionários e seis fontes.....	87
Tabela 4.37. PRV 2 funcionários e dez fontes.....	88
Tabela A.1. Limites de exposição.....	102

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Fluxograma do Procedimento Geral.....	27
Figura 3.2. Fluxograma para o tratamento acústico.....	31
Figura 3.3. Exemplo de planilha com a contribuição de cada conjunto fonte.....	33
Figura 3.4. Exemplo de pontos de medição para identificação de fontes pontuais (em vermelho) ou de grandes dimensões (em azul) utilizando pressão sonora.....	36
Figura 3.5. Mapas de Isopressão Sonora medidos na área.....	36
Figura 3.6. Mapas de Isopressão Sonora simulados para a área.....	36
Figura 3.7. Exemplo de mapa com as probabilidades do tempo de rota.....	37
Figura 3.8. Exemplo de mapa de dose virtual.....	38
Figura 3.9. Fluxograma do Método Gráfico.....	42
Figura 3.10. Solução ótima do Método Gráfico.....	42
Figura 3.11. Fluxograma do Método Algébrico.....	43
Figura 4.1. Mapa da Planta de Geração de Energia.....	47
Figura 4.2. Grafo do Modelo de Caminho Mínimo.....	49
Figura 4.3. Esquema simplificado piso 1 da planta real.....	63
Figura 4.4. Esquema simplificado piso 2 da planta real.....	64
Figura 4.5. Esquema simplificado piso 3 da planta real.....	64
Figura 4.6. Esquema simplificado piso 4 da planta real.....	65
Figura 4.7. Esquema simplificado piso 5 da planta real.....	65
Figura 4.8. Esquema simplificado piso 6 da planta real.....	66
Figura 4.9. Esquema simplificado piso 7 da planta real.....	66
Figura 4.10. Esquema simplificado piso 8 da planta real.....	67
Figura 4.11. Esquema simplificado piso 9 da planta real.....	67
Figura 4.12. Esquema simplificado piso 10 da planta real.....	67
Figura 4.13. Esquema simplificado piso 11 da planta real.....	68
Figura 4.14. Esquema simplificado piso 12 da planta real.....	68
Figura 4.15. Esquema simplificado piso 13 da planta real.....	69
Figura 4.16. Fluxograma do Sistema de Otimização.....	81
Figura 4.17. Mapa de LAeq situação atual.....	88
Figura 4.18. Mapa de LAeq após os tratamentos.....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

	<i>Português-BR</i>	<i>Inglês</i>
AHP		<i>Analytic Hierarchy Process</i>
EPI	<i>Equipamento de Proteção Individual</i>	
FEMEC	<i>Faculdade de Engenharia Mecânica</i>	
GUROBI	<i>Gu Rothberg Bixby</i>	
LAV	<i>Laboratório de Acústica e Vibrações</i>	
LINGO	<i>Linear, Interactive, and General Optimizer</i>	
NPS	<i>Nível de Pressão Sonora</i>	
NWS	<i>Nível de Potência Sonora</i>	
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>	
PAIRO	<i>Perda Auditiva Induzida pelo Ruído Ocupacional</i>	
PCA	<i>Programa de Conservação Auditiva</i>	
PCV	<i>Problema do Caixeiro Viajante</i>	
PD	<i>Problema de Designação</i>	
PPRA	<i>Programa de Prevenção de Riscos Ambientais</i>	
PRV	<i>Problema de Roteamento de Veículos</i>	<i>Vehicle Routing Problem</i>
RNP	<i>Rede Neural Probabilística</i>	
SUS	<i>Sistema Único de Saúde</i>	
TWA		<i>Time Weighted Average</i>
UFU	<i>Universidade Federal de Uberlândia</i>	

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_i$	<i>Tempo total de exposição</i>
$D$	<i>Dose diária de ruído</i>
$d$	<i>Valores de dose de exposição</i>
$f_{ij}$	<i>Fluxo entre os equipamentos <math>i</math> e <math>j</math></i>
$L_{90}$	<i>Nível excedido durante 90% do tempo de medição</i>
$L_{Aeq}$	<i>Nível do Ruído Contínuo (fixo)</i>
$L_{eq}$	<i>Nível de Ruído Contínuo Equivalente</i>
$NPS$	<i>Valor do Nível de Pressão Sonora</i>
$P_a$	<i>Pressão atmosférica estática</i>
$P_0$	<i>Pressão acústica de referência</i>
$P$	<i>Pressão acústica</i>
$p$	<i>Quantidade de soluções básicas factíveis</i>
$P_t$	<i>Pressão total</i>
$r_{ij}$	<i>Valores de dose de exposição</i>
$R$	<i>Região factível</i>
$T$	<i>Tempo da jornada de trabalho</i>
$T_i$	<i>Tempo total de exposição permitido</i>
$x_l$	<i>Vértice da região factível</i>
$x_i$	<i>Solução ótima</i>
$x_{ij}$	<i>Variável de decisão binária</i>
$x_p$	<i>Vértice da região factível</i>
$\sigma$	<i>Medida da dispersão dos dados</i>

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

A importância do controle de ruído industrial se deve às consequências que a ausência deste pode ocasionar tanto financeiramente às empresas quanto à saúde e qualidade de vida dos trabalhadores. Niosh (2020) aponta que a Perda Auditiva Induzida pelo Ruído Ocupacional (PAIRO) é a lesão ocupacional mais frequente nos Estados Unidos. Este Instituto relata que aproximadamente 22 milhões de trabalhadores nos Estados Unidos estão expostos a níveis de ruído considerados perigosos em suas jornadas de trabalho. Realizou-se uma estimativa de que US\$ 242 milhões são gastos por ano em indenizações trabalhistas por PAIRO. Dessa forma, a PAIRO ocasiona uma deterioração na qualidade de vida dos trabalhadores, com um alto custo social e econômico em passivos trabalhistas.

Segundo Moraes, Nogueira, Slama (2004), a exposição contínua a um nível elevado de ruído pode gerar estresse físico e psicológico, aceleração da pulsação, aumento da pressão sanguínea, sobrecarga do coração, estreitamento dos vasos sanguíneos e secreções anormais de hormônios que ocasionam tensões musculares e lesões auditivas. Argalasova, Filova, Hirosova, Vondrova, Samohyl, Krajcova, Jurkovicova, Sevcikova (2016) apresentam um estudo dos impactos da exposição sonora a diversas fontes de ruído sobre a saúde humana. Observou-se a necessidade de prevenção e intervenção para evitar perdas auditivas permanentes.

O ruído reduz o nível de atenção e maximiza o tempo de reação de um indivíduo em relação a estímulos, o que pode ocasionar aumento da quantidade de falhas, acidentes que impactam na qualidade de vida e produtividade no trabalho conforme *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene em el Trabajo* (2006).

Costa, Martins, Rocha, Garcia, Oliveira, Lima, Silva (2018) avaliam o impacto do ruído para docentes da rede pública de ensino. Dessa forma, o ruído acima dos limites estabelecidos pela legislação, nas salas de aula, pode ocasionar problemas psicológicos e comportamentais aos docentes.

Cordeiro (2005) investigou se a exposição ao ruído é fator de risco significativo para acidentes de trabalho. O método utilizado foi o estudo de caso-controle de base populacional, no total 94 casos. Utilizou-se um modelo de regressão logística múltipla, cuja variável independente é a exposição ao ruído, controlada por covariáveis de interesse. Pode-se concluir que a exposição ao ruído é um fator de

risco significativo para acidentes de trabalho e justifica-se o investimento em pesquisas para minimização da exposição ao ruído ocupacional.

Fagundes Neto (2017) reporta em sua tese os efeitos nocivos da exposição contínua ao ruído. O autor relata que a exposição faz com que o organismo esteja em estado de alerta constante, em situação de estresse, para se proteger de um suposto “ataque”. O cérebro das pessoas afetadas fica acelerado e os músculos trabalham agitadamente. Em decorrência, estas pessoas apresentam aumento da pressão arterial, interrupção do funcionamento do estômago e do intestino, problemas de irrigação da pele e impotência sexual.

Machado (2020) afirma que mais de 12 milhões de pessoas apresentam perdas auditivas no Brasil. No entanto, a maioria desse grupo é composto por trabalhadores que adquiriram a PAIRO devido às condições de trabalho inadequadas. Conforme o artigo 20 da Lei nº 8.213/91 a redução da audibilidade em qualquer orelha é considerada doença do trabalho referente ao aparelho auditivo, o que pode gerar indenizações pela previdência social e pelo próprio empregador. A PAIRO ocasiona além da perda auditiva, outros incômodos decorrentes, como dor, tontura e zumbido e a consequente perda da qualidade de vida do trabalhador.

Manoel Silva (2018) realizou um estudo de exposição ao ruído de funcionários em unidades de alimentação e nutrição localizadas numa praça de alimentação. Pelos resultados obtidos, inferiu-se que para todas as unidades analisadas a exposição dos funcionários estava acima do recomendado pela legislação para uma jornada de 8 horas. Outro agravante dessa situação é o fato de que nenhum dos funcionários do estudo utilizaram EPI (Equipamento de Proteção Individual) apesar da exposição elevada ao ruído.

Oliveira, Santos, Rabelo e Magalhães (2015) apontam o impacto da exposição a ruído elevado para os trabalhadores. Foi realizado um estudo de caso com trabalhadores de unidades de suporte móveis. Pelos resultados obtidos, observa-se sintomas auditivos e não auditivos apresentados por estes trabalhadores. Dentre os sintomas auditivos, destacaram-se a ocorrência de zumbido e 38,9%; intolerância a sons intensos, 27,8%. Quanto aos sintomas não auditivos foi apresentado irritabilidade em 47,2% dos funcionários, seguido de dor de cabeça com 38,9%.

Medseg (2018) relata que na Europa mais de 33% dos trabalhadores estão expostos a níveis de ruído elevados durante ao menos um quarto da jornada de trabalho. O autor ressalta que a exposição a níveis de ruído elevados pode ocasionar acidentes de trabalho, devido à dificuldade de audição do trabalhador e consequente não entendimento das instruções do trabalho e possibilidade de não



audibilidade de sinais de alerta/emergência. Com a exposição a ruídos elevados, o trabalhador pode apresentar outros sintomas, como impotência sexual, problemas cardiovasculares, problemas psicológicos e gastrite.

Façaña e Azevedo (2018) realizaram um estudo sobre o conhecimento dos funcionários sobre a importância do uso do EPI, Equipamento de Proteção Individual. O estudo de caso foi realizado com 70 funcionários da área operacional de uma empresa do ramo de bebidas. Pelos resultados obtidos, observa-se que 57,1% dos funcionários não fazem uso do EPI e somente 21,4% realizaram teste auditivo. O estudo aponta que 78,5% não possui conhecimento sobre o ruído e seus impactos para a saúde humana. Dessa forma, pode-se concluir com o estudo que a maioria dos trabalhadores da pesquisa não utiliza o EPI e não compreende o que é o ruído e suas consequências para a saúde humana.

A norma NR15 apresenta os limites de exposição ao ruído para trabalhadores brasileiros com o objetivo de protegê-los de danos auditivos. Na norma NR15, as causas da PAIRO são descritas como exposição prolongada a ruídos acima de 85 dB por um período de 8 horas por dia. Os sintomas apresentados pelos funcionários são as dificuldades de audição. Como medida para prevenção, a Portaria prevê o uso de proteção auditiva coletiva e, ou individual, redução da jornada de trabalho, criação de pausas regulares, mudança de função e uso de equipamentos menos ruidosos. A norma NR15 dispõe os conceitos de ruído contínuo ou intermitente (85 dB) e o ruído de impacto (120 dB). No caso de ocorrência destes, a lei prevê um adicional de insalubridade de 20% do salário-mínimo a ser pago ao funcionário, pois, esta insalubridade é caracterizada como de grau médio. A norma NR7 da mesma portaria estabelece os exames obrigatórios audiométricos admissionais, periódicos e demissionais.

A Norma de Higiene Ocupacional, NHO 01 de 2001 da FUNDACENTRO, consiste de procedimentos para avaliação da exposição ocupacional ao ruído. A FUNDACENTRO é um instituto de pesquisa que realiza estudos sobre segurança, higiene e medicina do trabalho, vinculado ao Ministério do Trabalho. Nesta norma, é apresentado o conceito de nível de exposição, com o objetivo de quantificar e caracterizar a exposição ocupacional, denominada dose, ao ruído contínuo ou intermitente. Além disso, existe a alternativa de uso de medidores integradores e de leituras instantâneas.

A norma NR9 cita que toda empresa deve ter um Programa de Prevenção de Riscos Ambientais, PPRA e um Programa de Conservação Auditiva, PCA. Dessa forma, a legislação obriga empresas e profissionais da área de Saúde e Segurança do Trabalho a realizar a implementação e controle de programas de prevenção da perda auditiva. Tavares (2020) descreve como as principais consequências da PAIRO, a diminuição da produtividade, perda da capacidade de concentração e comunicação, estresse

físico e psicológico, e maior possibilidade de acidentes com a diminuição da atenção do trabalhador. Por outro lado, o autor apresenta seis medidas para a implementação de um programa de prevenção da perda auditiva conforme descrito a seguir.

- (a) Realizar um PCA constituído de uma auditoria para verificação do que está adequado ou não quanto à conformidade da legislação;
- (b) Monitoramento da exposição ao ruído e identificar os trabalhadores expostos a níveis de ruído iguais ou superiores a 85 dB em média durante 8 horas de jornada de trabalho;
- (c) Implementação de controles de engenharia de segurança para que não ocorra a exposição a níveis de ruído iguais ou superiores a 85 dB em média durante 8 horas de jornada de trabalho. Para tal, realizar rotatividade de funcionários e dispositivos para o controle do ruído;
- (d) Educação e treinamento dos funcionários para que o funcionário possa identificar quando uma proteção adicional é necessária e informá-la à área responsável;
- (e) Manutenção dos registros do sistema por no mínimo dois anos;
- (f) Avaliação do programa de conservação auditiva para eventuais correções das partes que não estiverem funcionando de forma adequada e manutenção das atividades que apresentaram bons resultados.

Esta tese é continuação de uma linha de pesquisa do Laboratório de Acústica e Vibrações –LAV da Faculdade de Engenharia Mecânica – FEMEC da Universidade Federal de Uberlândia – UFU que objetiva o desenvolvimento de métodos e soluções acústicas a nível industrial para a Perda Auditiva Induzida pelo Ruído Ocupacional (PAIRO). Em sua tese, Oliveira Filho (2011) desenvolveu uma metodologia que utiliza um mapeamento prévio e identificação das fontes de ruído do ambiente de trabalho e a rota do funcionário para prever a dose de exposição ao ruído ocupacional. Esta tese se propõe a desenvolver um sistema de otimização para minimizar a exposição de funcionários ao ruído ocupacional, ou seja, simular as condições da exposição ao ruído ocupacional de forma prévia com o objetivo de evitar a ocorrência da PAIRO. Na primeira fase do trabalho, o objetivo foi encontrar as rotas ótimas para os funcionários. O problema de roteamento foi modelado como um PCV, Problema do Caixeiro Viajante e como um PRV, Problema de Roteamento de Veículos.

Oliveira Filho (2011) relata o uso de uma velocidade média de 0,8 m/s no trajeto entre os pontos de inspeção na rota. No entanto, o autor aponta que este valor de velocidade pode ser mudado devido ao

funcionário que executar a rota de inspeção na fábrica, o que altera a exposição do funcionário. Este fato aumenta a relevância do sistema de otimização desenvolvido nesta tese.

Em um primeiro momento, utilizou-se a modelagem para um fator por vez. Em uma segunda fase do trabalho desenvolveu-se um modelo de otimização que considerou os três fatores simultaneamente, as doses, os dados de TWA, *Time Weighted Average* e distâncias percorridas para a otimização. Para a execução deste trabalho, foram necessários os desenvolvimentos de conceitos de acústica. Após a obtenção das rotas ótimas, observou-se a necessidade do equilíbrio entre as doses dos funcionários. Como os problemas de roteamento não tratam das doses em separado e sim da otimização da dose total dos funcionários, foi necessária uma nova abordagem para a continuidade deste trabalho.

Após uma revisão bibliográfica de Pesquisa Operacional, Programação Linear, verificou-se a adequação do problema de alocação eficiente de funcionários às tarefas de manutenção com o Problema de Designação. Com as rotas ótimas obtidas pela modelagem do PRV, implementou-se o Problema de Designação o qual permitiu o equilíbrio entre as doses.

Para a validação do sistema de otimização criado nesta tese utilizou-se uma planta real. Serão apresentados a metodologia utilizada na planta e os resultados obtidos. Após a otimização das rotas, estando as doses acima dos valores permitidos é possível otimizar a escolha das fontes de ruído a serem tratadas e obter doses adequadas. Para tal realizou a otimização do tratamento acústico das fontes de ruído, as fontes que mais impactam na dose.

## **1.1. OBJETIVO**

As normas que regulamentam a exposição ocupacional ao ruído permitem uma avaliação do grau de exposição e posterior, correção das condições de trabalho. No entanto, observa-se que é necessária a exposição para uma posterior avaliação e correção. Wszolek (2017) apresenta as condições legais aplicáveis a ruído e controle, legislações e a falta de regulamentos detalhados. É feita uma análise de estudos de casos na indústria. Dessa forma, o objetivo desta tese é desenvolver um sistema de otimização e realizar vários testes de forma a obter a melhor rota que minimize e equilibre a dose de exposição ao ruído entre os funcionários no ambiente de trabalho e, se for o caso, escolher de forma otimizada as fontes cujos níveis de ruído precisam ser mitigados (tratamento acústico).

## **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos são apresentados a seguir.

- (1) Testes do sistema de otimização para roteamento de funcionário, com o objetivo de minimizar a exposição de funcionários ao ruído no ambiente de trabalho com dados da tese intitulada “Uma Metodologia para a Avaliação Virtual da Dose de Exposição ao Ruído no Ambiente de Trabalho” e com dados reais de uma planta industrial de grande porte.
- (2) Desenvolvimento de procedimentos de otimização de rota de funcionário.
- (3) Tratamento acústico com base no diagnóstico da planta quanto à rumorosidade nos turnos para minimizar o tempo de exposição ao ruído no ambiente de trabalho.

## **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No presente capítulo tem-se uma introdução ao tema, justificativa, aplicabilidades gerais, principais objetivos e estrutura do trabalho.

No capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica sobre acústica, pesquisa operacional, programação linear, o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), Problema de Roteamento de Veículos (PRV), Método da Ponderação, o Problema de Designação, aspectos normativos para a Perda Auditiva Induzida por Ruído Ocupacional (PAIRO).

O capítulo III apresenta a metodologia utilizada.

No capítulo IV apresentam-se os resultados obtidos e o capítulo V as conclusões e possibilidade de continuidade da pesquisa.

## CAPÍTULO II

Neste capítulo apresentam-se as bases para o desenvolvimento do sistema de otimização, seja os conceitos de Acústica assim como o método simplex, o PCV, Problema do Caixeiro Viajante, o PRV, Problema de Roteamento de Veículos e o Problema de Designação.

### 2.1. DOSIMETRIA VIRTUAL

A dosimetria é um ramo da ciência acústica que objetiva identificar e qualificar a magnitude do risco físico ruído como potencial causa de doença ocupacional. Dessa forma, utiliza-se os valores de cada ponto que faz parte da rota de trabalho do funcionário para o cálculo da dose. A dose é uma ponderação entre o tempo de exposição e o tempo permitido de exposição para aquele nível de ruído sem ocasionar danos à saúde ocupacional, conforme Multee (2019). A fórmula para o cálculo da dose encontra-se disponível na Equação 5.3.

Conforme Gerges (2000), o som pode ser definido como flutuações de pressão em um meio compressível. Porém, não são todas as flutuações de pressão que são audíveis ao ouvido humano. Dessa forma, somente ocorrerá a sensação de som quando a amplitude destas flutuações e a frequência com que elas se repetem estiver dentro da faixa de 20 Hz a 20 kHz. As ondas que se encontram acima e abaixo desta faixa são denominadas, respectivamente, ondas ultrassônicas e ondas infrassônicas.

O som é parte da vida cotidiana das pessoas. No entanto, existem sons que são desagradáveis e indesejáveis. Estes sons são definidos como ruído. O efeito do ruído no indivíduo depende da amplitude, frequência, duração e também da atitude do indivíduo perante ele. Segundo Rao (2011), a amplitude de vibração é o deslocamento máximo de um corpo vibrante de sua posição de equilíbrio.

A Figura 2.1 ilustra o conceito de amplitude de vibração de uma onda, no caso denotado pela palavra Amplitude. A frequência é o número de ciclos por unidade de tempo. A duração é o tempo no qual ocorre as flutuações de pressão em um meio compressível e caso, estejam na faixa de 20 Hz a 20 kHz serão audíveis pelo ouvido humano.

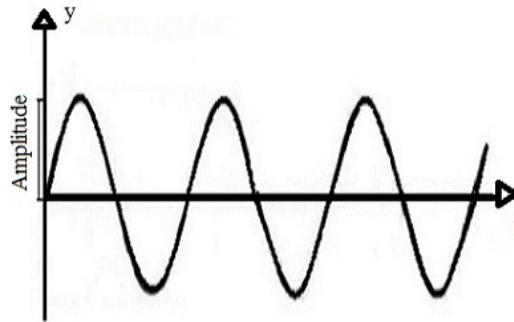


Figura 2.1. Movimento harmônico como a projeção do final de um vetor rotativo.

Fonte: Rao (2011).

## 2.2. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

O potencial de danos auditivos de um dado ruído depende de seu nível e da sua duração. Por exemplo, uma exposição de um minuto a 100 dB não é tão prejudicial quanto uma exposição de 60 minutos a 90 dB. Para solucionar este tipo de problema, utiliza-se um valor único, Leq. O Leq é o nível sonoro médio integrado durante uma faixa de tempo específica conforme a Equação 2.3. Este cálculo se baseia na energia do ruído, pressão sonora quadrática. O nível de pressão sonora, NPS, é dado pela Equação 2.1., em que  $P_0 = 0,00002 \text{ N/m}^2$  e é o valor de referência que corresponde ao limiar da audição em 1.000 Hz. A escala dB apresenta uma correlação com a audibilidade humana muito melhor comparada a escala absoluta ( $\text{N/m}^2$ ). Assim, um dB constitui a menor variação que o ouvido humano pode perceber. Um acréscimo de 6 dB no nível de pressão sonora corresponde a dobrar a pressão sonora. P é a pressão acústica.

$$NPS = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} \quad (2.1)$$

A pressão acústica pode ser definida como a magnitude da flutuação de pressão total  $P_t(t)$  em comparação com a pressão atmosférica estática  $P_a \approx 1.000 \text{ milibar}$  em condições normais de temperatura e pressão ambiental. Dessa forma, obtêm-se a Equação (2.2).

$$P(t) = P_t(t) - P_a \quad (2.2)$$

Conforme Gerges (2000), as normas ISO/1.995 e 1.999 explanam o método para se calcular o Leq. No entanto, existem medidores de doses de ruído que realizam este cálculo de forma automática. Estes medidores possuem versões fixas e portáteis. Os medidores portáteis podem ser colocados na roupa do funcionário, com o microfone próximo ao ouvido. Dessa forma, os medidores portáteis possuem o objetivo de verificar a dose máxima permitida. Segundo a Portaria Brasileira 3.214 de 08 de junho de 1.978, a dose máxima permitida é de 85 dB(A) para uma jornada de trabalho de oito horas.

Pode-se medir a exposição ao ruído pelo Nível de Exposição Sonora – NES. O NES é utilizado para ruído transiente, como o ruído gerado pela passagem de um avião. O NES pode ser definido como o Leq normalizado para um segundo tempo de integração.

### 2.3 CÁLCULO DA DOSE DIÁRIA

Segundo Gerges (2000), a exposição a níveis diferentes de ruído é considerada adequada conforme os limites previstos pela portaria Brasileira 3.214 de 08 de junho de 1.978, caso o valor da Dose Diária de Ruído – D não exceda a unidade. A Equação 2.3 apresenta a fórmula para o cálculo da Dose Diária de Ruído – D.

$$D = \frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \frac{C_3}{T_3} + \dots + \frac{C_m}{T_m} \quad (2.3)$$

Na Equação 2.3,  $C_i$  representa o tempo real de exposição a um específico NPS, Nível de Pressão Sonora,  $T_i$ , por sua vez, é o tempo total permitido para um dado NPS.

Conforme definido pela portaria Brasileira 3.214 de 08 de junho de 1.978, o tempo total permitido para um dado NPS, é obtido pela fórmula da Equação 2.4.

$$T_i = \frac{16}{10^{(NP-80) \cdot \log(2)/5}} \quad (2.4)$$

Na Equação 2.5,  $T_i$  representa o tempo total permitido para aquele NPS e NP representa o valor do NPS. Utilizou-se para o cálculo da dosimetria deste trabalho as equações 2.4 e 2.5. Utilizou-se os

limites de exposição permissíveis da norma NR15, com fator de troca igual a 5 conforme a Equação 2.5. Durante o desenvolvimento dos cálculos, considerou-se o tempo de exposição quando o funcionário está dentro do posto de trabalho realizando alguma atividade, além da exposição no trajeto entre os postos de trabalho ao longo da rota.

Farias (2018) aponta a necessidade do controle de ruído industrial devido às lesões ocupacionais ocasionadas pela exposição prolongada ao ruído em fábricas. O autor realizou um estudo de caso em uma indústria termoplástica. Foi analisada a eficiência da dosimetria de ruído em 3 funções diferentes, considerando duas referências de tempo da jornada de trabalho permitidas pela legislação.

Dessa forma, a dose de exposição é o parâmetro que quantifica o grau de exposição do trabalhador ao ruído conforme Farias (2018). O autor define o funcionamento dos equipamentos de medição de ruído como a simulação das condições de resposta da orelha humana quando recebe as ondas sonoras. Dessa forma, estes equipamentos captam o ruído e obtêm uma resposta não linear à frequência. No entanto, estes equipamentos possuem recursos de circuitos para compensar a linearidade do microfone. Assim, a compensação é realizada por meio da atenuação do sinal acústico em algumas frequências, o que proporciona uma leitura equivalente à da orelha humana.

Saliba (2013) relata os principais fatores a serem considerados em uma avaliação de ruído. Dentre eles, pode-se enumerar fluxo do processo realizado pelo funcionário, lista das atividades de inspeção, nível de pressão sonora dos equipamentos a serem inspecionados, identificação das fontes de ruído da unidade industrial, turno de trabalho e duração da jornada de trabalho.

## **2.4. NÍVEIS DE RUÍDO CONFORTÁVEIS E PERIGOSOS**

Fernandes (2002) relata os efeitos dos ruídos sob dois aspectos, o fator conforto e o fator perda auditiva. A análise sob o fator conforto é realizada por meio da Norma Brasileira NBR 10.152, ABNT NB-95. Esta norma apresenta os níveis recomendados de ruído. Dessa forma, é possível avaliar o ruído por meio das curvas NC, Noise Criterion, ou pela medição do ruído em dB(A).

Como as pessoas possuem sensibilidade diferente a um determinado nível de ruído, não é possível determinar um valor do ruído em dB(A) a partir do qual exista a perda auditiva. Por outro lado, a NBR



7.731 cita que os critérios para avaliação do risco auditivo encontram-se disponíveis nas normas ISO R 1.999, ISO R 1.996, ISO R 532. No entanto, essas normas internacionais não são utilizadas pelas empresas no Brasil.

A norma NR15 apresenta os limites de exposição ao ruído para trabalhadores brasileiros com o objetivo de protegê-los de danos auditivos. Na norma NR15, as causas da PAIRO são descritas como exposição prolongada a ruídos acima de 85 dB por um período de 8 horas por dia. Os sintomas apresentados pelos funcionários são as dificuldades de audição. Como medida para prevenção, a Portaria prevê o uso de proteção auditiva coletiva e, ou individual, redução da jornada de trabalho, criação de pausas regulares, mudança de função e uso de equipamentos menos ruidosos. A norma NR15 dispõe os conceitos de ruído contínuo ou intermitente (85 dB) e o ruído de impacto (120 dB). No caso de ocorrência destes, a lei prevê um adicional de insalubridade de 20% do salário-mínimo a ser pago ao funcionário, pois, esta insalubridade é caracterizada como de grau médio. A norma NR7 da mesma portaria estabelece os exames obrigatórios audiométricos admissionais, periódicos e demissionais.

Segundo Gerges (2000), a exposição a níveis diferentes de ruído é considerada adequada conforme os limites previstos pela portaria Brasileira 3.214 de 08 de junho de 1.978, caso o valor da Dose Diária de Ruído – D não exceda a unidade.

A Norma de Higiene Ocupacional, NHO01 de 2.001 da FUNDACENTRO, consiste de procedimentos para avaliação da exposição ocupacional ao ruído. A FUNDACENTRO é um instituto de pesquisa que realiza estudos sobre segurança, higiene e medicina do trabalho, vinculado ao Ministério do Trabalho. Nesta norma, é apresentado o conceito de nível de exposição, com o objetivo de quantificar e caracterizar a exposição ocupacional, denominada dose, ao ruído contínuo ou intermitente. Além disso, existe a alternativa de uso de medidores integradores e de leituras instantâneas.

Machado (2020) relata que no artigo 20 da Lei nº 8.213/91 a redução da audibilidade em qualquer orelha é considerada doença do trabalho referente ao aparelho auditivo, o que pode gerar indenizações pela previdência social e pelo próprio empregador, o que representa custos onerosos para as empresas.

## **2.5. RUÍDO MÉDIO EQUIVALENTE GLOBAL**

O ruído médio equivalente global, conhecido na literatura como TWA, *Time Weighted Average*, representa o ruído médio equivalente global para a jornada de trabalho, ou seja, uma média ponderada

no tempo conforme a norma NR15. A Equação 2.5 apresenta a fórmula para o cálculo do ruído médio equivalente. Na Equação 2.5 D corresponde à dose em percentual e T ao valor da jornada de trabalho em minutos.

$$TWA = 80 + 16,61 * \log\left(\frac{9,6 * D}{T}\right) \quad (2.5)$$

O roteamento pode ser definido como um sequenciamento para solucionar um problema de inspeção de máquinas em uma planta industrial com o objetivo de minimizar a dose de exposição.

Segundo Gerges (2000), o NES pode ser definido como o Leq normalizado para um segundo de tempo de integração. O Leq é o nível sonoro médio integrado durante uma faixa de tempo especificada conforme Equação 2.6.

$$Leq = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2(t)}{P_0^2} dt \right) \quad (2.6)$$

Na Equação 2.6, T representa o tempo de integração, P(t) a pressão acústica instantânea (μPa), Po pressão acústica de referência (20μPa) e o Leq constitui o nível contínuo (estacionário) equivalente em dB(A), que possui o mesmo potencial de lesão auditiva que o nível variado considerado segundo Gerges (2000). A pressão acústica pode ser definida como o valor quadrático médio da pressão exercida em um determinado ponto por intervalo de tempo, ocasionado por uma onda sonora, tempo em segundos.

## 2.6. PESQUISA OPERACIONAL E PROGRAMAÇÃO LINEAR

Para Arenales, Armentano, Morabito e Yanasse (2007), a pesquisa operacional pode ser definida como a aplicação de métodos científicos a problemas complexos com o objetivo de auxiliar o processo de tomada de decisão, seja para planejar, projetar ou operar sistemas em situações, nas quais requer-se o uso eficiente de recursos do processo. Para tal, utiliza-se modelos matemáticos determinísticos ou probabilísticos de métodos de solução e algoritmos

para melhor compreensão, análise e solução de problemas de tomada de decisão. Dessa forma, pode-se citar técnicas como a otimização linear (programação linear), otimização discreta (programação linear inteira), otimização em redes (fluxos), programação dinâmica (determinística e estocástica) e teoria das filas.

Existem várias aplicações recentes da pesquisa operacional e programação linear. Moraes, Ferreira e Silva (2019) apresentam um estudo de caso de otimização da produção em uma indústria de esquadrias de alumínio. Para tal, utiliza-se a programação linear. Dessa forma, cada vez mais são utilizadas técnicas de pesquisa operacional, como a programação linear e a simulação para o planejamento da produção. Foram analisadas as quantidades ideais de produção para os dois produtos mais vendidos do portfólio de uma indústria de esquadrias de alumínio, localizada na cidade de Ribeirão Pires, estado de São Paulo. No estudo de caso utilizou-se análise quantitativa a partir de duas restrições, com o objetivo de determinar a quantidade ótima a ser produzida para maximizar o lucro. Pelos resultados obtidos, houve a determinação da quantidade ótima a ser produzida dos dois produtos para maximizar o lucro e verifica-se a eficácia da programação linear como ferramenta da pesquisa operacional para resolver problemas de otimização.

Oliveira, Xavier, Silva, Mendes e Takeda (2019) realizam uma análise de trabalhos do problema de designação de pessoas com o uso da programação linear. Um problema de designação de pessoas pode ser definido como uma alocação eficiente de pessoas às tarefas a serem realizadas. A metodologia utilizada foi qualitativa a partir de registros bibliográficos de catorze trabalhos, realizados nos últimos sete anos, que utilizaram a programação linear para solucionar problemas de designação de pessoas. Pelos resultados obtidos, observou-se que metade dos trabalhos analisados utilizou a programação linear inteira. Por outro lado, 21% dos trabalhos utilizaram programação linear mista e somente 10% fez uso da programação linear binária. Dessa forma, a programação linear se apresenta como uma ferramenta eficaz para solucionar o problema de designação de pessoas.

Azzi, Lima, Souza e Delgado (2018) apresentam uma aplicação da programação linear na Agroindústria. O objetivo é realizar a seleção das culturas e meses de plantio de forma a maximizar a receita líquida do agricultor. De maneira análoga, determinar os preços dos insumos do plantio, ou seja, os preços de água e terra irrigável. Neste planejamento, tem-se restrições de água e terra e deve-se selecionar as culturas e meses de plantio em um perímetro

irrigado formado por um conjunto de lotes de forma a maximizar a receita líquida e o melhor uso dos recursos disponíveis. Dessa forma, o problema trata de determinar um padrão ótimo de cultivo das culturas para cada lote de forma que a receita líquida seja máxima com o uso racional dos recursos.

Sousa, Furtado e Horta (2018) mostram a resolução gráfica de um problema de programação linear quando as regiões admissíveis são poliedros, ou seja, com três variáveis de decisão. Sabe-se da literatura que problemas de programação linear no plano, duas dimensões, são facilmente solucionados pelo método gráfico e analítico. No entanto, quando aborda-se o caso estudado de regiões admissíveis como poliedros, aumenta-se a complexidade do problema. Para tal, trabalhou-se com construções auxiliares e um ambiente computacional mais complexo. Dessa forma, as construções desenvolvidas no software GeoGebra podem ser utilizadas para fins didáticos no que se refere a programação linear e pesquisa operacional.

Silva, Capocci, Gonçalves, Bueno e Oliveira (2018) relatam uma aplicabilidade da programação linear para um problema de minimização de custos na distribuição da indústria de cimentos. Para tal, fez-se uso de métodos quantitativos para determinar a rota ótima a ser utilizada. A rota ótima neste caso é a rota correspondente ao menor custo de frete para a distribuição de sacos de cimento de 50 kg de dois centros de distribuição para seis lojas na região metropolitana de São Paulo. Essas seis lojas pertencem a uma empresa varejista de materiais de construção. Os resultados mostraram a otimização da rota de distribuição do cimento, minimizando os custos de frete.

Ferreira (2018) aplica a programação linear em um estudo de caso do despacho de potência ativa em usinas hidrelétricas com potência superior a 30 MW. A programação do despacho de potência nessas usinas deve ser informada ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) no dia anterior a operação em tempo real. Como essa programação é normalmente aceita pelo ONS, é interessante otimizar o processo de forma a um melhor aproveitamento de recursos, como a água, visando o aumento do lucro do sistema de geração de energia. O problema da programação do despacho possui não linearidades e variáveis binárias associadas com a função de produção hidrelétrica. Para uma modelagem precisa das unidades geradoras, utilizou-se um modelo para programação do despacho de centrais geradoras com operação isolada por meio da programação linear inteira mista. Essas simulações foram feitas para quatro plantas da Eletrosul que totalizam 159 MW. Pelos

resultados obtidos, observa-se que o problema proposto foi solucionado com um tempo de processamento adequado.

Battesini, Coelho e Seta (2018) mostram a aplicabilidade da programação linear a um problema de otimização do acesso geográfico em redes temáticas de atenção à saúde. Neste estudo, é verificado o acesso geográfico à rede de quimioterapia do Sistema Único de Saúde (SUS), no estado de Rio Grande do Sul, Brasil. O SUS está organizado no formato de redes de serviços para atenção à saúde. Pelos resultados obtidos, observa-se a solução ótima possibilita uma diminuição de 14,4% na distância total mensal percorrida para a realização dos tratamentos de quimioterapia nas redes de serviços para atenção à saúde do SUS no estado do Rio Grande do Sul.

Mariquito, Silva, Araujo, Porfirio e Abreu (2018) apresentam uma aplicação da programação linear em um sistema de gestão da produção com o objetivo de maximizar os resultados. O estudo de caso foi feito em uma concessionária de energia elétrica no processo de aferição dos equipamentos de medição. A programação linear é utilizada para um atendimento de demanda de forma mais eficiente. Deve-se considerar neste caso um critério de valor econômico devido ao tempo existente entre a entrada no estoque e o seu uso efetivo e retorno do investimento. Por meio das implementações foi possível o uso de uma melhor configuração adaptada ao melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, seja de equipamentos e de pessoal.

Vieira Fernandes (2019) aplica a programação linear inteira a um problema de designação de recursos humanos com o objetivo de designar pessoas a projetos em uma empresa de engenharia. Para tal, o autor utilizou o método AHP, Analytic Hierarchy Process combinado a programação linear. O método AHP foi utilizado para relacionar fatores quantitativos e fatores qualitativos. Pelos resultados obtidos, verifica-se que a programação linear é uma ferramenta útil para solucionar problemas de designação de funcionários a tarefas em empresas.

Anon, Scaglia e Torezzan (2017) relatam o desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira para otimização de recursos no problema de designação de árbitros para o campeonato brasileiro de futebol. Nesta modelagem, a função objetivo minimiza a distância total percorrida pelos árbitros. As restrições referem-se às preferências e normas adotadas pelos responsáveis pela escala de programação dos árbitros. Para tal implementou-se

testes com dados reais do campeonato brasileiro de futebol do ano de 2014, série A. Pelos resultados obtidos, observa-se que seria possível minimizar a distância percorrida pelos árbitros em até 38,25% e simultaneamente, atender as restrições de limite máximo de duas partidas do mesmo árbitro para cada time e número total entre 18 e 20 partidas por árbitro no campeonato.

Abdel-Basset, Gunasekaran, Mohamed e Smarandache (2019) apresentam uma nova aplicabilidade para a programação linear, o uso da programação linear para modelar problemas de imprecisão de dados, como o processo de tomada de decisão por seres humanos. Para tal, utilizou-se a teoria dos conjuntos neutrosóficos de forma a considerar todos os aspectos do processo de tomada de decisão, como concordância, falta de certeza e discordância. Pelos resultados obtidos, conclui-se que é possível aplicar a teoria dos conjuntos neutrosóficos à programação linear para a simulação do processo de tomada de decisão por seres humanos.

Kolotilin (2018) realiza uma revisão bibliográfica sobre o processo de construção de um sistema de informação e de comunicação, além da elaboração de um plano de ação para o desenvolvimento de estratégias de comunicação. Ao utilizar a programação linear, o autor caracteriza a divulgação ideal de informações e disponibiliza condições sob as quais é eficiente disponibilizar informações para determinados tipos de usuários do sistema ou é adequado não disponibilizar certo tipo de informação para outros usuários.

Nemati, Braun e Tenbohlen (2018) aponta que o Sistema de Gerenciamento de Energia atual deve responder a várias demandas como tarefas ideais de envio de recursos, adição de novos tipos de recursos e novas considerações de modelagem. Além destas, pode-se citar a mudança na estrutura da grade multicelular e novas políticas que devem ser cumpridas pelo sistema das microrredes. Dessa forma, deve-se atingir vários objetivos que ao mesmo tempo são conflitantes entre si e possuem restrições. Para solucionar este problema, foi utilizada a programação linear inteira mista.

Wang, Zhang, Zhuo, Kang e Kirschen (2018) relatam que um sistema de energia múltipla apresenta maior eficiência e flexibilidade no suprimento comparado a sistemas de energia separados. No entanto, o acoplamento entre diferentes formas de energia ocasiona dificuldades no planejamento do sistema de energia múltipla. Os autores propõem um novo método de planejamento para este tipo de sistema que determina em conjunto a geração,

conversão e fornecimento ideias de eletricidade, calor, refrigeração e outros serviços. Este problema apresenta o objetivo de minimizar a soma dos custos de investimento e operacionais. Para tal o modelo foi formulado como um problema de programação linear inteira mista, com base na teoria dos grafos. Para demonstrar a eficácia do método, foi apresentado um estudo de caso numérico para o planejamento de um centro administrativo em Pequim, na China.

Bartlett e Cussens (2017) apontam que as redes bayesianas são utilizadas para representar relacionamentos de probabilidade condicional entre um conjunto de variáveis. É um problema de grande complexidade computacional, do tipo NP-hard. Para solucionar o problema utilizou-se a programação linear inteira. O artigo apresenta o desempenho de aprendizado da rede bayesiana com o uso da programação linear inteira.

Yin, Yang, Tang, Gao e Ran (2017) apresentam uma aplicação da programação linear inteira mista em um problema de programação dinâmica de trens metropolitanos orientada para a demanda de passageiros, considerando eficiência energética e minimização do tempo de espera. No trabalho, foram formulados dois modelos de programação linear. O primeiro modelo tem o objetivo de minimizar o consumo de energia de tração do trem e o tempo de espera dos passageiros. Por outro lado, o segundo modelo considera o uso da energia de frenagem regenerativa.

No caso deste trabalho, optou-se pela otimização linear, ou seja, a programação linear, devido às condições do problema mecânico acústico para se resolver, que são a necessidade de se obter uma solução ótima, a necessidade de obtenção de uma solução de forma rápida e uma solução matemática exata. Para Hillier e Lieberman (2006), o objetivo da programação linear é obter uma alocação eficiente dos recursos às atividades conforme a Equação 2.7. A função a ser maximizada ou minimizada é denominada função objetivo ou função de avaliação.

$$\text{Maximizar } Z = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \quad (2.7)$$

Para um problema generalizado tem-se m recursos a serem alocados a n atividades, onde o nível da atividade j para  $x_j$ , sendo  $j = (1, \dots, n)$  e a medida do desempenho global Z conforme a Equação 3.1.  $c_j$  representam constantes de entrada do modelo. Dessa forma, o

modelo objetiva obter os valores ser alocados para  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  de forma a maximizar o desempenho global  $Z$ . As limitações para o problema são denominadas restrições e podem ser observadas nas Equações do sistema 2.8. As restrições do sistema 2.8 são conhecidas como restrições funcionais ou estruturais, pois apresentam uma função com todas as variáveis do lado esquerdo da equação ou podem tratar-se de restrições de não-negatividade ou condições não-negativas da forma  $x_j \geq 0$ , para  $j = 1, 2, \dots, n$ .

$$\begin{aligned}
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\
 &\vdots \\
 a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{mn}x_n &\leq b_m \\
 x_1 &\geq 0 \\
 x_2 &\geq 0 \\
 &\vdots \\
 x_n &\geq 0
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

As variáveis  $x$  são as variáveis de decisão do problema. As variáveis  $a$  representam os coeficientes das equações. As variáveis  $b$  são os termos independentes. As variáveis  $x$  devem ter valor maior ou igual a zero. Para Hillier e Lieberman (2006), uma solução é qualquer especificação de valores para as variáveis de decisão  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  independente se a solução encontrada ser desejável ou factível ao problema a ser solucionado. Dessa forma, existem diferentes tipos de soluções. Uma solução factível ou uma solução viável é encontrada quando todas as restrições são atendidas. Ao passo que uma solução inviável ou uma solução não factível constitui em uma solução encontrada para a qual ocorre a violação de uma ou mais restrições. O conjunto de todas as soluções viáveis é denominado espaço de soluções viáveis ou espaço de soluções factíveis.

O espaço de soluções viáveis é um hiperplano com  $n$  dimensões (onde  $n$  é o número de variáveis de decisões) compreendido entre as retas formadas pelas equações das restrições do problema delimitando a região na qual as soluções viáveis estão compreendidas. Para a programação linear, a solução ótima, quando existir, sempre estará contida em um dos vértices do espaço de soluções viáveis. O vértice que contém a solução ótima é o que é tangenciado pela equação formada pela reta da função de avaliação na direção do crescimento de seu gradiente.



Segundo Miyazawa (2019), de forma geral, os problemas de otimização possuem o objetivo de maximizar ou minimizar uma função definida em um certo domínio. A teoria clássica de otimização aborda os problemas nos quais o domínio é infinito. Por outro lado, existem os problemas de otimização combinatória, para os quais o domínio é tipicamente finito e pode-se enumerar os seus elementos e também testar se um dado elemento pertence a esse domínio. O problema abordado neste trabalho é combinatorial não polinomial.

Para Lenstra e Rinnooy (1981), o problema estudado é caracterizado como um problema do tipo *NP-hard* ou NP-difícil (Não Polinomial difícil) devido à sua complexidade computacional que cresce de forma não polinomial em relação aos dados de entrada. Dessa forma, a utilização de métodos exatos para resolver problemas *NP-hard* é computacionalmente inviável devido ao elevado número de combinações e, consequentemente, o elevado tempo de processamento necessário para se obter uma solução matemática exata. Para tal, faz-se o uso de meta-heurísticas conforme Sosa *et al.* (2007).

Sabe-se da literatura que a programação não linear consiste no processo de resolução de um problema de otimização definido por um sistema de equações e restrições, por meio de um conjunto de variáveis reais, uma função objetivo a ser maximizada ou minimizada, onde algumas das restrições ou a função objetivo são não lineares. Também utilizou-se a programação quadrática nesta tese.

### **2.6.1 MODELAGEM MATEMÁTICA – PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE**

O PCV (Problema do Caixeiro Viajante) pode ser definido como um veículo que deve visitar todas as cidades e retornar à origem, passando uma única vez em cada cidade e minimizando a distância percorrida (COSTA, 2011). O caixeiro é representado pelo funcionário que realiza inspeção em equipamentos na planta industrial. As cidades são representadas pelos equipamentos a serem inspecionados. A função objetivo pode tratar de distância, valor de dose, entre outros. A Equação 2.9 representa a função objetivo a ser minimizada, na qual  $r_{ij}$  são os valores de dose, na planta industrial que o funcionário ficará exposto ao se deslocar entre o equipamento  $i$  e o equipamento  $j$ , e  $x_{ij}$  é uma variável de decisão binária que recebe o valor 1 caso o funcionário se desloque entre o equipamento  $i$  e o equipamento  $j$  ou 0 caso contrário. O ato do funcionário se deslocar entre os diversos

equipamentos será considerado a rota a ser percorrida. A explicação de como é feito o cálculo da dose encontra-se no início deste capítulo, seção Dosimetria.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} x_{ij} \quad (2.9)$$

A restrição imposta pela Equação 2.10 garante que o funcionário vá ao equipamento  $j$  somente uma vez em cada rota percorrida.

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (2.10)$$

A restrição presente na Equação 2.11 impõe que o funcionário deixe somente uma vez o equipamento  $i$  em cada rota.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2.11)$$

As restrições das Equações 2.12 e 2.13 funcionam em conjunto para evitar a formação de sub-rotas. Uma sub-rota seria uma rota na qual o funcionário não inspeciona todos os equipamentos da fábrica antes de retornar ao ponto inicial. Define-se fluxo como o ato ou efeito de fluir, de se movimentar de forma contínua e tráfego contínuo de funcionários. A variável de decisão  $f_{ij}$  representa o fluxo entre os equipamentos  $i$  e  $j$ , o fluxo entra em um nó  $j$  (equipamento  $j$ ) deve ser uma unidade maior do que o fluxo que sai do mesmo nó  $j$ . Desta forma, o funcionário deve deixar uma unidade de fluxo em cada equipamento visitado permitindo que o modelo matemático diferencie os equipamentos inspecionados dos não inspecionados. O fluxo máximo é limitado ao número máximo de nós para evitar que o funcionário possa percorrer alguma sub-rota utilizando o fluxo excedente.

$$\sum_{i=1}^n f_{ij} - \sum_{i=1}^n f_{ji} = 1 \quad \forall j \text{ com } j \neq 1 \quad (2.12)$$

$$f_{ij} \leq (|nós| - 1) x_{ij} \quad \forall i, j \quad (2.13)$$

A Equação 2.14 é uma restrição que garante que o  $x$  seja binário e o fluxo seja inteiro e não negativo.

$$\begin{aligned} x_{ij} &\in \{0, 1\} & \forall i, j \\ f_{ij} &\in \mathbb{Z} & \forall i, j \\ f_{ij} &\geq 0 & \forall i, j \end{aligned} \quad (2.14)$$

### 2.6.2 META-HEURÍSTICAS

Para Silva (2019), o objetivo de uma meta-heurística é encontrar boas soluções ou até mesmo soluções ótimas. Dessa forma, uma meta-heurística consiste na aplicação iterativa de uma heurística subordinada, busca local e utiliza-se de mecanismos para evitar-se ótimos locais (vales). Existem dois tipos de meta-heurísticas, as com uma única solução e as com várias soluções.

As meta-heurísticas com uma única solução desenvolvem a exploração do espaço das soluções por meio de movimentos a cada iteração sobre uma solução corrente. Exemplos deste tipo de meta-heurística são: *Multi-Start*, GRASP, VNS, ILS, Busca Tabu e Recozimento Simulado.

O outro grupo de meta-heurísticas são aquelas com várias soluções que exploram o espaço de soluções viáveis através de uma busca populacional. Neste caso, mantém-se um conjunto de boas soluções e realiza a combinação dessas soluções com o objetivo de produzir soluções ainda melhores. Entre as meta-heurísticas deste grupo, pode-se citar algoritmos genéticos, colônia de formigas, colônia de abelhas e enxame de partículas.

De forma geral, as meta-heurísticas com uma única solução se diferenciam pelo critério adotado para a escolha da solução inicial, a definição da vizinhança, o critério adotado para seleção de uma solução vizinha e a estratégia utilizada com o objetivo de escapar de ótimos locais.

Ao passo que as meta-heurísticas populacionais iniciam com uma população inicial, que é um conjunto de soluções diferentes. Cada indivíduo da população representa uma solução. De forma iterativa, gera-se uma nova população e troca-se a população corrente por uma nova

população de soluções. O processo tem continuidade até que seja atingido o critério de parada ou a população se estabilize, ou seja, todas as soluções sejam aproximadamente iguais.

## 2.7. MODELAGEM MATEMÁTICA – PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

Para Lima *et al.* (2015), a solução para o problema de roteamento de veículos (PRV) deve conter um conjunto de rotas a serem utilizadas por uma frota de veículos homogêneos, no caso deste trabalho, funcionários para atendimento de um conjunto de clientes, equipamentos. Dessa forma, busca-se minimizar o custo da operação, o ruído. O PRV é baseado em algumas premissas. Primeiro, as rotas devem iniciar e terminar no mesmo ponto da operação, ou seja, no biombo de operação no caso deste trabalho. A segunda premissa consiste em cada equipamento deve ser inspecionado uma única vez e solucionado integralmente por um único funcionário. A soma das demandas de uma rota não pode exceder a capacidade de atendimento de cada funcionário. Sabe-se da literatura que problemas desta magnitude são classificados como *NP-hard*, pois a ordem de complexidade é não polinomial.

Laporte (1992) aponta que no PRV a demanda dos equipamentos deve ser previamente definida e que deve ser atendida de forma completa por um único funcionário. A capacidade dos funcionários é homogênea e deve ser definida de forma prévia também e os funcionários partem de um mesmo ponto (biombo de operação). Há a restrição de capacidade do veículo a qual determina que a soma das demandas dos equipamentos da rota não pode, de forma alguma, exceder a capacidade do funcionário.

Nesta tese foi proposta a seguinte modelagem para a planta industrial de geração de energia. Utilizou-se dois funcionários, sendo a capacidade de cada funcionário foi definida como 5 equipamentos. No total, devem ser inspecionados 10 equipamentos da planta industrial. A Equação 2.15 representa a função objetivo a ser minimizada, na qual  $d_{ij}$  são os valores da dose aos quais o funcionário ficará exposto ao se deslocar entre o equipamento  $i$  e o equipamento  $j$ , e  $x_{ij}$  é uma variável de decisão binária que recebe o valor 1 caso o funcionário se desloque entre o equipamento  $i$  e o equipamento  $j$  ou 0 caso contrário. O ato do funcionário se deslocar entre os diversos equipamentos será considerado a rota a ser percorrida. Para facilitar o entendimento das fórmulas utilizou-se a abreviatura “equip” para representar o conjunto dos equipamentos disponíveis.

$$\text{minimizar } \sum_{i \in \text{equip}} \sum_{j \in \text{equip}} d_{ij} x_{ij} \quad (2.15)$$

A restrição presente na Equação 2.16 impõe que um único funcionário deixe somente uma vez o equipamento  $i$  em cada rota.

$$\sum_{j \in \text{equip}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \text{equip} | i \neq 1 \quad (2.16)$$

A restrição imposta pela Equação 2.17 garante que um único funcionário vá ao equipamento  $j$  somente uma vez em cada rota percorrida.

$$\sum_{i \in \text{equip}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \text{equip} | j \neq 1 \quad (2.17)$$

As restrições das Equações 2.18 e 2.19 funcionam em conjunto para evitar a formação de sub-rotas. Uma sub-rota seria uma rota na qual um funcionário não inspeciona todos os equipamentos da fábrica designados a ele antes de retornar ao ponto inicial. O fluxo representa o ato ou efeito de fluir, de se movimentar de forma contínua e tráfego contínuo de funcionários. A variável de decisão  $f_{ij}$  representa o fluxo entre os equipamentos  $i$  e  $j$ , o fluxo entra em um nó  $j$  (equipamento  $j$ ) deve ser uma unidade maior do que o fluxo que sai do mesmo nó  $j$ .

Desta forma, um funcionário deve deixar uma unidade de fluxo em cada equipamento visitado permitindo que o modelo matemático diferencie os equipamentos inspecionados dos não inspecionados. O fluxo máximo é limitado ao número máximo de nós para evitar que o funcionário possa percorrer alguma sub-rota utilizando o fluxo excedente. A demanda representa a necessidade do equipamento de ser inspecionado em tempo, ou seja, uma demanda igual a 6 significa que uma máquina necessita de 6 minutos para ser inspecionada. Nesta simulação, utilizou-se o tempo igual a 1 unidade adimensional.

$$\sum_{i \in \text{equip}} f_{ij} - \sum_{i \in \text{equip}} f_{ji} = \text{demanda}_j \quad \forall j \in \text{equip} | j \neq 1 \quad (2.18)$$

$$f_{ij} \leq x_{ij} \text{ capacidade} \quad \forall i, j \in \text{equip} \quad (2.19)$$

O termo capacidade que aparece na Equação 2.19 representa o tempo disponível para inspecionar todas as máquinas.

Na Equação 2.20, observa-se que a quantidade de funcionário que sai deve ser igual ao que entra no posto para inspecionar o equipamento, ou seja, saem 6 funcionários, voltam 6 funcionários, o que sai é igual ao que entra,  $i = 1$  e  $j = 1$ .

$$\sum_{j \in \text{equip}} x_{1j} = \sum_{j \in \text{equip}} x_{j1} \quad (2.20)$$

Além disso,  $x_{ij}$  é uma variável de decisão binária que recebe o valor 1 caso o funcionário se desloque entre o equipamento  $i$  e o equipamento  $j$  ou 0 caso contrário e o fluxo é inteiro não negativo conforme Equação 2.21.

$$\begin{aligned} x_{ij} &\in 0,1 & \forall i, j \in \text{equip} \\ f_{ij} &\geq 0 & \forall i, j \in \text{equip} \end{aligned} \quad (2.21)$$

## 2.8. MÉTODO DA PONDERAÇÃO (*WEIGHTED SUM*)

Para Denysiuk (2012), o Método da Ponderação, *Weighted Sum*, converte a otimização de vários fatores simultâneos em um único objetivo para obter uma solução ótima. Este método de otimização para vários fatores simultâneos é caracterizado pela eficiência e facilidade de implementação. Dessa forma, implementou-se o PRV como um problema de otimização para dois e três fatores simultâneos por meio do Método da Ponderação conforme a Equação 2.22. A variável dose refere-se à dose de exposição do funcionário,  $\text{dist}$  representa a distância percorrida pelo funcionário e TWA é *Time Weighted Average*, o ruído médio equivalente global da jornada de trabalho. É válido ressaltar que deve ser feita uma normalização dos objetivos da função. Nesta tese foi feita a normalização dos objetivos para garantir a consistência dimensional.

$$\begin{aligned}
\text{minimizar} \quad & \sum_{i \in \text{maquinas}} \sum_{j \in \text{maquinas}} (pesodose_{ij} dose_{ij} + pesodist_{ij} dist_{ij} + pesotwa_{ij} twa_{ij}) x_{ij} \\
& \sum_{j \in \text{maquinas}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \text{maquinas} | i \neq 1 \\
& \sum_{i \in \text{maquinas}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \text{maquinas} | j \neq 1 \\
& \sum_{i \in \text{maquinas}} f_{ij} - \sum_{i \in \text{maquinas}} f_{ji} = \text{demanda} \quad \forall j \in \text{maquinas} | j \neq 1 \\
& \sum_{j \in \text{maquinas}} x_{1j} = \sum_{j \in \text{maquinas}} x_{j1} \\
& f_{ij} \leq x_{ij} \text{ capacidade} \quad \forall i, j \in \text{maquinas} \\
& x_{ij} \in 0, 1 \quad \forall i, j \in \text{maquinas} \\
& f_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in \text{maquinas}
\end{aligned} \tag{2.22}$$

## 2.9. MODELAGEM MATEMÁTICA – PROBLEMA DE DESIGNAÇÃO

Para Hillier e Lieberman (2006), o Problema de Designação pode ser definido como um tipo especial de problema de Programação Linear, no qual os designados são indicados para a execução de tarefas. Dessa forma, o Problema de Designação é aplicável para funcionários responsáveis por executar tarefas de manutenção em máquinas em uma planta industrial, ou seja, cada máquina deve ser designada a um funcionário. As implementações do Problema de Designação devem respeitar as cinco hipóteses descritas a seguir.

O número de designados e o número de tarefas deve ser o mesmo. É válido ressaltar que esta hipótese pode ser adaptada com a criação de funcionários “fantasmas”, virtuais para a alocação das tarefas de manutenção. A segunda hipótese refere-se a atribuição de cada designado a uma tarefa. Por outro lado, a terceira hipótese garante que cada tarefa seja executada por exatamente um designado. A quarta hipótese trabalha com a ideia de custo associado ao designado  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) para a execução da tarefa  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ). O objetivo é determinar como realizar as  $n$  designações de forma a minimizar o custo total, quinta hipótese. O sistema 2.23 apresenta o modelo matemático para o Problema de Designação.

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \\
& \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \\
& \sum_{i=1}^m a_{ij} x_{ij} \leq \text{dose máxima} \quad \forall j \\
& x_{ij} \in 0,1 \quad \forall i, j
\end{aligned} \tag{2.23}$$

O Sistema 2.23 é composto de quatro equações. A Equação 2.24 representa a função objetivo do problema, na qual  $x$  é a variável de decisão do problema, ou seja, atribui-se 0 caso o funcionário não vá a máquina ou 1 quando o funcionário foi à máquina realizar a manutenção.

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \tag{2.24}$$

A restrição da Equação 2.25 garante que um único funcionário entre no posto de operação onde encontra-se a máquina, faça a manutenção e saia do posto de operação.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \tag{2.25}$$

A Equação 2.26 é uma restrição que estabelece uma dose máxima para cada funcionário. Esta restrição permite o equilíbrio entre as doses dos funcionários.

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} x_{ij} \leq \text{dose máxima} \quad \forall j \tag{2.26}$$

A restrição 2.27 garante que a variável de decisão do problema é binária, ou seja, recebe 0 caso o funcionário não vá a máquina ou recebe 1 quando o funcionário foi à máquina fazer a manutenção.

$$x_{ij} \in 0,1 \quad \forall i, j \tag{2.27}$$

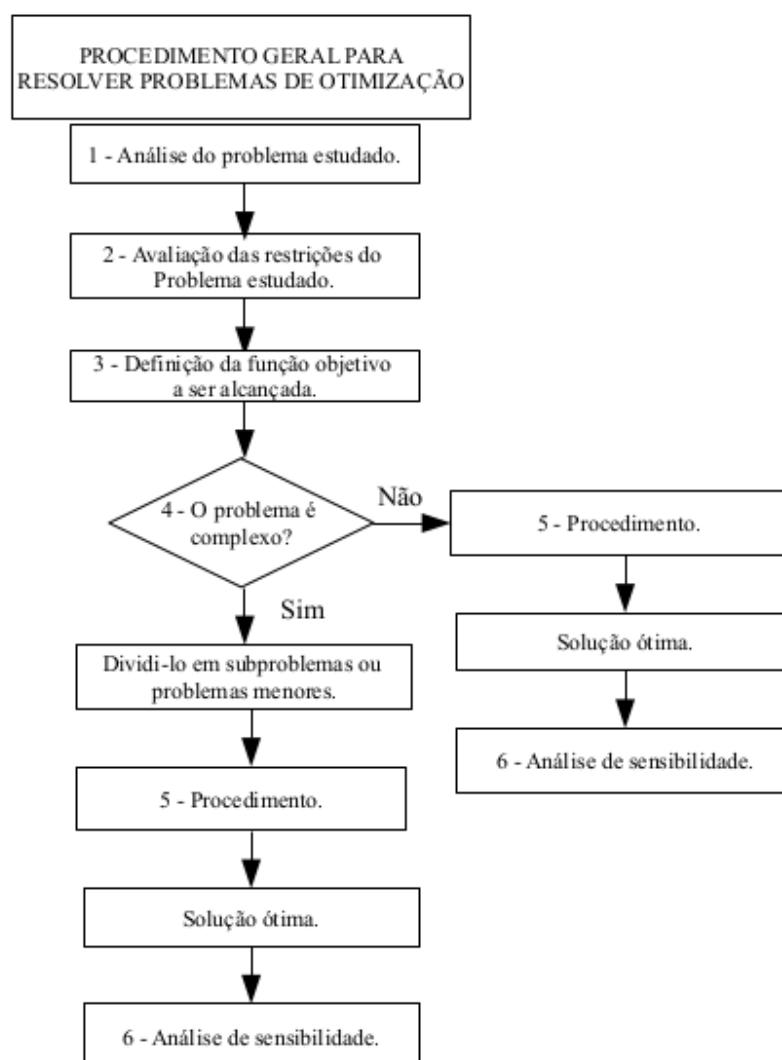


## CAPÍTULO III

Neste capítulo apresenta-se metodologia utilizada, os principais métodos e fluxogramas.

### 3.1. METODOLOGIA

Para encontrar rotas que minimizem a dose de exposição, adotou-se um procedimento geral para resolver problemas de otimização composto por 6 passos conforme Lobato (2017).



*Figura 3.1. Fluxograma do Procedimento Geral*

Fonte: Adaptado de Lobato (2017).

Dessa forma, na primeira parte do trabalho realizou-se uma análise do problema mecânico acústico, ou seja, da natureza do problema. Observou-se tratar de um problema no qual há a necessidade de obtenção de uma solução ótima, de forma rápida e uma solução matemática exata.

Como um segundo passo na metodologia utilizada procedeu-se a avaliação das restrições do problema estudado. Neste caso, realizou-se uma avaliação das variáveis utilizadas, a dose de exposição, as distâncias percorridas e o TWA, ruído médio equivalente global da jornada de trabalho, fator de capacidade de atendimento por funcionário. O fator de capacidade de atendimento por funcionário representa a quantidade de máquinas que podem ser inspecionadas por um funcionário, ou seja, é a capacidade de atendimento do funcionário. Além disso, nesta análise considerou-se as restrições de equilíbrio de dose, de forma a minimizar a dose de exposição dos funcionários e simultaneamente, garantir o equilíbrio entre as doses otimizadas dos funcionários.

O terceiro passo da metodologia corresponde a definição da função objetivo a ser alcançada, ou seja, a partir do problema formulado define-se uma função que contemple o objetivo para solucionar o problema mecânico acústico. Para tal, deve-se analisar se o problema é de minimização ou maximização. No caso de uma fábrica que deseja maximizar o lucro, adota-se uma função objetivo de maximização de receitas. Por outro lado, para este mesmo problema se pode introduzir uma função objetivo de minimização dos custos operacionais. Para o problema mecânico acústico estudado optou-se por uma função objetivo de minimização da dose de exposição, distância percorrida e TWA.

No passo 4 deve-se realizar uma análise de complexidade do problema. Caso o problema seja um problema simples, ou seja, não é complexo se realiza um procedimento e é obtida a solução ótima. Por outro lado, ao tratar-se de um problema complexo com várias variáveis e muitos dados se adota a subdivisão do problema complexo em problemas menores para facilitar o processo de obtenção de solução. Por meio dos problemas menores, aplica-se um procedimento de otimização, ou seja, modela-se o problema com o método Simplex por meio de um algoritmo e obtêm-se a solução ótima.

No entanto, é necessário realizar uma análise de sensibilidade. Para esclarecer o conceito de análise de sensibilidade, deve-se recorrer ao método escolhido para solucionar o problema. No caso desta tese, utilizou-se o método simplex. O método simplex foi utilizado nesta tese

quando foi realizada a implementação no software Gurobi.

O método simplex é composto por alguns passos. Inicialmente realiza-se a representação do espaço de soluções por meio de  $m$  equações em  $n$  variáveis e restrição de todas as variáveis a valores não negativos de forma que  $m < n$ . Assim, o sistema apresenta um número infinito de soluções viáveis. Na próxima parte do método, deve-se determinar as soluções básicas viáveis das equações. Assim, obtêm-se os candidatos à solução ótima, ou seja, um número finito de soluções básicas viáveis. Com base na função objetivo, é possível determinar a solução básica viável entre todas as candidatas conforme Taha (2008).

Quanto à análise de sensibilidade sabe-se que os dados de entrada podem variar dentro de determinados intervalos sem ocasionar mudanças na solução ótima. Assim, deve-se utilizar a análise pós-ótima. A análise pós-ótima é a determinação da nova solução ótima decorrente de mudanças intencionais e calibradas nos parâmetros de entrada do modelo. Por conseguinte, é possível avaliar o impacto dessa incerteza sobre a qualidade da solução ótima obtida. No caso do problema simplificado, também deve-se proceder a análise de sensibilidade.

### **3.2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Esta tese se propõe a desenvolver um sistema de otimização de roteamento de funcionário para minimizar a exposição ao ruído ocupacional. Para tal, o problema foi modelado como um Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e como um Problema de Roteamento de Veículos (PRV).

Na primeira parte da pesquisa, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre acústica, fundamentos de ruído, pesquisa operacional, programação linear, o Método Simplex, Método Gráfico, Método Algébrico, meta-heurísticas, o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), Problema de Roteamento de Veículos (PRV), Método da Ponderação, Problema de Designação, a Perda Auditiva Induzida por Ruído Ocupacional (PAIRO), a legislação acerca da insalubridade por ruído, a dosimetria e TWA – Time Weighted Average. As modelagens do problema foram desenvolvidas inicialmente como o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) de três formas diferentes, uma com base nos dados de TWA, outra com base na distância total percorrida e outra com base na dosimetria.

Em uma segunda etapa do trabalho, modelou-se como Problema de Roteamento de Veículos (PRV), seja com base nos dados de TWA, seja com base na distância total percorrida ou com base na dosimetria. Ao final desta etapa, efetuou-se um comparativo de desempenho entre dois softwares de

otimização, LINGO e GUROBI para a modelagem como Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e para a modelagem como Problema de Roteamento de Veículos (PRV).

Na etapa seguinte do trabalho, realizou a otimização com 2 fatores simultâneos e com 3 fatores simultâneos, com variações na capacidade de atendimento, conforme descrito a seguir. Realizou-se a otimização com 2 fatores com variações na capacidade de atendimento dos funcionários e nas proporções na função objetivo ponderada. Depois, foi realizada a otimização com 3 fatores com variações na capacidade de atendimento dos funcionários e nas proporções na função objetivo ponderada.

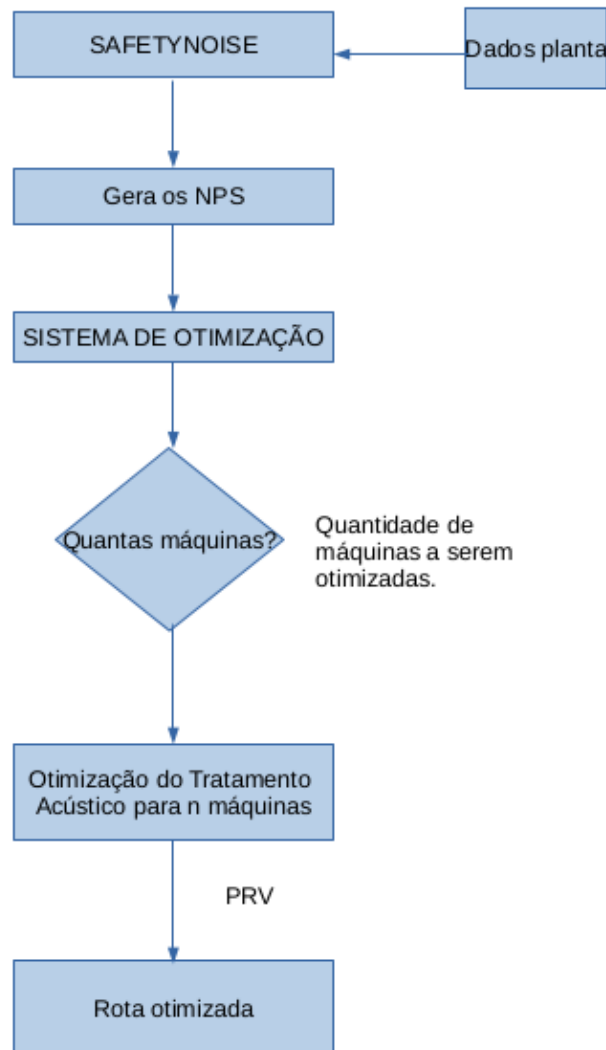
Dessa forma, na primeira parte da pesquisa, objetivou-se realizar um roteamento eficiente para os funcionários de forma a minimizar a dose a qual o funcionário está exposto ao realizar suas tarefas de manutenção de máquinas na planta industrial. Além da dose, foram utilizados os dados de entrada de distância percorrida e TWA. Ao minimizar a distância percorrida, pretendeu-se que com a redução da distância percorrida pelo funcionário, o mesmo permaneça exposto por menos tempo e por consequência reduza a exposição ao ruído ocupacional. De forma análoga, a minimização do TWA, Time Weighted Average, ruído médio equivalente global para a jornada de trabalho objetivou a redução da exposição ao ruído ocupacional. Para todos estes dados, utilizou-se os problemas de roteirização PCV (Problema do Caixeiro Viajante) e PRV (Problema de Roteamento de Veículos). Sendo este último modelado para um fator por vez separado e posteriormente, com objetivos múltiplos.

Após a obtenção dos resultados desta etapa, pode-se observar que algumas rotas eram recorrentes. O caminho ótimo do roteamento seriam dois arcos com menor distância. No entanto, o modelo não escolhe estes dois arcos devido às restrições de TWA, dose e distância. Embora, haja a abordagem de menor distância percorrida implicará menor tempo de exposição. Surgiu a necessidade de garantir o equilíbrio entre as doses dos funcionários. Para tal objetivo, minimizar e equilibrar, simultaneamente, as doses dos funcionários os problemas de roteamento supracitados não atendem as novas necessidades do trabalho, pois tanto o PCV quanto o PRV garantem a minimização de uma dose total, mas não há minimização e equilíbrio entre as doses dos funcionários. Dessa forma, após uma nova revisão bibliográfica da área de pesquisa operacional, otimização e programação linear buscou-se uma nova abordagem de solução: o Problema de Designação.

Modelou-se o Problema de Designação para a planta de geração e distribuição de energia. Após esta etapa, realizou-se a implementação para a planta real que não será identificada por motivos de sigilo industrial. Na primeira parte da implementação na planta real utilizou-se um fator de capacidade de

equilíbrio de dose manual e posteriormente, realizou-se um aperfeiçoamento no desenvolvimento para um fator de capacidade automático para o equilíbrio de dose e um comparativo de desempenho entre uma Estação de Trabalho e um computador de uso doméstico.

Para a mitigação das doses via tratamento acústico das fontes de ruído utilizou-se o procedimento mostrado na Figura 3.2:



*Figura 3.2. Fluxograma para o tratamento acústico*

Fonte: Autoria Própria.

A) Escolhe-se inicialmente o número de fontes a receberem tratamento acústico visando o controle do ruído na fonte. Controle do ruído na trajetória não será abordado nesta etapa da pesquisa.

B) Assume-se uma redução de 10 dBA nos níveis de LAeq emitidos pelas fontes tratadas acusticamente.

C) Inicia-se um procedimento de otimização múltiplo.

D) O otimizador de fontes de ruído escolhe as fontes passíveis de tratamento acústico.

E) O otimizador de rotas escolhe a rota que minimiza a dose utilizando os níveis de LAeq previstos pelo SAFETYNOISE em cada ponto da rota.

Como exemplo, a Figura 2.2 mostra uma planilha com a contribuição de cada fonte nos pontos de inspeção.

F) Volta-se ao passo 4 até que um critério de parada seja atingido. O critério de parada é uma variável que deve ser satisfeita para que o programa encerre as suas iterações e atinja a solução ótima. No caso desta tese, o critério de parada é atingido quando encontra-se doses de até o valor 1 para dois funcionários.

G) Saída dos resultados.

Dessa forma, estes dados foram inseridos no sistema de otimização desenvolvido nesta tese. Define-se a quantidade de máquinas a serem otimizadas e após é feita a otimização do tratamento acústico por meio do PRV- Problema de Roteamento de Veículos conforme planilha de dados da Figura 3.3.

As simulações foram realizadas em quatro etapas. A fase corresponde a otimização dos dados antes do tratamento acústico para efeito comparativo, enquanto a fase 2 refere-se a otimização do tratamento acústico para uma máquina da planta de geração de energia. A fase 3 trata da otimização considerando o tratamento acústico de duas máquinas. A fase 4 corresponde a otimização do tratamento para três máquinas. A partir do valor de 0.0093 faz-se a varredura no espaço de soluções viáveis para encontrar a solução ótima que satisfaça as restrições do problema. Foi utilizado o fator de capacidade inicial de 0.0093 para que o programa não retornasse solução inviável e pudesse iniciar as buscas pela solução ótima no espaço viável de soluções. Este valor de 0.093 foi definido pelo menor valor de dose das

máquinas que compõem o estudo. O tamanho do passo ou incremento para a busca da solução ótima foi de 0.001 para proporcionar uma precisão de três casas decimais. O valor limite de exposição foi de 1. Estas simulações foram feitas no software GUROBI na linguagem C/C++.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	X	Y	ALTURA	M	Contribuição (dB)																			Contribuição
2	0.0	0.0	1.6	5	62	1	60	3	55	6	47	9	46	0	46	4	41	8	36	2	35			64,84384372
3	1.0	0.0	1.6	5	63	1	60	6	56	3	55	9	47	4	45	8	43	0	42	2	35			65,83233083
4	2.0	0.0	1.6	5	64	1	60	3	58	6	48	9	47	0	42	4	42	8	38	7	38	2	35	66,33506353
5	3.0	0.0	1.6	5	65	1	60	3	55	6	49	4	45	0	42	7	42	8	39	9	39	2	35	66,66250719
6	4.0	0.0	1.6	5	68	1	60	3	55	6	54	4	42	0	42	8	39	9	39	7	37	2	35	68,98381844
7	5.0	0.0	1.6	5	73	6	66	1	65	9	60	3	55	8	48	0	45	4	39	2	34			74,54147635
8	6.0	0.0	1.6	5	98	3	76	6	75	4	66	9	64	7	63	8	63	1	59	2	55	0	40	98,05542024
9	7.0	0.0	1.6	5	97	1	80	3	76	6	75	8	70	4	64	7	63	9	62	2	55	0	39	97,15769615
10	8.0	0.0	1.6	5	99	1	79	3	78	6	75	8	71	9	63	4	63	7	61	0	59	2	55	99,10307983
11	9.0	0.0	1.6	5	99	1	79	3	76	6	76	8	71	9	70	7	61	0	59	4	55	2	54	99,09411348
12	10.0	0.0	1.6	5	98	1	78	6	76	3	73	8	72	9	70	7	62	0	58	4	55	2	54	98,09614488
13	11.0	0.0	1.6	5	90	1	78	6	77	8	72	3	71	0	70	7	62	0	57	4	55	2	54	98,07805557

Figura 3.3. Exemplo de planilha com a contribuição de cada conjunto fonte

Fonte: Autoria Própria.

### 3.3. SAFETYNOISE – DOSIMETRIA

Sabe-se que, para se calcular a dose de exposição ao ruído ocupacional é necessário conhecer pelo menos duas variáveis: o nível de ruído ambiente e o tempo de exposição. Os métodos de cálculo de dose dados pelo anexo 1 da norma NR15 e pela NHO01 utilizam os tempos de exposição aos níveis de ruído e o tempo de exposição máximo a determinado nível. O trabalhador utiliza um dispositivo integrador instantâneo (dosímetro) durante a sua jornada de trabalho e, ao final desta, o resultado encontrado para uma única pessoa deve ser representativo para o restante do grupo homogêneo.

Neste trabalho, as doses serão calculadas utilizando o módulo de Dosimetria Virtual do software SAFETYNOISE desenvolvido no Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal de Uberlândia. O conceito Dosimetria Virtual foi desenvolvido objetivando estimar computacionalmente um intervalo e confiança para a dose de exposição ao ruído ocupacional para um determinado grupo homogêneo, levando em consideração não somente a rotina de trabalho, mas também os possíveis desvios desta, como atendimento a paradas, liberação de área e de serviço, alterações na rota devido a

reformas ou manutenções, diferenças no ritmo de trabalho de cada trabalhador pertencente ao grupo analisado, dentre outras possíveis variáveis.

A Dosimetria Virtual consiste dos valores médios de 2000 doses simuladas computacionalmente no SAFETYNOISE. O procedimento utilizado nas dosimetrias é um procedimento estatístico baseado em Monte Carlo que necessita como dados de entrada:

- (a) Os níveis de LAeq (dBA) da planta estudada para qualquer localização do grupo homogêneo na planta, gerados a partir de uma simulação computacional.
- (b) A rota do grupo homogêneo, ou seja: qual o tempo médio de permanência em qualquer ponto da planta e respectiva variância.
- (c) A variabilidade valores de LAeq para qualquer localização do grupo homogêneo na planta.

A partir dos dados de entrada, estima-se a dose, para um dado intervalo de confiança, dos grupos homogêneos.

A metodologia desenvolvida já foi validada em trabalhos técnicos realizados na Petrobras (Betim), Black&Decker (Uberaba), BRF (Uberlândia) e BALL (Extrema), entre outros.

Para se realizar uma simulação acústica (seja ela para previsão, apresentação visual ou diagnóstico), é necessário o modelo virtual do ambiente analisado, o qual é composto por barreiras acústicas, fontes de ruído e receptores. Esse modelo pode ser gerado utilizando-se uma série de ferramentas computacionais para design (softwares do gênero CAD) e, após convertido para um formato compatível, utilizado por outro software (no caso deste projeto, foi utilizado o SAFETYNOISE) responsável pela simulação acústica propriamente dita.

### **3.3.1. MODELO ACÚSTICO SAFETYNOISE**

O modelo acústico do SAFETYNOISE é composto por Barreiras Acústicas e Fontes de Ruído, cujas propriedades são extraídas de um arquivo dxf.

Para o SAFETYNOISE é considerada uma barreira acústica qualquer obstáculo existente entre as fontes de ruído e o receptor e grandes áreas que refletem o som incidente. Uma barreira acústica tem que ter uma área mínima de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> e ser opaca ao ruído incidente (pelo menos 80% de área sólida). As características de uma barreira acústica são: a localização espacial, duas dimensões principais



(plano) e as propriedades acústicas do material da qual é composto a barreira: coeficiente de absorção, coeficiente de reflexão especular e perda de transmissão. No SAFETYNOISE, as propriedades acústicas das barreiras são fornecidas em bandas de oitava centradas entre 63 Hz e 8 kHz.

As fontes de ruído podem ser pontuais, lineares ou planares, sendo caracterizadas por sua localização espacial e dimensões principais no caso de fontes lineares e planas.

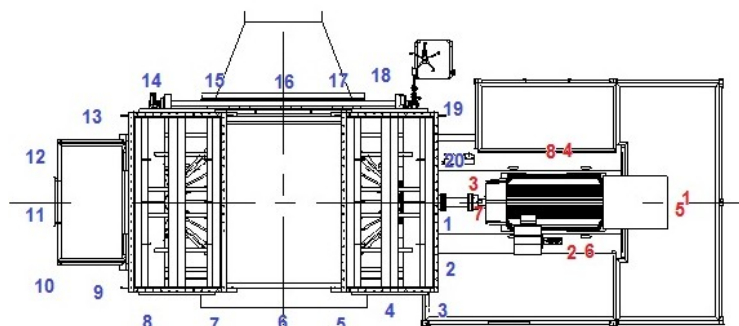
Os desenhos tridimensionais são feitos em ferramentas CAD e exportados no formato ASCII DXF 2004-2006. Os formatos ASCII e DXF consistem em um arquivo DXF (drawing interchange format) que é uma representação binária ou ASCII de um arquivo de desenho. Estes dois formatos são úteis para compartilhar dados de desenho entre outros programas CAD. Os anos 2004-2006 refere-se à versão do software CAD utilizado.

### **3.3.2. PROCEDIMENTO DE IDENTIFICAÇÃO**

No caso de plantas reais, localizadas as principais fontes de ruído da Unidade, é necessário quantificar (identificar) estas fontes.

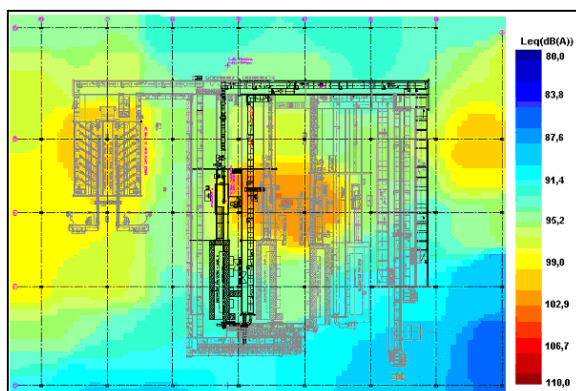
O procedimento de Identificação das fontes consiste na estimativa dos valores de Níveis de Potência Sonora NWS das mesmas em bandas de oitava (63 Hz – 8 kHz) e respectivas direcionalidades. Neste trabalho, o procedimento consiste em:

- A) Fazer um mapeamento dos Níveis de Pressão Sonora NPS, em bandas de oitava, nas proximidades da fonte a ser identificada, em condições normais de operação, conforme exemplo mostrado na Figura 3.1.
- B) Para as máquinas que gerarem valores de NPS, a um metro da fonte, inferiores a 3 dB(A) relativos ao ruído de fundo, a identificação é feita com sonda de intensidade.
- C) Nos casos das fontes de ruído em que a estimativa dos níveis de potência sonora é inviável devido aos níveis de ruído de fundo, são utilizados valores teóricos encontrados na literatura.
- D) De posse das medições, o módulo de identificação do SAFETYNOISE é utilizado para a estimativa dos valores de NWS (Leq – Linear) da fonte.
- E) Finalmente, para a validação do modelo acústico são comparadas as isocurvas de valores de Laeq simuladas com as geradas a partir de um mapeamento da área estudada conforme exemplo mostrado nas Figuras 3.4, 3.5 e 3.6.



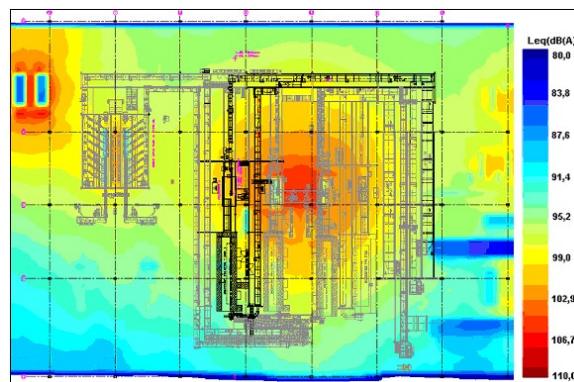
*Figura 3.4. Exemplo de pontos de medição para identificação de fontes pontuais (em vermelho) ou de grandes dimensões (em azul) utilizando pressão sonora.*

Fonte: Autoria Própria.



*Figura 3.5. Mapas de Isopressão Sonora medidos na área.*

Fonte: Autoria Própria.

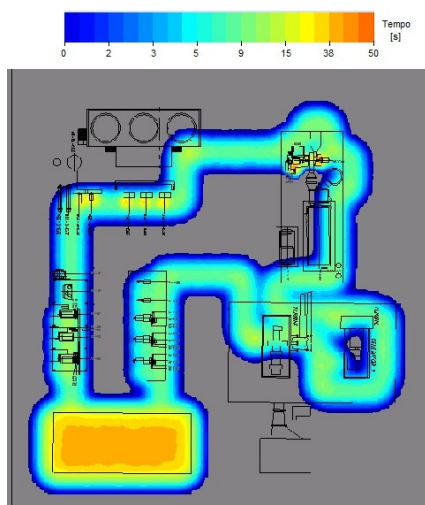


*Figura 3.6. Mapas de Isopressão Sonora simulados para a área.*

Fonte: Autoria Própria.

### 3.3.3. ROTA

As rotas auditadas são levantadas acompanhando o operador em suas jornadas de trabalho. Atribuindo um grau de confiança  $P$  na rota, o software gera um mapa de probabilidade do grupo homogêneo estar  $P$  por cento na rota auditada e  $100-P$  por cento do tempo em qualquer ponto da planta. A Figura 3.7 mostra um exemplo de mapa com as probabilidades do tempo de rota.



*Figura 3.7. Exemplo de mapa com as probabilidades do tempo de rota.*

Fonte: Autoria Própria.

Neste trabalho adotou-se uma confiança na rota de 80%. Nas simulações de rotas, o tempo de traslado em escadas, é simulado para a região final da escada, entrada ou saída, exposta aos maiores níveis de ruído.

### **3.3.4. DOSIMETRIA VIRTUAL**

De posse dos mapas de LAeq, probabilidades de tempo na rota e variabilidade dos níveis de potência sonora das fontes identificadas, o procedimento de dosimetria virtual consiste em:

1. Inicializar a dose do grupo homogêneo igual a zero.
2. Para cada minuto da jornada gera-se aleatoriamente uma posição na planta e o valor de LAeq corrigido no ponto, pelas variações estatísticas dos níveis de potências sonoras das fontes.
3. Calcular o tempo de exposição para o ponto. Se o tempo de rota no ponto for maior do que 1 minuto, o tempo é um minuto, caso contrário o tempo será o tempo de rota atual do ponto.
4. Atualizar o mapa do tempo de rota, ou seja: subtrair no tempo de rota do ponto o valor do tempo

utilizado.

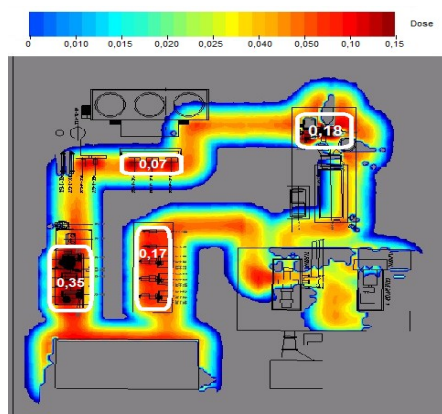
5. Calcula-se a dose e acumula.

6. Repetir os passos de 2 a 5 até completar a jornada de trabalho do grupo homogêneo.

7. Repetir os passos de 1 a 6 até completar 2000 doses. Pelo Método de Monte Carlo, utiliza-se um número elevado de doses para melhorar a qualidade do resultado obtido.

8. Calcular dose média amostral e intervalos de confiança.

A Figura 3.8 mostra um exemplo de dose virtual, onde pode-se ver a contribuição das várias regiões da rota na dose total do grupo homogêneo.



*Figura 3.8. Exemplo de mapa de dose virtual.*

Fonte: Autoria Própria.

Para as simulações teóricas assumiu-se uma variação de -2 a 5 dB nos níveis de potência sonora dos equipamentos. Sabe-se que uma potência com expoente negativo é calculada utilizando-se o inverso da base e o oposto do expoente.

Na aplicação real as variações máximas são estimadas como sendo duas vezes a raiz quadrada do valor médio quadrático da diferença entre os valores de NPS máximos e  $L_{Aeq}$ , medidos durante o procedimento de mapeamento global nas proximidades da fonte (uma boa estimativa para  $2\sigma$ ). Nas estimativas das variações mínimas são utilizados os valores de  $L_{Aeq}$  e  $L_{90}$ .

Acumula-se o tempo  $d$  (variações estatísticas, sendo o valor corrigido pelas variações aleatórias dos níveis de potência sonora).

1. O grau de confiança na rota foi assumida igual a 80%.
2. Nas simulações de rotas, o tempo de traslado em escadas é simulado para a região exposta aos maiores níveis de ruído.
3. Para fontes auxiliares (bombas de óleo, ventiladores e etc) assume-se valores constantes de NWS.
4. Para fontes do tipo acionamento de máquinas (motores elétricos e redutores) é assumido uma variação de  $\pm 3$  dBA nos valores de NWS em função da carga de trabalho.
5. Para as fontes do tipo máquinas e equipamento (britadores, moinho, esteiras rolantes) as variações máximas são estimadas como sendo duas vezes a raiz quadrada do valor médio quadrático da diferença entre os valores de NPS máximos e  $L_{Aeq}$ , medidos durante o procedimento de mapeamento global nas proximidades da fonte (uma boa estimativa para  $2\sigma$ ). Nas estimativas das variações mínimas são utilizados os valores de  $L_{Aeq}$  e  $L_{90}$ . O procedimento padrão utilizado na indústria é a medição do  $L_{Aeq}$  de 5 em 5 metros. Dessa forma, é feito o mapeamento, a identificação da fonte. De posse dos maiores níveis é feito o procedimento de otimização. Deve-se comparar o simulado com o medido. Caso a diferença seja grande, há um erro para identificar a fonte a ser tratada e a fonte correta não foi tratada adequadamente.
6. Uma vez que são utilizados valores de  $L_{Aeq}$  na identificação, e uma vez que na Britagem Primária I o processamento é contínuo, assume-se um tempo médio de operação para as máquinas de 100%, ou seja, as máquinas são utilizadas durante toda a jornada de trabalho de 8 horas. Sabe-se que a britagem é uma operação que fragmenta os blocos obtidos na lavra, entretanto como há uma série de tipos de máquinas, esta operação deve ser repetida várias vezes, alterando-se a máquina, até que se obtenha um material adequado à alimentação da moagem.
7. A jornada de trabalho é fixada em 8 horas.

8. Se o tempo total de permanência na área analisada for menor do o tempo da jornada de trabalho, simula-se o grupo homogêneo numa região com níveis máximos de ruído inferiores a 85 dBA durante o tempo necessário para completar a jornada.

### 3.4. MÉTODO SIMPLEX

Arenales, Armentano, Morabito e Yanasse (2007) apresentam uma propriedade fundamental da Otimização Linear a qual enuncia que caso um problema de otimização linear tenha solução ótima, logo existe um vértice ótimo, ou seja, existe uma solução básica factível ótima. Com base nessa propriedade, deve-se buscar o ótimo entre todas as soluções básicas factíveis. Dessa forma, obtêm-se um método de solução.

Primeiro, determina-se as  $p$  soluções básicas factíveis que são os vértices da região factível  $R$ ,  $x_1, x_2, \dots, x_p$ . Com base nessas soluções, encontra-se a solução ótima  $x_i$  tal que  $f(x_i) = \min\{f(x_p), p=1, 2, \dots, p\}$ . É válido ressaltar que o número  $p$  pode ser um número muito grande em aplicações reais tornando o tempo de processamento muito elevado para resolver o problema. Para resolver este tipo de problema, existe o Método Simplex. O Método Simplex começa a partir de uma solução básica factível e busca somente outras soluções básicas melhores que a corrente.

Conforme Taha (2008), o Método Simplex adota duas premissas básicas. A primeira refere-se a todas as restrições serem equações cujos lados direitos são não negativos. A outra premissa garante que todas as variáveis são não negativas. O objetivo dessas duas premissas é conferir maior padronização e eficiência aos cálculos do Método Simplex.

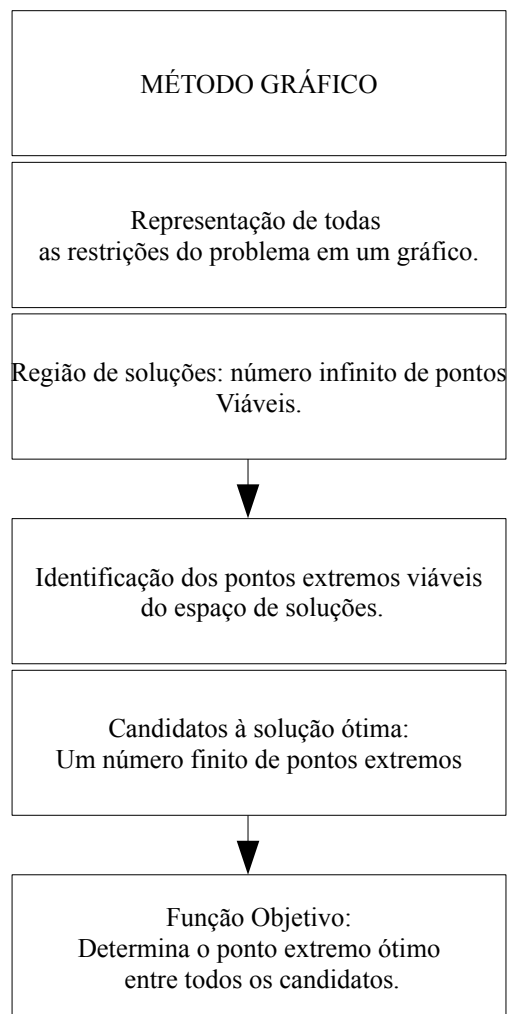
Nas restrições do tipo  $\leq$ , o lado direito da desigualdade representa o limite de disponibilidade de um recurso. Por outro lado, o lado esquerdo da desigualdade refere-se à utilização do recurso limitado pelas variáveis. A diferença entre o lado direito e o lado esquerdo da restrição é a quantidade de recurso não utilizada ou folga. Dessa forma, para transformar a desigualdade do tipo  $\leq$  em uma equação, deve-se adicionar uma variável de folga não negativa ao lado esquerdo da restrição.

De maneira análoga, uma restrição do tipo  $\geq$  apresenta um limite inferior para as variáveis do modelo de programação linear, de forma que o valor que o lado esquerdo excede

o limite mínimo constitui uma sobra. Assim, transforma-se a desigualdade em igualdade com a subtração de uma variável de sobra não negativa ao lado esquerdo da restrição. Deve-se atentar para que o lado direito da equação obtida seja não negativo. Para satisfazer esta condição, multiplica-se ambos os lados da equação obtida por -1 quando necessário.

### 3.4.1. MÉTODO GRÁFICO E MÉTODO ALGÉBRICO

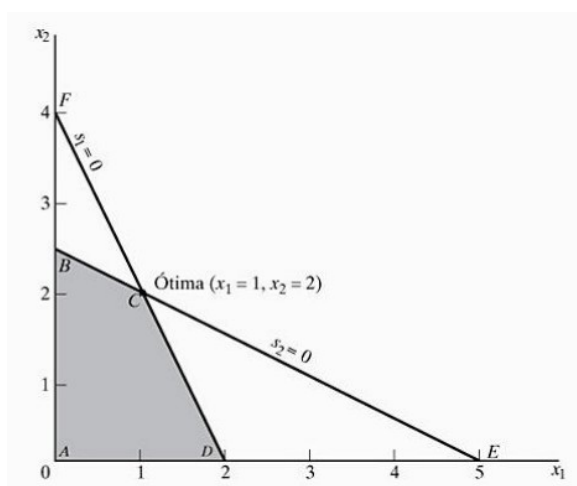
Para Taha (2008), o Método Simplex é um procedimento algébrico com interpretação geométrica. Dessa forma, o autor faz a classificação em Método Gráfico e Método Algébrico. O Método Gráfico refere-se à interpretação geométrica do Método Simplex. Este método utiliza cinco passos conforme descrito a seguir pelo Fluxograma 3.9.



*Figura 3.9. Fluxograma do Método Gráfico*

Fonte: Adaptado de Taha (2008).

Deve-se atentar para o fato de o Método Gráfico possuir limitações de uso quanto a quantidade de variáveis a serem tratadas. Problemas reais possuem várias variáveis e portanto, o Método Gráfico torna-se ineficaz para estes casos. O Método Gráfico é bastante útil para efeito didático. Por outro lado, existe o Método Algébrico, o qual permite o tratamento de várias variáveis simultaneamente. O Método Gráfico de solução pode ser observado na Figura 3.10.



*Figura 3.10. Solução ótima do Método Gráfico*

Fonte: Taha (2008).

O objetivo é encontrar a solução ótima para um problema de programação linear com a seguinte configuração:

$$2x_1 + x_2 + s_1 = 4 \quad (3.1)$$

$$x_1 + 2x_2 + s_2 = 5 \quad (3.2)$$

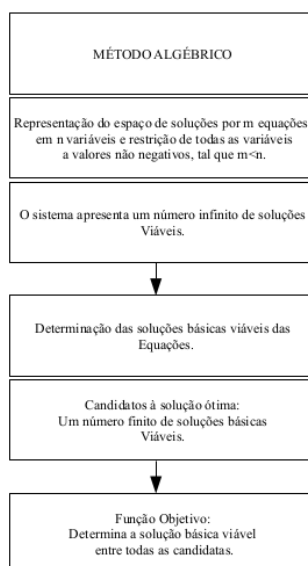
$$x_1, x_2, s_1, s_2 \geq 0 \quad (3.3)$$

Trata-se de um sistema composto pelas equações 3.1, 3.2 e 3.3. Neste sistema constam as variáveis  $x$  e  $s$ . Elas podem representar por exemplo a quantidade de insumos necessários à fabricação de um



produto. Todas essas variáveis  $x$  e  $s$  são positivas e podem assumir o valor zero, ou seja, eu posso zerar o meu estoque de determinado insumo utilizado na fabricação do produto. Esta condição de variáveis  $x$  e  $s$  positivas que podem assumir o valor zero é uma restrição do problema, o que significa que não é possível uma quantidade negativa de determinado insumo. É possível observar no gráfico da Figura 3.1 as retas que representam as equações do sistema formado pelas Equações 3.1, 3.2 e 3.3 e a delimitação da região viável quanto às restrições de não negatividade para as variáveis. Logo o ponto de intersecção entre as retas das equações e que ao mesmo tempo respeita as restrições de não negatividade das variáveis é a solução ótima para o problema de programação linear.

O Fluxograma 3.11 apresenta os principais passos do procedimento algébrico do Método Simplex, o qual foi implementado para esta tese. Quanto à análise de sensibilidade do Método Simplex, sabe-se que os dados de entrada podem variar dentro de certos intervalos sem ocasionar mudanças na solução ótima. Para trabalhar a análise de sensibilidade, utiliza-se a análise pós-ótima. A análise pós-ótima refere-se à determinação da nova solução ótima decorrente de mudanças intencionais e calibradas nos parâmetros de entrada do modelo. Assim, por meio da análise de sensibilidade pode-se avaliar o impacto dessa incerteza sobre a qualidade da solução ótima obtida. Estas análises foram feitas para esta tese.



*Figura 3.11. Fluxograma do Método Algébrico*

Fonte: Adaptado de Taha (2008).

Assim, a última abordagem para o problema desta tese foi o funcionário realiza tarefas de manutenção em máquinas, mas não somente a rota. Foram utilizadas as rotas ótimas encontradas na

primeira parte do trabalho por meio dos problemas de roteamento para a modelagem do Problema de Designação. Dessa forma, como cada máquina é designada a um funcionário, este problema pode ser modelado como um Problema de Designação. O Problema de Designação pode ser definido como um problema de alocação de funcionários às tarefas de inspeção por meio da otimização. Após a obtenção de doses equilibradas, passou-se a aplicabilidade do sistema desenvolvido nesta tese em uma planta real.

## CAPÍTULO IV

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com as simulações iniciais e os resultados obtidos com a modelagem do problema como um Problema de Designação, ou seja, como o funcionário realiza tarefas de manutenção e não somente a rota, cada máquina deve ser designada a um funcionário de forma eficiente.

As modelagens como problema de roteamento, seja como um PCV, Problema do Caixeiro Viajante ou como um PRV, Problema de Roteamento de Veículos não contemplam o equilíbrio das doses dos funcionários, além de minimizá-las.

Os problemas de roteamento minimizam a dose total, não tratam o equilíbrio das doses dos funcionários. Devido a essa necessidade de equilíbrio das doses foi implementado o Problema de Designação.

### 4.1. SIMULAÇÕES INICIAIS

Utilizou-se os dados de uma unidade industrial de geração e distribuição de vapor, cuja função principal é a geração de energia, acionando turbos geradores e/ou alimentação de turbo bombas e turbo compressores e preaquecimento de produtos.

Oliveira Filho (2011) utilizou dois métodos diferentes para o cômputo dos tempos de exposição.

No método 1, faz-se uso de dados obtidos em trabalhos realizados pelo LAV, Laboratório de Acústica e Vibrações da FEMEC, Faculdade de Engenharia Mecânica, da UFU, Universidade Federal de Uberlândia em várias indústrias. Ele inseri manualmente o tempo médio estimado para cada operação.

No método 2, Oliveira Filho (2011) adota um procedimento de estimativa de tempo de permanência em cada ponto por meio do treinamento de uma rede neural probabilística, RNP. Além dos dois métodos de cálculo para o tempo de permanência por máquina.

O modelo é uma planta simplificada conforme mapa da Figura 4.1. Essa planta simplificada é composta por um biombo de operação, 3 motocompressores, 6 motobombas e um turbo expensor.

Ponto	Tempo	Ponto	Tempo
1 – Biombo	373	7 – Turbo expansor	21
2 – Motobomba 1	7	8 – Motocompressor 2	11
3 – Motobomba 2	7	9 – Motobomba 5	7
4 – Motobomba 3	7	10 – Motobomba 6	7
5 – Motocompressor 1	11	11 – Motocompressor 3	11
6 – Motobomba 4	7	Deslocamento	11

*Tabela 4.1. Tempo de permanência planta simplificada pelo Método 1*

Fonte: Oliveira Filho (2011).

Para a planta simplificada, Oliveira Filho fez uso dos dois métodos para o cálculo de permanência nas máquinas. As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam o tempo estimado pelo Método 1 e pelo Método 2 para a planta industrial simplificada.

O segundo modelo é composto por uma planta industrial de área maior composta por sala de operações, área dos compressores, torre de refrigeração, caldeira, desaerador, prédio das turbomáquinas (térreo, 1º piso e 2º piso) e parque de bombas.

Ponto	Método 2 (minutos)
1 – Biombo	256,18
2 – Motobomba 1	2
3 – Motobomba 2	1
4 – Motobomba 3	1
5 – Motocompressor 1	2,5
6 – Motobomba 4	1
7 – Turbo expansor	1
8 – Motocompressor 2	2,5
9 – Motobomba 5	1
10 – Motobomba 6	1
11 – Motocompressor 3	2,5

*Tabela 4.2. Método 2 para cálculo do tempo de permanência planta simplificada*

Fonte: Oliveira Filho (2011).

Nesta tese utilizou-se os tempos estimados pelo método 1 de Oliveira Filho, pois este método proporciona valores condizentes com a realidade de plantas industriais para uma validação adequada do método desenvolvido.

A planta industrial de geração de energia e vapor pode ser observada no mapa da Figura 4.1. Neste mapa é possível observar cada ponto de inspeção e o seu respectivo valor de NPS, Nível de Pressão Sonora e o tempo de exposição no ponto em horas calculados pelo método 2 de Oliveira Filho. O ponto Biombo representa o biombo de operação, onde são feitas reuniões, planejamento e controle. Os pontos 1, 2, 3, 5, 8 e 9 referem-se a motobombas. Os pontos 4, 7 e 10 são motocompressores. O ponto 6 é constituído por um turbo expensor.

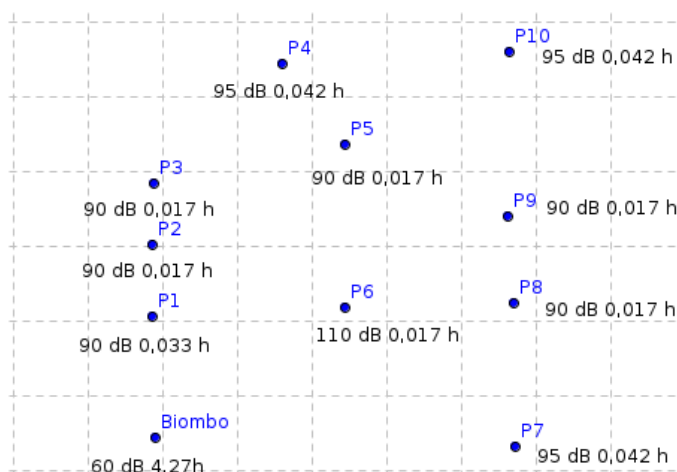


Figura 4.1. Mapa da Planta de Geração de Energia

Fonte: Autoria Própria.

Os valores usuais de exposição da rota do funcionário antes do processo de otimização podem ser observados na Tabela 4.3.

Rota	1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 9 → 10 → 1
Distância	136 m
Dose	0,41
TWA	74,3

Tabela 4.3. Valores usuais da rota antes da otimização

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.2. PCV CONSIDERANDO TWA

O resultado da simulação do PCV para a variável TWA pode ser observado na Tabela 4.4. Foram necessárias um total de 483 iterações em um tempo computacional de 0,06 s. A rota encontrada para o funcionário nesta simulação foi 1, 3, 2, 4, 5, 9, 7, 8, 6 e 10. A tolerância refere-se a um valor tolerado para o valor da função objetivo, ou seja, o TWA.

Quantidade de iterações	483
Rota	1 → 3 → 2 → 4 → 5 → 9 → 7 → 8 → 6 → 10 → 1
TWA	74,9
Tempo de processamento	0,06 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.4. Resultados experimentais para TWA*

Fonte: Autoria Própria.

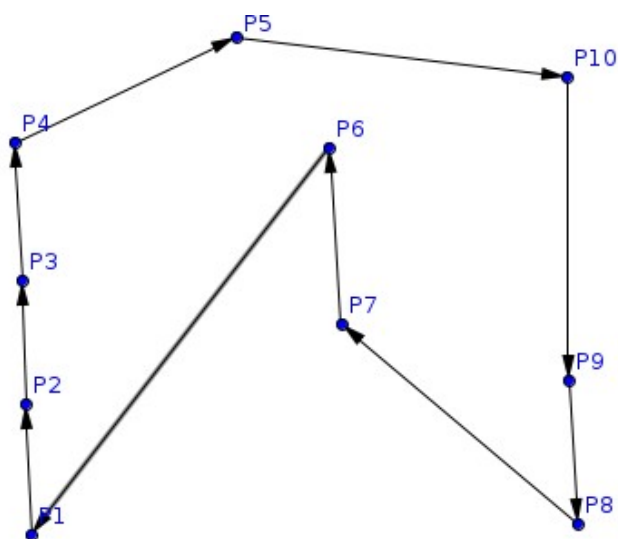
#### 4.3. PCV CONSIDERANDO A DISTÂNCIA TOTAL PERCORRIDA

Como continuidade desta pesquisa, desenvolveu-se um novo modelo de forma a considerar o caminho mínimo ao invés do ruído para o roteamento e realizar a comparação dos resultados. A partir do pressuposto de que quanto menor o caminho que o funcionário fizer, menor será a exposição ao ruído, utilizou-se a modelagem por problema de caminho mínimo. Dessa forma, em vez de otimizar TWA, utilizou-se neste caso minimizar a distância percorrida pelo funcionário. O cálculo das distâncias foi feito com base no mapa de Oliveira Filho (2011).

Quantidade de iterações	281
Rota	1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 10 → 9 → 8 → 7 → 6 → 1
FO	76 m
Tempo de processamento	0,05 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.5. Resultados para o modelo de caminho mínimo*

Fonte: Autoria Própria.



*Figura 4.2. Grafo do Modelo de Caminho Mínimo*

Fonte: Autoria Própria.

O resultado do trabalho foi a partir das distâncias percorridas pelo funcionário obter a rota com menor distância e, por conseguinte, com menos exposição ao ruído. Essa rota foi ponto 1, ponto 2, ponto 3, ponto 4, ponto 5, ponto 10, ponto 9, ponto 8, ponto 7, ponto 6, ponto 1.

Para este modelo, foi encontrada uma função objetivo de valor 76 metros, aproximadamente conforme Tabela 4.5. Esta rota coincide com a rota encontrada por Oliveira Filho (2011).

Um grafo que ilustra o roteamento pode ser observado na Figura 4.2. Dessa forma, foi possível obter uma rota que minimizasse a distância total percorrida pelo funcionário da planta industrial.

É possível observar na Tabela 4.5 que foram necessárias 281 iterações, num tempo de processamento de 0,05 segundos, com uma tolerância de 1,00e-04.

#### **4.4. PCV CONSIDERANDO A DOSIMETRIA**

Procedeu-se a simulação de otimização da dosimetria para a planta industrial de Oliveira Filho (2011). Apresenta-se os resultados obtidos na Tabela 4.6.

Quantidade de iterações	483
Rota funcionário	1 → 3 → 2 → 4 → 5 → 9 → 7 → 8 → 6 → 10 → 1
Dose funcionário	0,40
TWA	74,9
Tempo de processamento	0,06 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.6. Resultados Modelo PCV Dosimetria*

Fonte: Autoria Própria.

Nota-se que foram necessárias um total de 483 iterações, a rota obtida ponto 1, ponto 3, ponto 2, ponto 4, ponto 5, ponto 9, ponto 7, ponto 8, ponto 6 e ponto 10. A dose encontrada foi 0,40 e um TWA 74,9. O problema foi resolvido em aproximadamente 0,06 s.

#### 4.5. PRV CONSIDERANDO TWA

Realizou-se a simulação do PRV considerando a variável TWA. Os resultados desta modelagem podem ser observados na Tabela 4.7. Foram necessárias 439 iterações, obteve-se as rotas para os funcionários 0 e 1, respectivamente, ponto 1, ponto 2, ponto 6, ponto 7, ponto 10, ponto 8, ponto 1 e ponto 1, ponto 4, ponto 3, ponto 5, ponto 9, ponto 1. Os valores de TWA para os funcionários 0 e 1 foram, respectivamente 68,9 e 71,0. O tempo de processamento foi de 0,06 s aproximadamente.

Quantidade de iterações	439
Rota funcionário 0	1 → 2 → 6 → 7 → 10 → 8 → 1
Rota funcionário 1	1 → 4 → 3 → 5 → 9 → 1
TWA funcionário 0	68,9
TWA funcionário 1	71,0
Tempo de processamento	0,06 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.7. Resultados experimentais para TWA*

Fonte: Autoria Própria.



#### 4.6. PRV CONSIDERANDO A DISTÂNCIA TOTAL PERCORRIDA

Nesta seção será estudada a modelagem como um PRV, Problema de Roteamento de Veículos, ou seja, utiliza-se a alocação de dois funcionários, com o objetivo de minimizar a função objetivo, que no caso é a distância total percorrida por ambos. Na Tabela 4.8 observa-se os resultados para a modelagem do problema como um PRV considerando a distância total percorrida. A FO é a função objetivo da distância percorrida.

Quantidade de iterações	149
FO	108 m
Rota funcionário 0	1 → 7 → 6 → 4 → 3 → 2 → 1
Distância percorrida funcionário 0	42 m
Distância percorrida funcionário 1	66 m
Rota funcionário 1	1 → 8 → 9 → 10 → 11 → 5 → 1
Tempo de processamento	0,91 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.8. Resultados para o modelo de caminho mínimo*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.7. PRV CONSIDERANDO A DOSIMETRIA

Na Tabela 4.9, pode-se observar os resultados da modelagem como PRV.

Quantidade de iterações	439
Rota funcionário 0	1 → 2 → 6 → 7 → 10 → 8 → 1
Rota funcionário 1	1 → 4 → 3 → 5 → 9 → 1
FO Dose	0,39
Dose funcionário 0	0,17
Dose funcionário 1	0,23
TWA funcionário 0	68,9
TWA funcionário 1	71,0
Tempo de processamento	0,06 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.9. Resultados Modelo PRV Dosimetria*

Fonte: Autoria Própria.

Nota-se que as doses encontradas para os funcionários 0 e 1 foram respectivamente, 0,17 e 0,23. Ambos os valores encontra-se adequados com relação à legislação trabalhista, Normas Regulamentadoras. Os valores de dose estão abaixo do valor de 1 unidade, o que demonstra adequação do ponto de vista acústico.

#### 4.8. PCV COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE SOFTWARES

O LINGO é um software comercial de otimização. Com o objetivo de verificar as soluções obtidas pelo GUROBI, realizou-se um comparativo de desempenho entre os *softwares* de otimização GUROBI e LINGO para os dados da planta industrial de geração de energia na modelagem do problema como um PCV – Problema do Caixeiro Viajante. Na Tabela 6.10, pode-se observar os resultados obtidos. A instância 1 de testes refere-se a otimização do TWA, a instância 2 refere-se a otimização da distância total percorrida e a instância 3 trata da otimização da dosimetria, com os valores de TWA para as doses encontradas.

Instância		GUROBI	LINGO
1	FO	74,9	74,9
	Tempo (s)	0,06	0,8
	Rotas	1 → 3 → 2 → 4 → 5 → 9 → 7 → 8 → 6 → 10	1 → 3 → 2 → 4 → 5 → 9 → 7 → 8 → 6 → 10
2	FO	76 m	76 m
	Tempo (s)	0,11	0,91
	Rotas	6 → 7 → 8 → 9 → 10 → 5 → 4 → 3 → 2 → 1	6 → 7 → 8 → 9 → 10 → 5 → 4 → 3 → 2 → 1
3	FO	0,40 / 74,9	0,40 / 74,9
	Tempo (s)	0,06	0,72
	Rotas	1 → 3 → 2 → 4 → 5 → 9 → 7 → 8 → 6 → 10	6 → 7 → 8 → 9 → 10 → 5 → 4 → 3 → 2 → 1

Tabela 4.10. Comparativo desempenho softwares – PCV

Fonte: Autoria Própria.

A FO da instância 1 de testes refere-se a função objetivo do TWA, a FO da instância 2

refere-se a função objetivo da distância total percorrida e a FO da instância 3 trata da função objetivo da dose, com os valores de TWA para as doses encontradas.

#### 4.9. PRV COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE SOFTWARES

De mesma forma, realizou-se um comparativo de desempenho entre os *softwares* de otimização GUROBI e LINGO para os dados da planta industrial de geração de energia na modelagem do problema como um PRV – Problema de Roteamento de Veículos com os tempos estimados por Oliveira Filho (2011) em seu método 1. Pode-se observar os resultados na Tabela 4.11. Considerou-se a instância 1 de testes como a otimização do TWA, a instância 2 a otimização da distância total percorrida e a instância 3 trata da otimização da dosimetria, com os valores das doses encontradas e os referentes valores de TWA. Observa-se para todas as simulações comparativas que o software LINGO apresentou um tempo de processamento superior ao software GUROBI. Dessa forma, observa-se uma diferença de até 13 vezes o tempo computacional. O software GUROBI é mais indicado para o uso de problemas com instâncias maiores, problemas reais. Por outro lado, o software LINGO pode ser utilizado para ensino, com fins didáticos.

<b>Instância</b>		<b>GUROBI</b>	<b>LINGO</b>
1	FO	68,9 / 71,0	68,9 / 71,0
	Tempo (s)	0,06	0,78
	Funcionário 0	1 → 2 → 6 → 7 → 10 → 8 → 1 TWA 68,9	1 → 2 → 6 → 7 → 10 → 8 → 1 TWA 68,9
	Funcionário 1	1 → 4 → 3 → 5 → 9 → 1 TWA 71,0	1 → 4 → 3 → 5 → 9 → 1 TWA 71,0
2	FO	108 m	108 m
	Tempo (s)	0,91	3,78
	Funcionário 0	1 → 7 → 6 → 4 → 3 → 2 → 1 Distância 42 m	1 → 7 → 6 → 4 → 3 → 2 → 1 Distância 42 m
	Funcionário 1	1 → 8 → 9 → 10 → 11 → 5 → 1 Distância 66 m	1 → 8 → 9 → 10 → 11 → 5 → 1 Distância 66 m
3	FO	0,39	0,39

Tempo (s)	0,06	0,84
Funcionário 0	1 → 2 → 6 → 7 → 10 → 8 → 1 Dose 0,17 TWA 68,9	1 → 2 → 6 → 7 → 10 → 8 → 1 Dose 0,17 TWA 68,9
Funcionário 1	1 → 4 → 3 → 5 → 9 → 1 Dose 0,23 TWA 71,0	1 → 4 → 3 → 5 → 9 → 1 Dose 0,23 TWA 71,0

Tabela 4.11. Comparativo desempenho softwares – PRV

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.10. PRV DOIS FATORES – DOSE 80%, DISTÂNCIA 20% E CAPACIDADE 5

Oliveira Filho (2011) calculou o tempo para permanência em cada ponto da rota da planta industrial de duas formas conforme explicado no Capítulo 6 desta tese. Tendo em vista isso, serão apresentados os resultados com base no tempo estimado por ponto de inspeção do método 1 de cômputo de Oliveira Filho (2011).

A modelagem do problema como um Problema de Roteamento de Veículos – PRV para dois fatores, dose e distância conforme Equações do Sistema 4.1. Nesta modelagem, utilizou-se a proporção 80% de peso para a dose e 20% de peso para o fator distância na função objetivo.

$$\begin{aligned}
 & \text{minimizar} \sum_{i \in \text{maquinas}} \sum_{j \in \text{maquinas}} (pesodose_{ij} dose_{ij} + pesodistancia_{ij} distancia_{ij}) x_{ij} \\
 & \sum_{j \in \text{maquinas}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \text{maquinas} | i \neq 1 \\
 & \sum_{i \in \text{maquinas}} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \text{maquinas} | j \neq 1 \\
 & \sum_{i \in \text{maquinas}} f_{ij} - \sum_{i \in \text{maquinas}} f_{ji} = demanda \quad \forall j \in \text{maquinas} | j \neq 1 \\
 & \sum_{j \in \text{maquinas}} x_{1j} = \sum_{j \in \text{maquinas}} x_{j1} \\
 & f_{ij} \leq x_{ij} capacidade \quad \forall i, j \in \text{maquinas} \\
 & x_{ij} \in 0,1 \quad \forall i, j \in \text{maquinas} \\
 & f_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in \text{maquinas}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

A Equação 4.1 apresenta a função objetivo utilizando o método da soma ponderada, após a normalização dos fatores. Os fatores utilizados são a dose e a distância percorrida. Cada um

destes fatores apresenta um peso na equação.

Na Tabela 4.12 apresenta-se os resultados obtidos com a modelagem do problema como um Problema de Roteamento de Veículos – PRV para dois fatores, dose e distância segundo as Equações do Sistema 4.2 e fator de capacidade 5 de atendimento para cada funcionário, ou seja, cada funcionário pode inspecionar até 5 máquinas, ou seja, 5 pontos da rota. Considerou-se a proporção 80% de peso para a dose e 20% de peso para o fator distância na função objetivo.

Quantidade de iterações	3843
Rota funcionário 0	1 → 2 → 7 → 6 → 4 → 3 → 1
Rota funcionário 1	1 → 8 → 9 → 10 → 11 → 5 → 1
Distância funcionário 0	42 m
Distância funcionário 1	66 m
Dose funcionário 0	0,28
Dose funcionário 1	0,29
TWA funcionário 0	72,1
TWA funcionário 1	72,4
Tempo de processamento	0,46 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.12. Resultados PRV: 80% dose 20% distância*

Fonte: Autoria Própria.

#### **4.11. PRV DOIS FATORES – DOSE 20%, DISTÂNCIA 80% E CAPACIDADE 5**

Realizou-se a modelagem do problema como um Problema de Roteamento de Veículos – PRV para dois fatores, dose e distância segundo a proporção 20% de peso para a dose e 80% de peso para o fator distância na função objetivo.

A Tabela 4.13 mostra os principais resultados obtidos da proporção 20% de peso para a dose e 80% de peso para o fator distância na função objetivo, conforme o Sistema de Equações 2.2 do modelo e fator de capacidade 5.

Quantidade de iterações	6090
Rota funcionário 0	1 → 3 → 4 → 6 → 7 → 2 → 1
Rota funcionário 1	1 → 5 → 11 → 10 → 9 → 8 → 1
Distância funcionário 0	42 m
Distância funcionário 1	66 m
Dose funcionário 0	0.28
Dose funcionário 1	0.29
TWA funcionário 0	72,1
TWA funcionário 1	72,3
Tempo de processamento	0.51 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.13. Resultados PRV: 20% dose 80% distância*

Fonte: Autoria Própria.

#### **4.12. PRV DOIS FATORES – DOSE 10%, DISTÂNCIA 90% E CAPACIDADE 5**

A modelagem do problema como um Problema de Roteamento de Veículos – PRV para dois fatores, dose e distância segundo a proporção 10% de peso para a dose e 90% de peso para o fator distância na função objetivo conforme Sistema de Equações 4.1 do modelo.

A Tabela 4.14 mostra os principais resultados obtidos da proporção 10% de peso para a dose e 90% de peso para o fator distância na função objetivo e fator de capacidade de atendimento de 5.

Observa-se pela análise dos resultados que houve um equilíbrio entre as doses dos funcionários, respectivamente, 0,28 e 0,29. Foram necessárias 6953 iterações e um tempo de processamento para resolver este problema específico de 0,38 segundos.

Quantidade de iterações	6953
Rota funcionário 0	1 → 3 → 4 → 6 → 7 → 2 → 1
Rota funcionário 1	1 → 8 → 9 → 10 → 11 → 5 → 1
Distância funcionário 0	42 m
Distância funcionário 1	66 m
Dose funcionário 0	0,28
Dose funcionário 1	0,29
TWA funcionário 0	72,1
TWA funcionário 1	72,3
Tempo de processamento	0,38 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.14. Resultados PRV: 10% dose 90% distância*

Fonte: Autoria Própria.

#### **4.13. PRV DOIS FATORES – DOSE 80%, DISTÂNCIA 20% E CAPACIDADE 6**

Implementou-se a modelagem do problema como um Problema de Roteamento de Veículos – PRV para dois fatores, dose e distância segundo a proporção 80% de peso para a dose e 20% de peso para o fator distância na função objetivo conforme Sistema de Equações 4.2 do modelo. A alteração deste modelo foi a atribuição de capacidade 6 máquinas para cada funcionário, em vez de 5 máquinas para cada funcionário como nos testes anteriores.

A Tabela 4.15 mostra os principais resultados obtidos da proporção 80% de peso para a dose, 20% de peso para o fator distância na função objetivo e capacidade de atendimento de 6 máquinas para cada funcionário.

Nesta simulação os resultados de dose não se encontram tão equilibrados quanto na simulação anterior, pois os valores são, respectivamente, 0,25 e 0,32. Dessa forma, é necessário maior esforço em simulações para alcançar-se o equilíbrio entre as doses dos funcionários.

Quantidade de iterações	6325
Rota funcionário 0	1 → 4 → 3 → 7 → 2 → 1
Rota funcionário 1	1 → 5 → 6 → 11 → 10 → 9 → 8 → 1
Distância funcionário 0	36 m
Distância funcionário 1	70 m
Dose funcionário 0	0,25
Dose funcionário 1	0,32
TWA funcionário 0	71,3
TWA funcionário 1	73,1
Tempo de processamento	0,52 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.15. Resultados PRV: 80% dose 20% distância capacidade 6*

Fonte: Autoria Própria.

#### **4.14. PRV DOIS FATORES – DOSE 80%, DISTÂNCIA 20% E CAPACIDADE 7**

A modelagem do problema como um Problema de Roteamento de Veículos – PRV para dois fatores, dose e distância segundo a proporção 80% de peso para a dose e 20% de peso para o fator distância na função objetivo conforme Sistema de Equações 4.1 do modelo. A alteração deste modelo foi a atribuição de capacidade 7 máquinas para cada funcionário, em vez de 6 ou 5 máquinas para cada funcionário como nos testes anteriores.

A Tabela 4.16 mostra os principais resultados obtidos da proporção 80% de peso para a dose, 20% de peso para o fator distância na função objetivo e capacidade de atendimento de 7 máquinas para cada funcionário.

Pela análise da Tabela 4.16 observa-se que o equilíbrio entre as doses dos funcionários não está adequado. Um dos funcionários apresenta um valor de dose 84% superior ao valor de dose do outro funcionário. Além disso, o valor de dose do funcionário 1 está acima do limite permitido pela legislação brasileira.



Quantidade de iterações	3644
Rota funcionário 0	1 → 2 → 3 → 4 → 1
Rota funcionário 1	1 → 8 → 9 → 10 → 11 → 5 → 6 → 7 → 1
Distância funcionário 0	20 m
Distância funcionário 1	74 m
Dose funcionário 0	0,27
Dose funcionário 1	1,63
TWA funcionário 0	71,8
TWA funcionário 1	84,8
Tempo de processamento	0,33 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.16. Resultados PRV: 80% dose 20% distância capacidade 7*

Fonte: Autoria Própria.

#### **4.15. PRV TRÊS FATORES – DOSE 30%, DISTÂNCIA 30%, TWA 30% E CAPACIDADE 5**

Nesta modelagem como um Problema de Roteamento de Veículos – PRV utiliza-se três fatores, dose, distância e TWA segundo a proporção 30% de peso para a dose, 30% de peso para o fator distância e 30% para TWA na função objetivo.

Quantidade de iterações	6328
Rota funcionário 0	1 → 2 → 7 → 6 → 4 → 3 → 1
Rota funcionário 1	1 → 5 → 11 → 10 → 9 → 8 → 1
Distância funcionário 0	42 m
Distância funcionário 1	66 m
Dose funcionário 0	0,28
Dose funcionário 1	0,29
TWA funcionário 0	72,1
TWA funcionário 1	72,3
Tempo de processamento	0,37 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.17. Resultados PRV: 30% dose 30% distância 30% TWA*

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 4.17 mostra os principais resultados obtidos da proporção 30% de peso para a dose, 30% de peso para o fator distância e 30% para TWA na função objetivo e capacidade de atendimento de 5 máquinas para cada funcionário, conforme Sistema de Equações 4.1 do modelo. Adotou-se a capacidade de 5 máquinas para cada funcionário.

Nota-se na Tabela 4.17 que os valores de dose estão equilibrados, respectivamente 0,28 e 0,29 e dentro dos limites legais para uma jornada de trabalho de 8 horas estabelecidos pela legislação brasileira.

#### 4.16. PRV TRÊS FATORES – DOSE 80%, DISTÂNCIA 10%, TWA 10% E CAPACIDADE 5

Apresenta-se a modelagem do problema como um Problema de Roteamento de Veículos – PRV para três fatores, dose, distância e exposição sonora segundo a proporção 80% de peso para a dose, 10% de peso para o fator distância e 10% para a exposição sonora na função objetivo conforme Sistema de Equações 4.1 do modelo. Utilizou-se a capacidade de atendimento de 5 máquinas para cada funcionário.

A Tabela 4.18 mostra os principais resultados obtidos da proporção 80% de peso para a dose, 10% de peso para o fator distância e 10% para TWA na função objetivo e capacidade de atendimento de 5 máquinas para cada funcionário.

Quantidade de iterações	3074
Rota funcionário 0	1 → 2 → 7 → 5 → 4 → 3 → 1
Rota funcionário 1	1 → 8 → 9 → 10 → 11 → 6 → 1
Distância funcionário 0	50 m
Distância funcionário 1	62 m
Dose funcionário 0	0,28
Dose funcionário 1	0,22
TWA funcionário 0	72,1
TWA funcionário 1	70,4
Tempo de processamento	0,31 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.18. Resultados PRV: 80% dose 10% distância 10% TWA*

Fonte: Autoria Própria.

Ao analisar-se a Tabela 4.18 observa-se que os valores de dose apresentam uma diferença de 22% entre os valores de dose. Este equilíbrio entre as doses dos funcionários pode ser aprimorado nas próximas simulações.

#### 4.17. PRV TRÊS FATORES – DOSE 80%, DISTÂNCIA 10%, TWA 10% E CAPACIDADE 7

Foi feita a modelagem do problema como um Problema de Roteamento de Veículos – PRV para três fatores, dose, distância e TWA segundo a proporção 80% de peso para a dose, 10% de peso para o fator distância e 10% para TWA na função objetivo conforme Sistema de Equações 3.1 do modelo. Utilizou-se a capacidade de 7 máquinas para cada funcionário.

A Tabela 4.19 mostra os principais resultados obtidos da proporção 80% de peso para a dose, 10% de peso para o fator distância e 10% para TWA na função objetivo e capacidade de atendimento de 7 máquinas para cada funcionário.

Quantidade de iterações	37506
Rota funcionário 0	1 → 3 → 7 → 2 → 1
Rota funcionário 1	1 → 8 → 9 → 10 → 11 → 6 → 5 → 4 → 1
Distância funcionário 0	30 m
Distância funcionário 1	70 m
Dose funcionário 0	0,15
Dose funcionário 1	0,33
TWA funcionário 0	67,3
TWA funcionário 1	73,3
Tempo de processamento	1,06 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.19. Resultados PRV: 80% dose 10% distância 10% TWA e capacidade 7*

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 4.19 observa-se um total de 37506 iterações para resolver o problema específico. Entretanto, o tempo de processamento para solucionar este problema em especial foi de aproximadamente 1,06 segundos.

#### 4.18. PD – PROBLEMA DE DESIGNAÇÃO

Realizou-se a modelagem como um Problema de Designação para obter uma alocação eficiente dos funcionários às tarefas de manutenção a ser executadas, com o objetivo do equilíbrio das doses entre os funcionários. Para tal utilizou-se o modelo matemático do Sistema 4.2. Maiores detalhes a respeito desta formulação podem ser obtidos no Capítulo 2 desta tese.

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \\
 & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \\
 & \sum_{i=1}^m a_{ij} x_{ij} \leq \text{dose máxima} \quad \forall j \\
 & x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

Com base nos resultados obtidos pelos algoritmos de roteamento, foram utilizadas as rotas ótimas como base para a designação de tarefas pelo algoritmo para cada funcionário. Os resultados da modelagem como um Problema de Designação podem ser observados na Tabela 6.1.

A Tabela 4.20 mostra os principais resultados obtidos com a modelagem do Problema de Designação, cujo objetivo é garantir o equilíbrio das doses entre os funcionários. Observa-se doses equivalentes para os funcionários 0 e 1, respectivamente, 0,18 e 0,18. Portanto, os objetivos de minimizar as doses dos funcionários foram alcançados, além de obter o equilíbrio entre as doses dos mesmos.

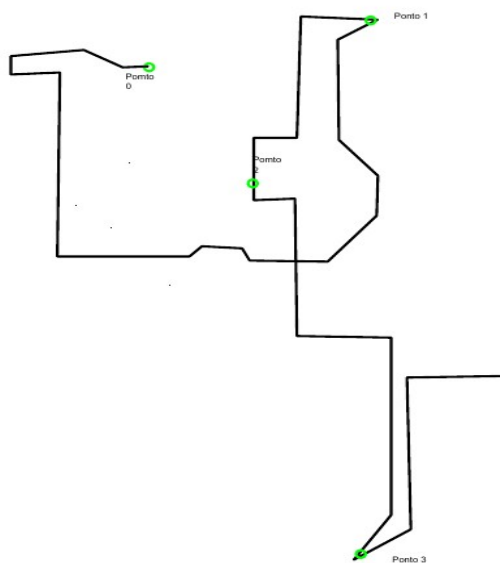
Rota funcionário 0	2 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 9 → 11
Rota funcionário 1	1 → 3
Dose funcionário 0	0,18
Dose funcionário 1	0,18
TWA funcionário 0	68,9
TWA funcionário 1	68,9
Tempo de processamento	1 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.20. Resultados PD: alocação de tarefas para dois funcionários*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.19. PRV E PD – PLANTA REAL

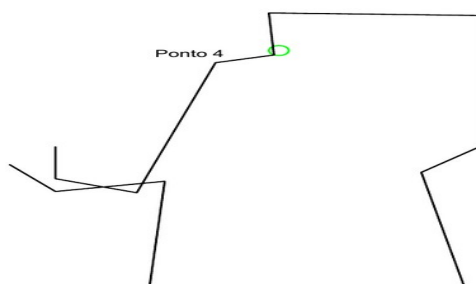
Realizou-se a implementação do sistema de otimização desenvolvido nesta tese em uma planta real, a qual não será apresentada devido à confidencialidade de dados industriais. Serão discutidos os métodos utilizados, a implementação e os resultados obtidos. A planta real é composta por 13 pisos e 55 equipamentos para manutenção. O piso 1 é composto pela sala de reuniões, na qual os dois funcionários que fazem a manutenção dos 55 equipamentos da planta recebem as instruções e informações diárias antes de iniciar a rotina de manutenção e 3 equipamentos para manutenção. A manutenção dos equipamentos da planta real é realizada por dois funcionários. A Figura 4.1 apresenta um esquema simplificado do piso 1 da planta real. O piso é composto pelos equipamentos 1-M representado pelo Ponto 1, 2-M Ponto 2 e 3-M Ponto 3 e sala de reuniões, Ponto 0. Foi considerada uma jornada de 8 horas para os dois funcionários, com uma hora de intervalo.



*Figura 4.3. Esquema simplificado piso 1 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

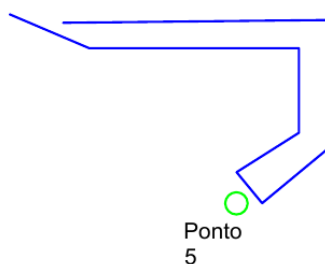
Na Figura 4.4 pode-se observar o piso 2 da planta real. O piso 2 é composto pelo equipamento 4-M representado pelo Ponto 4. Pode-se observar a trajetória percorrida pelo funcionário designado ao equipamento 4-M.



*Figura 4.4. Esquema simplificado piso 2 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

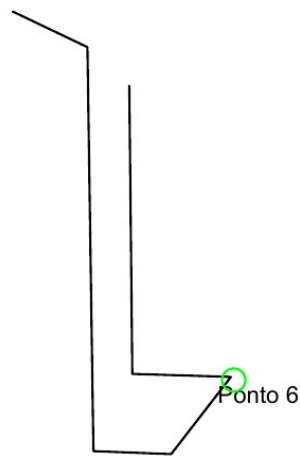
A Figura 4.5 apresenta o 3º piso da planta real. Este piso é constituído somente pelo equipamento 5-M, representado pelo Ponto 5.



*Figura 4.5. Esquema simplificado piso 3 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

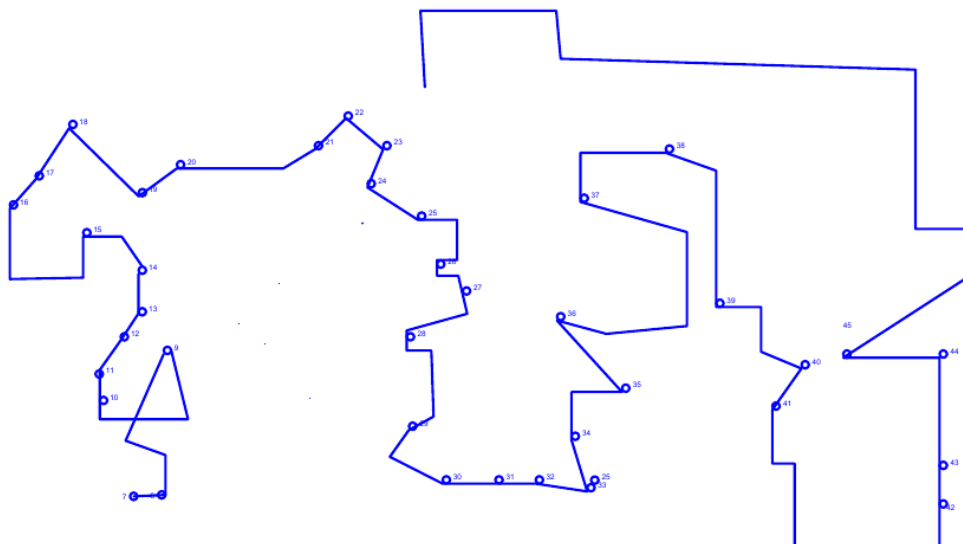
É possível observar o piso 4 da planta real na Figura 4.6. O piso 4 é composto apenas pelo equipamento 6-M, representado pelo Ponto 6.



*Figura 4.6. Esquema simplificado piso 4 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

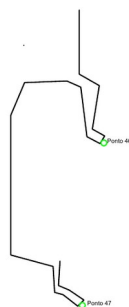
A Figura 4.7 apresenta o 5º piso da planta real. Este piso é composto pelos equipamentos em sequência de numeração 7-M até o equipamento 45-M, representados, respectivamente pelos Pontos 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45. Dessa forma, o piso 5 possui um total de 39 equipamentos para manutenção.



*Figura 4.7. Esquema simplificado piso 5 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

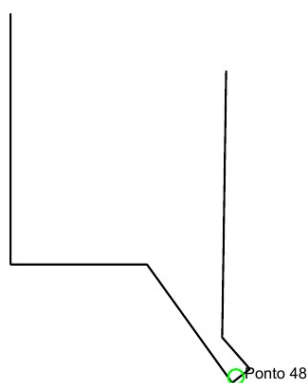
A Figura 4.8 apresenta o esquema simplificado do piso 6 da planta real. O piso 6 é constituído pelos equipamentos 46-M e 47-M, respectivamente representados pelos Pontos 46 e 47. Pode-se observar a trajetória percorrida pelo funcionário designado às tarefas de manutenção dos equipamentos 46-M e 47-M na Figura 6.6.



*Figura 4.8. Esquema simplificado piso 6 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

É possível observar na Figura 4.9 o esquema simplificado do 7º piso da planta real. Neste esquema, apresenta-se o único equipamento para manutenção do piso 7, 48-M, representado pelo Ponto 48.



*Figura 4.9. Esquema simplificado piso 7 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 4.10 apresenta o 8º piso da planta real. O 8º piso é constituído pelos equipamentos para manutenção de números 49-M e 50-M, representados respectivamente pelos Pontos 49 e 50.

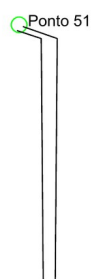




*Figura 4.10. Esquema simplificado piso 8 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

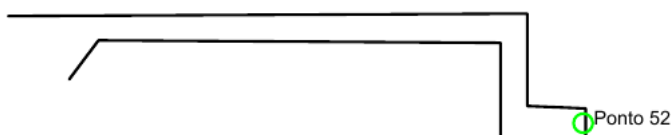
É possível observar na Figura 4.11 o esquema simplificado do 9º piso da planta real. O piso 9 é formado somente pelo equipamento 51-M, representado pelo Ponto 51.



*Figura 4.11. Esquema simplificado piso 9 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

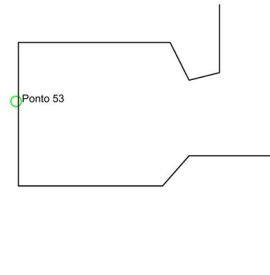
A Figura 4.12 apresenta o piso 10 da planta real. Este piso é constituído apenas pelo equipamento 52-M, representado pelo Ponto 52.



*Figura 4.12. Esquema simplificado piso 10 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

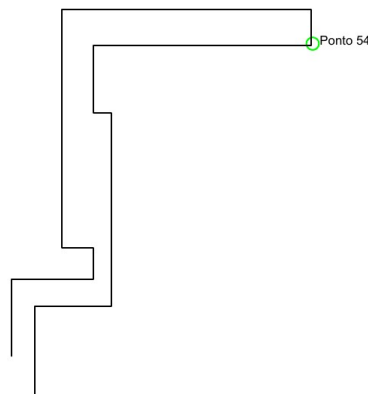
É possível observar na Figura 4.13 o piso 11 da planta real. Neste piso encontram-se o equipamento 53-M, representado no esquema simplificado pelo Ponto 53.



*Figura 4.13. Esquema simplificado piso 11 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

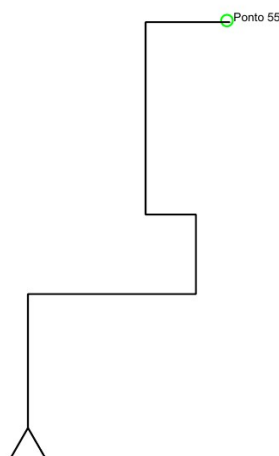
A Figura 4.14 apresenta o 12º piso da planta real. Observa-se o equipamento 54-M, representado pelo Ponto 54 e a trajetória percorrida pelo funcionário designado ao equipamento 54-M.



*Figura 4.14. Esquema simplificado piso 12 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

É possível observar na Figura 4.15 o piso 13 da planta real. Este piso é composto pelo equipamento 55-M, representado no esquema simplificado pelo Ponto 55.



*Figura 4.15. Esquema simplificado piso 13 da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 4.21 apresenta os valores de NPS, Nível de Pressão Sonora, para a sala de reuniões e os 55 equipamentos da planta real. Os valores variam entre 60,8 dB, sala de reuniões até o valor de 93,1 dB do equipamento 14-M.

A planta real possui 13 pisos. Devido à existência de múltiplos pisos, foi necessária a implementação do PRV – Problema de Roteamento de Veículos em vez do Problema de Designação. Isto deve-se ao fato de que existe um deslocamento entre os pisos no caso da planta real, o qual não havia para a planta virtual de geração de energia com um único piso. Este modelo de PRV contemplou o fator distância, o fator equilíbrio entre as doses dos funcionários e o fator variação da capacidade de atendimento do funcionário quanto a dose de exposição.

<b>Pontos da planta real</b>	<b>NPS (dB)</b>	<b>Pontos da planta real</b>	<b>NPS (dB)</b>
Sala de reuniões	60,8	28-M	87,0
1-M	84,0	29-M	87,0
2-M	86,0	30-M	86,0
3-M	83,0	31-M	86,0
4-M	87,0	32-M	86,0
5-M	82,6	33-M	85,0
6-M	83,0	34-M	86,0
7-M	77,0	35-M	86,0
8-M	77,0	36-M	89,0
9-M	87,0	37-M	86,0
10-M	82,6	38-M	85,0
11-M	82,6	39-M	86,0
12-M	87,0	40-M	86,0
13-M	87,0	41-M	86,0
14-M	93,1	42-M	60,8
15-M	87,0	43-M	60,8
16-M	83,0	44-M	60,8
17-M	87,0	45-M	83,0
18-M	82,6	46-M	86,0
19-M	87,0	47-M	85,0
20-M	87,0	48-M	85,0
21-M	87,0	49-M	60,8
22-M	86,0	50-M	60,8
23-M	87,0	51-M	84,0
24-M	87,8	52-M	83,0
25-M	90,0	53-M	84,0
26-M	90,0	54-M	78,0
27-M	90,0	55-M	79,0

*Tabela 4.21. Valores de NPS para os equipamentos da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.20. PLANTA REAL – PCV

Na Tabela 4.22 apresenta-se os resultados para a modelagem do PCV – Problema do Caixeiro Viajante para a planta real. O intuito desta simulação é mostrar a exposição caso seja alocado somente um funcionário para a inspeção de 55 equipamentos na planta real em um total de 13 pisos. Observa-se uma dose de exposição de 1,58, valor muito acima do limite de exposição de uma unidade conforme Gerges (2000). Ou seja, o funcionário estará sujeito ao desenvolvimento de uma lesão auditiva e uma PAIRO, Perda Auditiva Induzida pelo Ruído Ocupacional. O problema foi resolvido em aproximadamente 1 segundo, um total de 8.421 iterações e pode-se observar a rota do funcionário na Tabela 4.3.

Quantidade de iterações	8.421
Quantidade de equipamentos	55
Rota funcionário 0	22 → 41 → 48 → 32 → 40 → 42 → 11 → 8 → 34 → 52 → 36 → 54 → 10 → 17 → 53 → 27 → 7 → 31 → 3 → 25 → 47 → 24 → 20 → 1 → 45 → 29 → 5 → 51 → 46 → 44 → 30 → 21 → 13 → 39 → 43 → 49 → 15 → 37 → 9 → 33 → 23 → 4 → 35 → 26 → 38 → 14 → 18 → 2 → 19 → 50 → 16 → 12 → 6 → 28 →
Dose funcionário 0	1,58172
Tempo de processamento	1,0 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.22. Resultados PCV da planta real*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.21. PLANTA REAL – PRV FATOR 0,28

Na Tabela 4.23 apresenta-se os resultados para a modelagem do PRV, considerando distância, equilíbrio entre as doses e fator de capacidade de dose por funcionário de 0,28. O fator de capacidade representa o valor limite de exposição quando o funcionário estiver parado realizando a inspeção na máquina. Observa-se que para o atendimento do equilíbrio das doses entre os funcionários e para que nenhuma dose fosse superior a 1 unidade, foi necessária a alocação de 2 funcionários para a inspeção dos 55 equipamentos da planta real em seus 13 pisos. Pode-se notar um total de 3.147 iterações, tempo

de processamento de 2 segundos e um ótimo equilíbrio entre as doses, 1.27. Na Tabela 4.3 pode-se observar também as rotas para os dois funcionários.

Quantidade de iterações	3.147
Quantidade de equipamentos	55
Fator de Capacidade	0.28
Rota funcionário 0	1 → 15 → 23 → 40 → 46 → 21 → 4 → 25 → 30 → 49 → 17 → 7 → 48 → 24 → 8 → 33 → 38 → 37 → 14 → 18 → 31 → 2 → 43 → 28 → 32 → 42 → 54 → 20 → 1
Rota funcionário 1	1 → 22 → 27 → 44 → 11 → 6 → 29 → 50 → 51 → 41 → 45 → 34 → 9 → 47 → 53 → 55 → 12 → 16 → 13 → 3 → 52 → 10 → 39 → 26 → 19 → 5 → 35 → 36 → 1
Dose funcionário 0	1.27
Dose funcionário 1	1.27
Tempo de processamento	2,0 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.23. Resultados PRV da planta real com capacidade 0,28*

Fonte: Autoria Própria.

#### **4.22. PLANTA REAL - PRV FATOR 0,25**

Na Tabela 4.24 pode-se observar a modelagem do PRV para a planta real, no entanto, considerou-se distância, equilíbrio entre as doses e fator de capacidade de dose por funcionário de 0,25. Ou seja, a diferença consiste na variação do fator de capacidade de dose por funcionário. Observa-se que foram necessários 2 funcionários. Nota-se também um elevado número de iterações (411.074) comparado ao modelo anterior. Isto resultou no aumento do tempo de processamento. O modelo com fator 0,28 foi resolvido em 2 segundos, este foi resolvido em 26 segundos, ou seja, gasto de 13 vezes mais tempo de processamento. Outra informação relevante é que não houve um equilíbrio entre as doses do modelo com fator de 0,25 ao contrário do equilíbrio atingido pelo modelo de fator 0,28.

Quantidade de iterações	411.074
Quantidade de equipamentos	55
Fator de Capacidade	0,25

Rota funcionário 0	1 → 9 → 30 → 44 → 21 → 18 → 3 → 52 → 11 → 53 → 10 → 12 → 36 → 29 → 42 → 35 → 2 → 13 → 28 → 7 → 55 → 50 → 31 → 25 → 1
Rota funcionário 1	1 → 17 → 41 → 45 → 32 → 26 → 38 → 16 → 39 → 15 → 4 → 34 → 33 → 48 → 54 → 19 → 43 → 23 → 47 → 8 20 → 49 → 51 → 40 → 27 → 37 → 6 → 22 → 14 → 5 → 24 → 46 → 1
Dose funcionário 0	1.33
Dose funcionário 1	1.30
Tempo de processamento	26,0 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.24. Resultados PRV da planta real com capacidade 0.25*

Fonte: Autoria Própria.

#### **4.23. PLANTA REAL – PRV FATOR 0,30**

Outro fator testado foi o valor de 0,30 para o fator limitante de dose por funcionário. Foram alocados 2 funcionários. No entanto, não houve um equilíbrio de doses neste modelo como ocorreu no primeiro modelo. Observa-se um total de 11.555 iterações, o que resultou em um custo de computacional de 3 segundos para resolver o problema.

Quantidade de iterações	11.555
Quantidade de equipamentos	55
Fator de Capacidade	0,30
Rota funcionário 0	1 → 20 → 46 → 36 → 45 → 28 → 33 → 55 → 49 → 50 → 31 → 25 → 43 → 34 → 11 → 23 → 21 → 38 → 17 → 16 → 9 → 44 → 51 → 42 → 12 → 35 → 10 → 3 → 22 → 14 → 7 → 8 → 27 → 1
Rota funcionário 1	1 → 29 → 47 → 15 → 5 → 24 → 48 → 52 → 37 → 32 → 30 → 13 → 53 → 18 → 2 → 54 → 39 → 26 → 6 → 40 → 41 → 4 → 19 → 1
Dose funcionário 0	1.34
Dose funcionário 1	1.20
Tempo de processamento	3,0 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.25. Resultados PRV da planta real com capacidade 0,30*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.24. PLANTA REAL – PRV FATOR 0,50

Outro teste feito foi atribuir o valor 0,50 para o fator de capacidade de dose para cada funcionário. Foram alocados somente 2 funcionários, no entanto, a solução encontrada não foi satisfatória, pois não há o equilíbrio entre as doses dos funcionários, 0,983794 e 1,48129, e um dos funcionários é exposto a uma dose superior a 1 unidade conforme mostrado na Tabela 4.26 e o outro funcionário apresenta uma exposição bem próxima a 1 unidade. O tempo de processamento foi de 1,0 segundo e um total de 3.523 iterações. Dessa forma, os funcionários poderiam sofrer uma PAIRO, Perda Auditiva Induzida pelo Ruído Ocupacional.

Quantidade de iterações	3.523
Quantidade de equipamentos	55
Fator de Capacidade	0,50
Rota funcionário 0	1 → 14 → 42 → 17 → 15 → 6 → 30 → 13 → 51 → 39 → 26 → 18 → 12 → 16 → 3 → 11 → 27 → 34 → 9 → 32 → 10 → 29 → 1
Rota funcionário 1	1 → 49 → 33 → 2 → 35 → 21 → 5 → 46 → 53 → 52 → 28 → 55 → 22 → 47 → 31 → 25 → 24 → 50 → 7 → 23 → 54 → 40 → 38 → 4 → 41 → 45 → 20 → 43 → 19 → 8 → 48 → 44 → 37 → 36 → 1
Dose funcionário 0	0,983794
Dose funcionário 1	1,48129
Tempo de processamento	1,0 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.26. Resultados PRV da planta real com capacidade 0.50*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.25. PLANTA REAL – PRV FATOR 0,75

Foi realizada a implementação para o fator limitante de dose por funcionário valor de 0,75. Um dos funcionários apresentou uma dose de exposição aceitável, 0,285862, no entanto, o outro funcionário apresentou uma dose de exposição altíssima, 2,17922, valor bem superior a 1 unidade conforme a Tabela 6.8. Foram alocados 2 funcionários neste modelo. Observa-se que o segundo funcionário teria sérios problemas de saúde devido à alta dose de exposição. Para tal, foram despendidos 0,53 segundos. Dessa



forma, pode-se concluir que esta solução não é satisfatória para o problema.

Quantidade de iterações	2.636
Quantidade de equipamentos	55
Fator de Capacidade	0,75
Rota funcionário 0	1 → 8 → 43 → 9 → 49 → 4 → 19 → 26 → 23 → 53 → 40 → 55 → 48 → 14 → 46 → 51 → 10 → 31 → 32 → 22 → 45 → 7 → 38 → 21 → 42 → 12 → 37 → 6 → 27 → 18 → 3 → 52 → 2 → 11 → 35 → 29 → 33 → 54 → 17 → 39 → 5 → 24 → 36 → 28 → 25 → 44 → 41 → 16 → 34 → 15 → 1
Rota funcionário 1	1 → 20 → 50 → 47 → 13 → 30 → 1
Dose funcionário 0	2,17922
Dose funcionário 1	0,285862
Tempo de processamento	0,53 s
Tolerância	1,00e-04

*Tabela 4.27. Resultados PRV da planta real com capacidade 0,75*

Fonte: Autoria Própria.

Nesta seção apresenta-se os resultados obtidos para a planta real com a modelagem do problema como um PRV, Problema de Roteamento de Veículos que contempla o equilíbrio das doses dos funcionários, além de minimizá-las e os fatores de distância com base em um fator de equilíbrio de dose automático, ou seja, o algoritmo parte de um ponto inicial do valor da capacidade, o qual foi definido como um valor mínimo para a busca da solução no espaço de vizinhança e utiliza para a varredura um passo do tamanho de 0.001, incremento. Pois, caso não colocasse um valor mínimo calculado com base nas doses da planta real, o programa retornaria solução inviável. Esta implementação foi baseada na teoria de otimização apresentada por Lobato & Steffen Jr. (2008) com o objetivo de utilizar uma metodologia mais eficiente para a redução do espaço de busca.

#### **4.26. COMPARATIVO ESTAÇÃO DE TRABALHO VERSUS COMPUTADOR**

Realizou-se a implementação do algoritmo em uma estação de trabalho, processador profissional e em um computador de uso doméstico para efeito de comparação do tempo de processamento. As

configurações técnicas dos equipamentos podem ser observadas na Tabela 6.9, além dos tempos de processamento de ambos para a planta real e o custo de aquisição dos mesmos.

Equipamento	Estação de Trabalho	Computador
Tipo	Profissional	Doméstico
Processador	Intel Xeon E5-1620 v2 @ 8x 3.9 GHz	Intel Core i5 650 @ 4x 3.333 GHz
Núcleos	8 de 3.9 GHz	4 de 3.3 GHz
Memória	40 GB	8 GB
Tempo total de processamento	10 horas	13 horas
Custo de aquisição	R\$ 6.358,00	R\$ 1.259,00

*Tabela 4.28. Configurações Estação de Trabalho e Computador*

Fonte: Autoria Própria.

Pode-se observar pela Tabela 4.28 que a Estação de Trabalho apresenta um tempo de processamento de 76% mais rápida comparada ao tempo de processamento do computador, ou seja, a Estação de Trabalho consegue processar todo o problema e resolvê-lo em 76% do tempo despendido pelo computador para realizar a mesma ação. Por outro lado, o custo de aquisição da Estação de Trabalho é cinco vezes o valor do custo de aquisição do computador para uso doméstico. Devido a isso, a Estação de Trabalho apresenta uma disponibilidade memória de 40 GB, ou seja, 5,7 vezes superior à do computador. Além disso, a Estação de Trabalho possui 8 núcleos de 3.9 GHz comparados aos 4 núcleos de 3.3 GHz do computador. Assim, a Estação de Trabalho permite um ganho de performance pela empresa.

O computador que está resolvendo as propostas de simulação desta tese é um computador de uso doméstico Intel Core i5 com quatro núcleos de 3.3 GHz e memória de 8 GB.

#### **4.27. PRV FATOR AUTOMÁTICO 1 FUNCIONÁRIO**

Pode-se observar na Tabela 4.29 os resultados obtidos para o PRV com fator automático de 0,99999 para 1 funcionário. O tempo para resolver o problema foi de aproximadamente 1 segundo. A dose para o funcionário 0 foi de 2,37258. Ao analisar-se o resultado para 1 funcionário verifica-se a necessidade de considerar a contratação de mais um funcionário, pois com 1 funcionário a dose está muito acima do

valor de 1 unidade, mais que o dobro do limite e poderá ocasionar lesões auditivas e a PAIRO.

Fator de Capacidade	0,99999
Quantidade de funcionários	1
Rota funcionário 0	1 → 38 → 32 → 51 → 47 → 18 → 20 → 36 → 42 → 25 → 19 → 17 → 46 → 12 → 55 → 50 → 53 → 40 → 16 → 35 → 33 → 15 → 4 → 28 → 30 → 23 → 9 → 5 → 24 → 13 → 39 → 26 → 34 → 10 → 11 → 3 → 52 → 14 → 37 → 6 → 31 → 2 → 43 → 21 → 22 → 45 → 44 → 54 → 29 → 27 → 49 → 7 → 8 → 41 → 48 → 1
Dose funcionário 0	2,37258
Tempo de processamento	1 s

*Tabela 4.29. Resultados PRV automático da planta real para 1 funcionário*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.28. PRV FATOR AUTOMÁTICO 2 FUNCIONÁRIOS

A Tabela 4.30 apresenta os resultados obtidos para o PRV com fator automático de 0,383999 para 2 funcionários. O tempo para resolver o problema foi de aproximadamente 300 segundos. As doses para os funcionários 0 e 1 foram respectivamente, 1,23264 e 1,23244.

Fator de Capacidade	0,383999
Quantidade de funcionários	2
Rota funcionário 0	1 → 12 → 44 → 28 → 7 → 8 → 14 → 32 → 20 → 40 → 4 → 29 → 5 → 46 → 51 → 42 → 17 → 9 → 16 → 38 → 30 → 53 → 18 → 2 → 11 → 19 → 1
Rota funcionário 1	1 → 15 → 36 → 52 → 34 → 33 → 3 → 27 → 31 → 25 → 24 → 43 → 13 → 39 → 26 → 37 → 6 → 41 → 22 → 45 → 10 → 55 → 23 → 47 → 21 → 54 → 50 → 48 → 49 → 35 → 1
Dose funcionário 0	1,23264
Dose funcionário 1	1,23244
Tempo de processamento	300 s

*Tabela 4.30. Resultados PRV automático da planta real para 2 funcionários*

Fonte: Autoria Própria.

As rotas para os funcionários 0 e 1 foram respectivamente, 1 → 12 → 44 → 28 → 7 → 8 → 14 → 32 →

20 → 40 → 4 → 29 → 5 → 46 → 51 → 42 → 17 → 9 → 16 → 38 → 30 → 53 → 18 → 2 → 11 → 19 → 1 e 1 → 15 → 36 → 52 → 34 → 33 → 3 → 27 → 31 → 25 → 24 → 43 → 13 → 39 → 26 → 37 → 6 → 41 → 22 → 45 → 10 → 55 → 23 → 47 → 21 → 54 → 50 → 48 → 49 → 35 → 1. Observa-se que o roteamento para 2 funcionários ainda assim não é eficaz, pois a dose a qual ambos são expostos está cima em 23% do valor limite de 1 unidade. Dessa forma, deve-se considerar a contratação de 3 funcionários para a planta real estudada.

#### 4.29. CONCLUSÕES DA PLANTA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Alcançou-se o objetivo desta tese que foi desenvolver um sistema de otimização para minimizar o ruído ocupacional ao qual os funcionários que trabalham em uma planta industrial com a função de executar tarefas de manutenção estão expostos.

Na primeira parte desta pesquisa, objetivou-se realizar um roteamento eficiente para os funcionários de forma a minimizar a dose a qual o funcionário está exposto ao realizar suas tarefas de manutenção de máquinas na planta industrial. Além da dose, foram utilizados os dados de entrada de distância percorrida e TWA. Ao minimizar a distância percorrida, pretendeu-se que com a redução da distância percorrida pelo funcionário, o mesmo permaneça exposto por menos tempo e por consequência reduza a exposição ao ruído ocupacional. De forma análoga, a minimização do TWA, *Time Weighted Average*, ruído médio equivalente global para a jornada de trabalho objetivou a redução da exposição ao ruído ocupacional. Para todos estes dados, utilizou-se os problemas de roteamento PCV, Problema do Caixeiro Viajante e PRV, Problema de Roteamento de Veículos. Sendo este último modelado para um fator por vez separado e posteriormente, com objetivos múltiplos.

Após a obtenção dos resultados desta etapa, pode-se observar que algumas rotas eram recorrentes. O caminho ótimo do roteamento seriam dois arcos com menor distância, que são: 1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 1 e 1 → 7 → 8 → 9 → 10 → 11 → 1. No entanto, o modelo não escolhe estes dois arcos devido às restrições de TWA, dose e distância. Embora, haja a abordagem de menor distância percorrida implicará menor tempo de exposição. Surgiu a necessidade de garantir o equilíbrio entre as doses dos funcionários. Para tal objetivo, minimizar e equilibrar, simultaneamente, as doses dos funcionários os problemas de roteamento supracitados não atendem as novas necessidades do trabalho, pois tanto o PCV

quanto o PRV garantem a minimização de uma dose total, mas não há minimização e equilíbrio entre as doses dos funcionários. Dessa forma, após uma nova revisão bibliográfica da área de pesquisa operacional, otimização e programação linear orientou-se o trabalho para uma nova abordagem: o Problema de Designação.

Assim, a última abordagem para o problema desta tese foi o funcionário realiza tarefas de manutenção em máquinas, mas não somente a rota. Foram utilizadas as rotas ótimas encontradas na primeira parte do trabalho por meio dos problemas de roteamento para a modelagem do Problema de Designação. Dessa forma, como cada máquina é designada a um funcionário, este problema pode ser modelado como um Problema de Designação. Após a obtenção de doses equilibradas, passou-se a aplicabilidade do sistema desenvolvido nesta tese em uma planta real que não será apresentada, foram descritos o método utilizado, a implementação na planta real e os resultados obtidos.

#### **4.30. CONCLUSÕES DA PLANTA REAL**

A planta real possui 13 pisos. Devido à existência de múltiplos pisos, foi necessária a implementação do PRV – Problema de Roteamento de Veículos em vez do Problema de Designação. Isto deve-se ao fato de que existe um deslocamento entre os pisos no caso da planta real, o qual não havia para a planta virtual de geração de energia com um único piso. Este modelo de PRV contemplou o fator distância, o fator equilíbrio entre as doses dos funcionários e o fator variação da capacidade de atendimento do funcionário quanto a dose de exposição.

Dessa forma, pode-se concluir que para plantas com um único piso deve-se realizar um roteamento prévio e a partir deste, realizar a modelagem como PD, Problema de Designação. Por outro lado, ao tratar-se de plantas com múltiplos pisos, deve-se considerar o deslocamento entre pisos e o problema deve ser modelado como um PRV, Problema de Roteamento de Veículos com fatores de otimização e fatores limitantes conforme o objetivo do problema estudado.

Observou-se que para a planta real analisada não é viável a alocação de somente 1 funcionário para as atividades de inspeção e manutenção da planta, pois este estaria exposto a uma dose superior ao dobro do limite permitido. De forma análoga, também não foi possível a

alocação de 2 funcionários, pois a dose de exposição de ambos estaria 23% acima do valor limite. Dessa forma, recomenda-se a utilização de um tratamento acústico das máquinas da planta real tornando viável a contratação de 2 funcionários.

#### **4.31. HISTÓRICO PRV IMPLEMENTADOS**

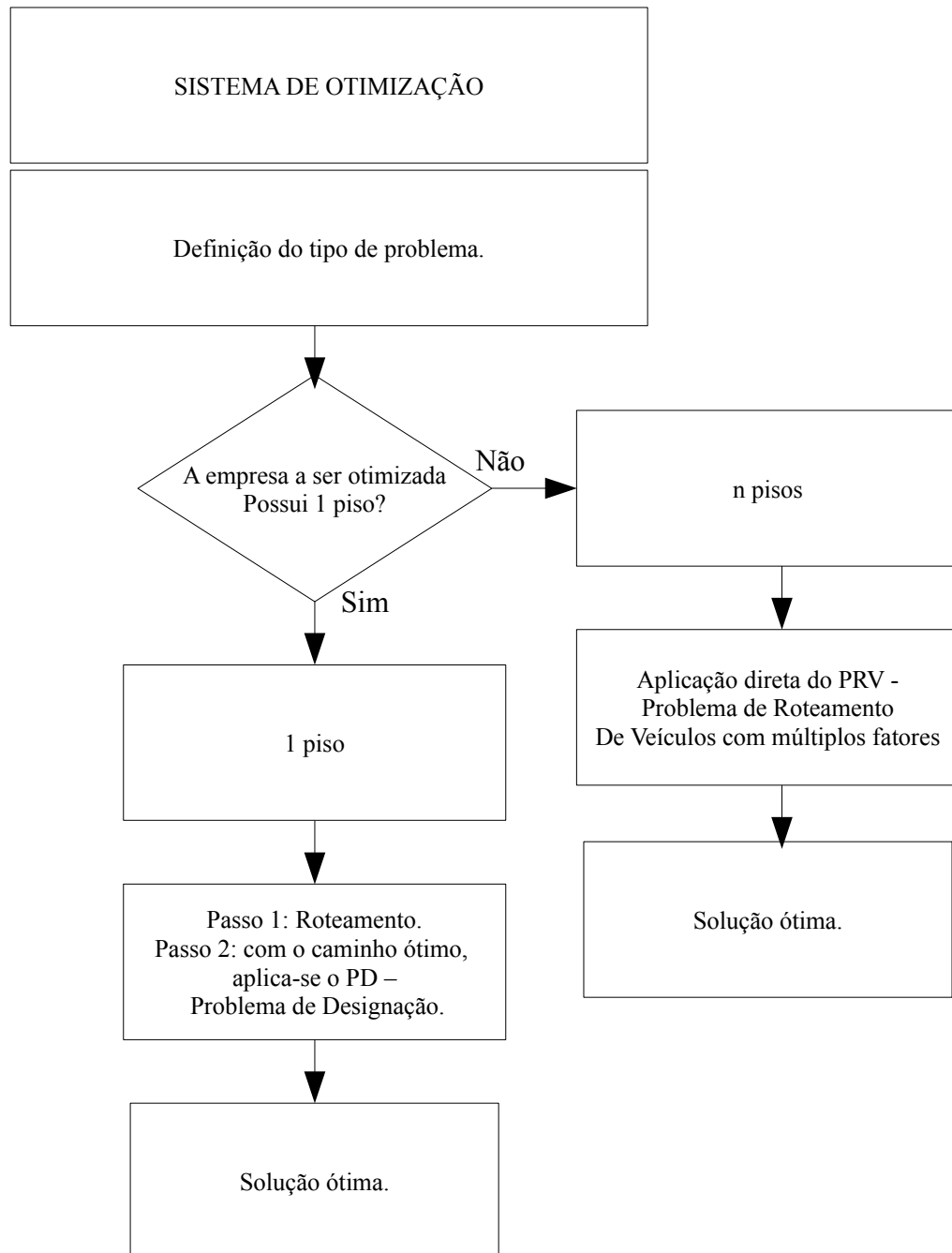
Foram realizadas várias implementações para o desenvolvimento do sistema de otimização e todas as características, restrições de equilíbrio de dose e limite de exposição. Dessa forma, implementou-se o PRV – Problema de Roteamento de Veículos para vários cenários diferentes. Inicialmente, implementou-se o PRV 1, o qual considerou somente um fator isolado por vez, como a distância percorrida, a dose, o TWA – Time Weighted Average. Por outro lado, o PRV 2 abordou a otimização para dois fatores, ou seja, a dose e a distância. O PRV 3 refere-se a otimização conjunta de três fatores, isto é, TWA, dose e distância percorrida. O PRV 4 trabalha a otimização conjunta da distância e o equilíbrio entre as doses dos funcionários com um fator de capacidade manual para garantir o equilíbrio das doses.

Por outro lado, o PRV 5 consiste na otimização conjunta dos fatores supracitados e o equilíbrio entre as doses dos funcionários com um fator de capacidade automático. No PRV 5, o algoritmo varre a estrutura de vizinhança para buscar a solução ótima variando o valor do fator de capacidade até encontrar a solução ótima de forma automática. Para tal o algoritmo parte de um valor inicial de 0,093, valor mínimo calculado com base nas doses da planta real e realiza os incrementos fazendo a busca na estrutura de vizinhança. O valor do incremento para a busca é de 0,001 e o valor limite é 1. Caso não utilizasse esse valor mínimo inicial para o fator de capacidade, o algoritmo retornaria solução inviável. Para a obtenção das 2 melhores soluções para o caso de 1 funcionário e 2 funcionários foram demandadas aproximadamente 10 horas em uma Estação de Trabalho e 13 horas em um computador de uso doméstico. O algoritmo encontrou no espaço de busca 903 soluções, das quais foram avaliadas e obteve-se as 2 apresentadas nesta tese. Assim, recomenda-se a realização de um tratamento acústico nas máquinas da planta real para a contratação de 2 funcionários.

#### **4.32. FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO**

Pode-se concluir que o sistema de otimização desenvolvido nesta tese possui duas

abordagens conforme o número de pisos da planta a ser otimizada. O fluxograma da Figura 5.14 apresenta todos os passos a serem considerados no processo de escolha da abordagem mais adequada de acordo com o tipo de problema estudado.



*Figura 4.16. Fluxograma do Sistema de Otimização*

Fonte: Autoria Própria.

Caso a planta possua 1 piso deve-se realizar um roteamento eficiente seguido de uma implementação do PD – Problema de Designação. Por outro lado, caso a planta possua mais de um piso, é necessário considerar o deslocamento entre os pisos da planta. Dessa forma, deve-se implementar o PRV – Problema de Roteamento de Veículos diretamente.

#### **4.33. O TRATAMENTO ACÚSTICO**

Realizou-se uma otimização do tratamento acústico para a planta real por meio do uso do SAFETYNOISE. O SAFETYNOISE é um software desenvolvido pelo LAV – Laboratório de Acústica e Vibrações da FEMEC – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Pelo módulo dosimetria virtual, o SAFETYNOISE calcula as doses. Neste conceito, o SAFETYNOISE considera a Dosimetria Virtual para estimar computacionalmente um intervalo e confiança para a dose de exposição ao ruído ocupacional para um determinado grupo homogêneo, contemplando não somente a rotina de trabalho, mas também os possíveis desvios desta, como atendimento a paradas, liberação de área e de serviço, alterações na rota devido a reformas ou manutenções, diferenças no ritmo de trabalho de cada trabalhador pertencente ao grupo analisado, dentre outras possíveis variáveis alteradas. Foi utilizada a planta de geração de energia devido a possuir uma dimensão pequena comparada a planta real. Implementou-se o Problema de Roteamento de Veículos a partir dos dados calculados pelo SAFETYNOISE conforme o sistema 4.1.

Foram realizados 7 etapas. Na primeira etapa foi realizada a atenuação de 10 dBA para 1 máquina. A segunda etapa refere-se a otimização de 10 dBA para 2 máquinas e assim por diante até o número de 6 máquinas. A última etapa contempla a otimização de 10 dBA para 10 máquinas. Dessa forma, foi realizada a variação da quantidade de máquinas a ser otimizada no problema. O valor inicial do fator de capacidade considerado nas simulações foi de 0,093. Este valor deve ser considerado para evitar que o programa retorne solução inviável, pois é necessário um valor mínimo de partida para a solução do problema. Com o objetivo de reduzir a região de busca no espaço de soluções viáveis, utilizou-se o tamanho do passo de 0,001, também conhecido como incremento. Essa varredura do espaço de buscas de soluções viáveis continua até o limite máximo de dose 1. O fator de capacidade refere-se a dose recebida pelo funcionário quando ele está parado realizando a inspeção de uma máquina.



#### 4.33.1 PRV TRATAMENTO ACÚSTICO UMA FONTE

Implementou-se o PRV – Problema de Roteamento de Veículos para dos dados obtidos pelo SAFETYNOISE com a atenuação acústica de 10 dB(A) para uma fonte. Na Tabela 4.31 apresenta-se a solução obtida para 2 funcionários.

Dose Parado na Máquina (Capacidade)	1,8
Quantidade de funcionários	2
Fontes otimizadas	Conjunto fonte H)65
Rota funcionário 0	1 → 52 → 48 → 50 → 28 → 36 → 17 → 24 → 10 → 20 → 11 → 21 → 14 → 25 → 16 → 43 → 30 → 47 → 46 → 49 → 8 → 41 → 39 → 45 → 12 → 18 → 7
Rota funcionário 1	1 → 53 → 31 → 51 → 27 → 37 → 15 → 22 → 13 → 42 → 35 → 44 → 26 → 33 → 9 → 40 → 38 → 19 → 34 → 29 → 54 → 23 → 32 → 7
Dose funcionário 0	2.6
Dose funcionário 1	2.7

*Tabela 4.31. PRV 2 funcionários e uma fonte*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.33.2 PRV TRATAMENTO ACÚSTICO DUAS FONTES

Implementou-se o PRV – Problema de Roteamento de Veículos para a otimização do tratamento acústico de 2 fontes da planta real. Apresenta-se na Tabela 4.32 a solução para a otimização do tratamento acústico de 2 fontes.

Dose Parado na Máquina (Capacidade)	1,5
Quantidade de funcionários	2
Fontes otimizadas	Conjunto fonte 65 e 116
Rota funcionário 0	1 → 32 → 29 → 11 → 41 → 19 → 34 → 12 → 54 → 51 → 52 → 15 → 49 → 48 → 50 → 46 → 47 → 39 → 45 → 8 → 33 → 27 → 53 → 7
Rota funcionário 1	1 → 40 → 30 → 37 → 9 → 21 → 14 → 42 → 28 → 43 → 31 → 36 → 23 → 24 → 10 → 18 → 16 → 22 → 20 → 26 → 17 → 25 → 13 → 44 → 35 → 38 → 7
Dose funcionário 0	2.2
Dose funcionário 1	2.4

*Tabela 4.32. PRV 2 funcionários e duas fontes*

Fonte: Autoria Própria.

#### **4.33.3 PRV TRATAMENTO ACÚSTICO TRÊS FONTES**

De forma análoga, realizou-se a implementação para a otimização do tratamento acústico de 3 fontes. Na Tabela 4.33 pode ser observada a solução da otimização do tratamento acústico para três e 2 funcionários para a planta real.

Dose Parado na Máquina (Capacidade)	1,4
Quantidade de funcionários	2
Fontes otimizadas	Conjunto fonte 65, 116 e 168
Rota funcionário 0	1 → 47 → 39 → 45 → 35 → 50 → 46 → 52 → 48 → 49 → 9 → 26 → 36 → 31 → 42 → 19 → 25 → 10 → 20 → 8 → 18 → 13 → 24 → 16 → 43 → 12 → 21 → 7
Rota funcionário 1	1 → 54 → 51 → 53 → 30 → 33 → 27 → 44 → 17 → 22 → 14 → 29 → 15 → 32 → 11 → 41 → 28 → 37 → 34 → 40 → 23 → 38 → 7
Dose funcionário 0	2.2
Dose funcionário 1	2.0

*Tabela 4.33. PRV 2 funcionários e três fontes*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.33.4 PRV TRATAMENTO ACÚSTICO QUATRO FONTES

Nesta etapa realizou-se a otimização do tratamento acústico de 4 fontes. Na Tabela 4.34 pode ser observada a solução para 2 funcionários e 4 fontes tratadas.

Dose Parado na Máquina (Capacidade)	1,3
Quantidade de funcionários	2
Fontes otimizadas	Conjunto fonte 65, 116, 168 e 61
Rota funcionário 0	1 → 22 → 16 → 25 → 17 → 38 → 34 → 40 → 35 → 47 → 30 → 44 → 28 → 36 → 27 → 37 → 29 → 39 → 10 → 20 → 9 → 7
Rota funcionário 1	1 → 24 → 19 → 54 → 48 → 53 → 51 → 52 → 46 → 50 → 33 → 49 → 32 → 41 → 8 → 21 → 13 → 23 → 12 → 45 → 31 → 43 → 11 → 18 → 14 → 26 → 15 → 42 → 7
Dose funcionário 0	1.8
Dose funcionário 1	1.9

*Tabela 4.34. PRV 2 funcionários e quatro fontes*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.33.5 PRV TRATAMENTO ACÚSTICO CINCO FONTES

Nesta etapa realizou-se a otimização do tratamento acústico de 5 fontes. Na Tabela 4.35 pode ser observada a solução para 2 funcionários com 5 fontes tratadas.

Dose Parado na Máquina (Capacidade)	1,2
Quantidade de funcionários	2
Fontes otimizadas	Conjunto fonte 65, 116, 168, 61 e 126
Rota funcionário 0	1 → 22 → 19 → 38 → 35 → 44 → 32 → 37 → 33 → 45 → 27 → 39 → 28 → 43 → 31 → 40 → 17 → 20 → 15 → 21 → 12 → 23 → 8 → 9 → 7
Rota funcionário 1	1 → 42 → 41 → 53 → 51 → 52 → 46 → 50 → 48 → 49 → 47 → 30 → 34 → 29 → 36 → 13 → 26 → 14 → 24 → 11 → 54 → 10 → 18 → 16 → 25 → 7
Dose funcionário 0	1.8
Dose funcionário 1	1.7

*Tabela 4.35. PRV 2 funcionários e cinco fontes*

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.33.6 PRV TRATAMENTO ACÚSTICO SEIS FONTES

Nesta etapa realizou-se a otimização do tratamento acústico de 6 fontes. Na Tabela 4.36 pode ser observada a solução para 2 funcionários com 6 fontes tratadas.

Dose Parado na Máquina (Capacidade)	1,1
Quantidade de funcionários	2
Fontes otimizadas	Conjunto fonte 65, 116, 168, 61, 126 e 68.
Rota funcionário 0	1 → 9 → 8 → 26 → 19 → 49 → 48 → 52 → 50 → 54 → 51 → 53 → 30 → 34 → 33 → 44 → 27 → 38 → 28 → 39 → 31 → 40 → 29 → 43 → 32 → 36 → 17 → 7
Rota funcionário 1	1 → 21 → 13 → 22 → 12 → 23 → 10 → 24 → 11 → 20 → 14 → 25 → 16 → 18 → 15 → 46 → 35 → 47 → 41 → 45 → 37 → 42 → 7
Dose funcionário 0	1.7
Dose funcionário 1	1.5

*Tabela 4.36. PRV 2 funcionários e seis fontes*

Fonte: Autoria Própria.

#### **4.33.7 PRV TRATAMENTO ACÚSTICO DEZ FONTES**

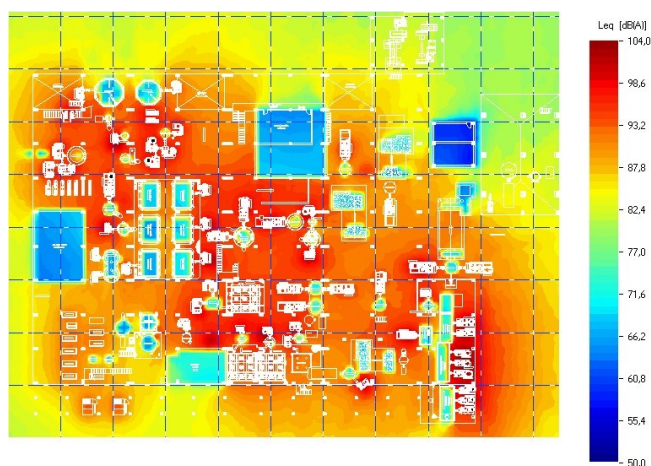
Nesta etapa realizou-se a otimização do tratamento acústico de 10 fontes. Na Tabela 4.37 pode ser observada a solução para 2 funcionários com a otimização do tratamento de 10 fontes.

Dose Parado na Máquina (Capacidade)	1,0
Quantidade de funcionários	2
Fontes otimizadas	Conjunto fonte 65, 116, 168, 61, 126, 68, 135, 119, 170 e 37
Rota funcionário 0	1 → 14 → 12 → 38 → 37 → 44 → 31 → 39 → 27 → 36 → 29 → 46 → 35 → 42 → 30 → 40 → 33 → 43 → 26 → 34 → 47 → 11 → 23 → 8 → 9 → 7
Rota funcionário 1	1 → 45 → 28 → 41 → 32 → 49 → 48 → 53 → 51 → 54 → 50 → 52 → 24 → 25 → 15 → 22 → 19 → 21 → 10 → 18 → 16 → 17 → 13 → 20 → 7
Dose funcionário 0	0.9
Dose funcionário 1	1.0

*Tabela 4.37. PRV 2 funcionários e dez fontes*

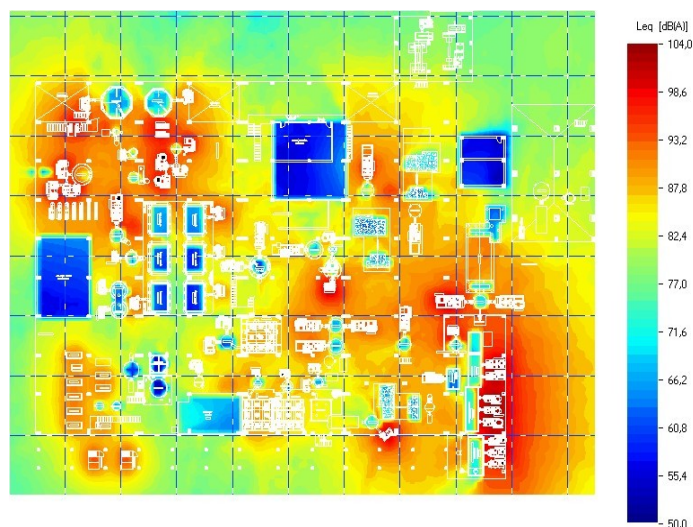
Fonte: Autoria Própria.

Depois de modificar de uma a cinco fontes não implica uma redução significativa da dose (ruído de fundo). Por isto parou-se com dez. Pode-se observar dois mapas de LAeq, gerados pelo SAFETYNOISE, mostrando os níveis de LAeq estimados para a área na situação atual, Figura 4.17 e após os tratamentos, Figura 4.18.



*Figura 4.17. Mapa de LAeq situação atual*

Fonte: Autoria Própria.



*Figura 4.18. Mapa de LAeq após os tratamentos*

Fonte: Autoria Própria.

Pode-se observar pela análise da Figura 4.17 que a maior parte da área do gráfico com os equipamentos a serem inspecionados, área central está com uma exposição de aproximadamente 93 a 104 dB. Por outro lado, verifica-se na Figura 4.18 que a exposição após o Procedimento de Rotas de Inspeção e Tratamento Acústico encontra-se aproximadamente 82 dB. Pelos dados obtidos pelo Procedimento de Rotas de Inspeção e Tratamento Acústico por meio dos algoritmos observou-se uma redução de dose de exposição de aproximadamente 67%, o que viabilizou o roteamento da planta industrial por dois funcionários com dose adequada. Portanto, a análise dos mapas de LAeq gerados pelo SAFETYNOISE e os resultados gerados pelo sistema de otimização permitem concluir que houve uma minimização significativa da exposição ao ruído, tornando o ambiente de trabalho adequado e saudável para o trabalhador.

## CAPÍTULO V

Este capítulo apresenta as principais conclusões do trabalho e possibilidade de trabalhos futuros.

### 5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

- A) Pode-se concluir que o software SAFETYNOISE gera os valores de NPS para todos os pontos da planta de modo a simular a exposição ao ruído industrial. Este conjunto de dados permite a avaliação da contribuição de cada máquina na exposição ocupacional, com o objetivo de verificar o efeito global.
- B) A partir destes dados, gera-se uma planilha para obter a melhor rota por meio do sistema de otimização. É possível obter a melhor rota para o inspetor / lubrificador. Este procedimento de otimização apresenta plena capacidade de uso para as empresas. É válido ressaltar que caso a planta possua 1 piso deve-se realizar um roteamento eficiente seguido de uma implementação do PD.
- C) Por outro lado, a planta possua mais de um piso, é necessário considerar o deslocamento entre os pisos da planta e implementar o PRV diretamente. A partir do conjunto de dados gerado, é possível obter a melhor rota para o funcionário. Assim, o sistema de otimização desenvolvido nesta tese apresentam plena capacidade de uso para empresas que necessitem de uma otimização da dose de exposição ocupacional.
- D) Depois de modificar de uma a cinco fontes não implica uma redução significativa da dose (ruído de fundo). Por isto parou-se com dez. Pode-se observar dois mapas de LAeq, gerados pelo SafyteNoise, mostrando os níveis de LAeq estimados para a área na situação atual e após os tratamentos que evidenciam a eficiência da otimização de tratamento acústico. Assim, o tratamento acústico mostra-se como uma excelente ferramenta para os casos nos quais após o procedimento de otimização a dose ainda estiver elevada. Após a otimização das rotas, estando as doses acima dos valores permitidos é possível otimizar a escolha das fontes de ruído a serem tratadas e obter doses adequadas. Para tal realizou a otimização do tratamento acústico das fontes de ruído, as fontes que mais impactam na dose.
- E) Pela análise dos mapas gerados pelo SAFETYNOISE com os equipamentos a serem



inspecionados, a área central estava com uma exposição de aproximadamente 93 a 104 dB. Por outro lado, verifica-se que após o Procedimento de Rotas de Inspeção e Tratamento Acústico a exposição encontra-se aproximadamente 82 dB. Pelos resultados obtidos pelo Procedimento de Rotas de Inspeção e Tratamento Acústico observou-se uma redução dos valores de dose de exposição dos funcionários de aproximadamente 67%, o que viabilizou o roteamento da planta industrial por dois funcionários com doses adequadas. Assim pode-se concluir que houve uma mitigação da exposição ao ruído, tornando o ambiente de trabalho adequado e saudável para o trabalhador.

- F) O procedimento de otimização possui grande aplicabilidade. Podem ser realizadas adaptações dos códigos de acordo com a quantidade de fontes, equipamentos e número de pisos que a planta industrial possua.

## **5.2. POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS**

Pode-se elencar algumas possibilidades de continuidade para esta pesquisa em nível de mestrado e / ou doutorado. Dentre estas, pode-se mencionar:

- a) A aplicabilidade do sistema de otimização desenvolvido nesta tese a outras empresas e adaptações dos códigos de acordo com a quantidade de máquinas, equipamentos e número de pisos que a empresa possua.
- b) Após a implantação do Procedimento de Otimização de Rotas de Inspeção em uma planta industrial, deve-se realizar uma pesquisa de percepção psicológica acústica dos funcionários da planta industrial onde foi implantado o sistema para verificar o efeito do procedimento de mitigação das fontes mais ruidosas sobre a percepção e qualidade de vida do trabalhador.
- c) Sugere-se realizar medições para averiguar os valores reais de exposição após a implantação do Procedimento de Otimização de Rotas de Inspeção em uma planta industrial para minimizar a possibilidade de incongruências de medições. Esta ação deve estar prevista no PCA – Programa de Conservação Auditiva.
- d) Pode-se em um trabalho futuro desenvolver um levantamento de sintomas auditivos e não auditivos decorrentes da exposição. Dessa forma, diferenciá-los e verificar a sua correlação com a percepção psicológica acústica dos trabalhadores.

### 5.3. PUBLICAÇÕES 2017-2020

A seguir são apresentadas algumas publicações. Estas publicações são fruto do trabalho que vem sendo desenvolvido pelo grupo de pesquisa de Desenvolvimento de Soluções Acústicas para Controle de Ruído Industrial e Segurança do Trabalho. A autora desta tese é membro deste grupo de pesquisa. Este grupo de pesquisa faz parte do LAV – Laboratório de Acústica e Vibrações da FEMEC – Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU – Universidade Federal de Uberlândia.

1. REIS, D.; VANZO, F.; REIS, J.; DUARTE, M. Journal Archives of Acoustics Qualis B1 na área de Engenharias III da Capes, Vol. 44, No. 1, pp. 79-87, 2019, “Discriminant Analysis and Optimization Applied to Vibration Signals for the Quality Control of Rotary Compressors in the Production Line”, DOI: 10.24425/aoa.2019.126354;
2. REIS, D.; MIRANDA, J.; REIS, J.; DUARTE, M. In review “Optimization System to Minimize Exposure to Occupational Noise”, Journal Archives of Acoustics Qualis B1 na área de Engenharias III da Capes;
3. REIS, D.; REIS, J.; VANZO, F.; DUARTE, M. Capítulo 1 do Livro Tópicos Especiais em Engenharia de Produção, Editora Aya, 2020, “Problema de Caminho Mínimo aplicado à Otimização de Roteamento de Funcionário para minimizar a exposição ao ruído ocupacional”, DOI: 10.47573/aya.88580.2.5;
4. REIS, D.; REIS, J.; DUARTE, M. Capítulo do Livro Modelagem de processos de fabricação: para novas tecnologias inovadoras, Editora Aya, 2020, “Comparativo de desempenho entre softwares para minimizar a exposição ao ruído ocupacional utilizando PCV”, DOI:10.47573/aya.88580.2.8.4;
5. REIS, D.; REIS, J.; DUARTE, M. Capítulo do Livro Engenharia de Produção: Além dos Produtos e Sistemas Produtivos, Editora Atena, 2020, “Otimização da Dose de Ruído Ocupacional utilizando o Problema de Roteamento de Veículos”;
6. REIS, D.; REIS, J.; DUARTE, M. ENEGEP 2020, XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, “Comparativo de desempenho entre softwares para

- minimizar a exposição ao ruído ocupacional utilizando PCV”;
7. REIS, D.; REIS, J.; DUARTE, M. SIMPEP 2020, XXVII Simpósio de Engenharia de Produção, UNESP, “COMPARATIVE PRV FOR MINIMIZATION OF EXPOSURE TO OCCUPATIONAL NOISE”.
  8. REIS, D.; REIS, J.; DUARTE, M. XV EMEPRO 2019, XV Encontro Mineiro de Engenharia de Produção, “Otimização do Roteamento de Funcionário para Minimizar a Exposição ao Ruído em uma Planta Industrial de Geração de Energia”;
  9. REIS, D.; REIS, J.; DUARTE, M. ENEGEP 2019, XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, “Otimização da Dose de Ruído Ocupacional pela Modelagem do problema como PRV”;
  10. REIS, D.; REIS, J.; DUARTE, M. POSMEC 2019, 29 ° Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC / UFU, “Dosimetria Aplicada à Otimização para Minimizar a Exposição ao Ruído Ocupacional pela Modelagem do PCV”;
  11. REIS, D.; REIS, J.; VANZO, F.; DUARTE, M. SIMPEP 2019, XXVI Simpósio de Engenharia de Produção, UNESP, “Minimum Path Problem Applied to Employee Route Optimization to Minimize Occupational Noise Exposure”.
  12. REIS, D.; REIS, J.; DUARTE, M. POSMEC 2018, 28 ° Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC / UFU, “PCV Aplicado à Otimização de Roteamento de Funcionário para Minimizar o Tempo de Exposição ao Ruído no Ambiente de Trabalho”;
  13. REIS, D.; VANZO, F.; REIS, J.; DUARTE, M. SIMPEP 2018, XXV Simpósio de Engenharia de Produção, UNESP, “A Case Study of Noise Quality Control in a Compressor Production Line”;
  14. REIS, D.; VANZO, F.; DUARTE, M. POSMEC 2017, 27 ° Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, FEMEC / UFU, “Análise Discriminante Aplicada ao Problema de Ruído de Compressores”;
  15. REIS, D.; VANZO, F.; REIS, J.; DUARTE, M. SIMPEP 2017, XXIV Simpósio de Engenharia de Produção, UNESP, “Discriminant Analysis Applied to the Noise Quality Control of Compressors”.

## Referências

BASSET, A.; GUNASEKARAN, M.; MOHAMED, M.; SMARANDACHE, F. **A novel method for solving the fully neutrosophic linear programming problems.** Neural Computing and Applications, v. 31, 1595-1605, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3404-6>.

ALMEIDA, K.; RUSSO, I. C. P.; SANTOS, T. M. **Aplicação do Mascaramento em Audiologia.** São Paulo: Lovise, 1995, 55p.

ALVES, D. A. **Análise da Exposição Ocupacional ao Ruído em uma Indústria Têxtil no Interior da Paraíba.** Patos – PB, Instituto Federal da Paraíba, 2017, 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso.

ANON, I. C.; SCAGLIA, A. J.; TOREZZAN, C. **Um Modelo de Programação Linear Inteira para Otimização de Recursos na Designação de Árbitros para o campeonato brasileiro de futebol.** Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, v. 9, n. 1, p. 10-17, 2017. DOI 10.4322/PODes.2017.002. <https://doi.org/10.4322/PODes.2017.002>.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional.** Rio de Janeiro: Elsevier. 2007.

ARGALASOVA, L.; FILOVA, A.; HIROSOVA, K.; VONDROVA, D.; SAMOBYL, M.; KRAJCOVA, D.; JURKOVICOVA, J.; SEVCIKOVA, L. (2016), **The Risks of Social Noise Exposure in the Vulnerable Population in Slovakia**, Archives of Acoustics Magazine, 41, 3, 535-541. <https://doi.org/10.1515/aoa-2016-0052>.

AZZI, J. B.; LIMA, F. M.; SOUZA, T. A.; DELGADO, A. R. S. **A Programação Linear na Agromatemática.** Proceedings Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 6, n. 2, 2018.

BARTLETT, M.; CUSSENS, J. **Integer Linear Programming for the Bayesian network structure learning problem.** Artificial Intelligence, v. 244, 258-271, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.artint.2015.03.003>.

BATTESINI, M.; COELHO, H. S.; SETA, M. H. **Use of Linear Programming to Optimize Geographic Access in Specialized Healthcare Networks**. Reports in Public Health, 2018. DOI 10.1590/0102-311X00055017.

BERGMANN, G. A.; REGERT, R.; MOUSSALLE, S. K. **Otalgia: Diagnóstico diferencial e tratamento**. Disponível em: <<http://docs.bvsalud.org/biblioref/2018/02/879483/otalgia-diagnostico-diferencial-e-tratamento.pdf>>. Acesso em 01 de Março de 2019.

BRASIL. **Ministério do Trabalho. Portaria nº 3.214, de 8 de junho de 1978**. Aprova as normas regulamentadoras – NR – do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas a Segurança e Medicina do Trabalho. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, jun. 1978.

CORDEIRO, R.; CLEMENTE, A. P. G.; DINIZ, C. S.; DIAS A. **Occupational noise as a risk factor for work-related injuries**. Revista Saúde Pública da Faculdade de Medicina de Botucatu da UNESP, 39(3):461-6, 2005. 6 p. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102005000300018>.

COSTA, M. T. D.; MARTINS, E. J.; ROCHA, A. C.; GARCIA, D. C. N.; OLIVEIRA, I.; LIMA, P. P. S.; SILVA, V. R. **The Ergonomic impact of noise on public school teachers**. Revista Research, Society and Development, ISSN 2525-3409, 2018. 18 p.

COSTA, P. P. **Teoria de Grafos e Suas Aplicações**. Rio Claro – SP, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2011, 79 p. Dissertação de Mestrado.

DENYSIUK, R. **Evolutionary Multi-objective Optimization: Review, Algorithms, and Applications**. Universidade do Minho, 2012, Portugal, Tese de Doutorado.

FAÇANHA, R. C.; AZEVEDO, G. R. **The workers knowledge about the use of the equipment of individual protection for the health hearing**. Revista Ceuma Perspectivas, v. 31, 2018, ISSN: 2525-

5576. <https://doi.org/10.24863/rccp.v31i1.190>.

FAGUNDES NETO, M. G. **Análise de componentes independentes aplicadas em compressores herméticos alternativo para mitigação das fontes de ruído**. Uberlândia – MG, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2017, 239 p. Tese de Doutorado.

FARIAS, Y. A. **Análise Comparativa de Diferentes Tempos de Dosimetria de Ruído para Avaliação de Uma Jornada de Trabalho**. Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018, 46 p. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho).

FERNANDES, J. C. **Acústica e Ruídos**. Apostila do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP. Bauru, São Paulo, 2002.

FERREIRA, R. F. **Programação do Despacho de Geração de Unidades Hidrelétricas via Programação Linear Inteira Mista**. Florianópolis – SC, Universidade Federal de Santa Catarina, 2018, 128 p. Dissertação de Mestrado.

GERGES, S. N. Y. **Ruído Fundamentos e Controle**. NR: Florianópolis, 2000.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Mc Graw Hill. 2006.

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EM EL TRABAJO, **La protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición al ruido**, Real decreto 2886/2006, Espanha, 2006.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1973). ISO 2204 – **Acoustic – Guide to the measurement of airborne acoustical noise and evaluation of its effects on man**. Geneve, Switzerland.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1990). ISO 1999 – **Acoustics – Determination**

**of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment** . Geneve, Switzerland, 17 p.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION (1996). **ISO 9613 – Acoustic – Attenuation of sound during propagation outdoors** . Geneve, Switzerland, 24 p.

KOLOTILIN, A. **Optimal information disclosure: a linear programming approach**. Journal Theoretical Economics, v. 13, 607-635, 2018. <https://doi.org/10.3982/TE1805>.

LAPORTE, G. The Vehicle Routing Problem: an overview of exact and approximate algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 59, n. 3., p. 345-358. 1992. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90192-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C).

LENSTRA, J.; RINNOOY, K. A. **Complexity of vehicle routing and scheduling problems**. Networks. Vol. 11. p. 221-227. 1981. <https://doi.org/10.1002/net.3230110211>.

LIMA, S. J. A.; SANTOS, R. A. R.; ARAUJO, S. A. **Otimização do Problema de Roteamento de Veículos Capacitado Usando Algoritmos Genéticos e as Heurísticas de Gillet e Miller e Descida de Encosta**. XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2015.

LOBATO, F. S.; STEFFEN JR, V.; **Algoritmo de Luus-Jaakola Aplicado a um Problema Inverso de Fermentação Batelada Alimentada**. Revista da Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 9, No. 3 (2008), 417- 426. <https://doi.org/10.5540/tema.2008.09.03.0417>.

LOBATO, F. S. **Notas de Aula da Disciplina Otimização de Sistemas Mecânicos**. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Uberlândia: 2017.

MACHADO, S. **Perda de Audição pode gerar indenização por Acidente de trabalho**. 2020. Disponível em: <<https://machadoadvogados.com.br/2003/06/18/perda-de-audio-pode-gerar-indenizacao->

por-acidente-de-trabalho/>. Acesso em 09 de Abril de 2020.

MANOEL SILVA, F. **Análise de Ruídos presentes em unidades de alimentação e nutrição na praça de alimentação de shopping center no município de Vitória de Santo Antão**. Vitória de Santo Antão, Universidade Federal de Pernambuco, 2018, 41 p. Trabalho de Conclusão de Curso.

MARIQUITO, J. V. M.; SILVA, L. A. G.; ARAUJO, R. M.; PORFIRIO, V. H. M.; ABREU, S. R. **Sistema de Gestão de Processos Aplicado ao Gerenciamento de Produção utilizando Curva ABC e metodologia de Programação Linear visando a Maximização dos Resultados**. X Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, ISSN 2447-0635, 2018.

MEDSEG. **O Ruído no local de trabalho**. 2018. Disponível em: <<https://www.medsegservice.com.br/single-post/ruído-ocupacional-avalia%C3%A7%C3%A3o-controle>>. Acesso em 10 de Abril de 2020.

MELAMED, S.; FROOM, P.; **The joint effect of industrial noise exposure and job complexity on all-cause mortality** - The Cordis study. Noise Health, v. 4, n. 8, p. 23-31, 2002.

MELLO, A. **Alerta ao Ruído Ocupacional**. 1999. Monografia de Especialização em Audiologia Clínica – Centro de Especialização em Fonoaudiologia, Porto Alegre.

MIYAZAWA, F. K. **Otimização Combinatória**. Universidade Estadual de Campinas. Unicamp. Disponível em: <<https://www.ic.unicamp.br/~fkm/problems/combopt.html>>. Acesso em 03 de Fevereiro de 2019.

MORAES, D. G.; FERREIRA, C. V.; SILVA, A. M. **Production Optimization Using Linear Programming: Case Study in an Aluminum Fenestration Industry**. Refas. ISSN 2359-182X, v. 5, n. 4, edição especial, 2019.

MORAIS, L. R.; NOGUEIRA, R. C. C.; SLAMA, J. G. **Lógica Fuzzy: Avaliação de Conforto Ambiental**. I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável, ISBN 85-89478-08-4, 2004. 9



p.

MULTEE, P. **Dosimetria de Ruído**. 2019. Disponível em: <<http://www.multee.com.br/servicos-de-engenharia/seguranca-do-trabalho/agentes-fisicos/dosimetria-de-ruído/>>. Acesso em 06 de Março de 2019.

NEMATİ, M.; BRAUN, M.; TENBOHLEN, S. **Optimization of unit commitment and economic dispatch in microgrids based on genetic algorithm and mixed integer linear programming**. *Applied Energy*, v. 210, 944-963, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.007>.

NHO 1. **Norma de Higiene Ocupacional da Fundacentro**. 2001. Disponível em: <<http://www.fundacentro.gov.br/biblioteca/normas-de-higiene-ocupacional/publicacao/detalhe/2012/9/nho-01-procedimento-tecnico-avaliacao-da-exposicao-ocupacional-ao-ruído>>. Acesso em 04 de Março de 2019.

NIOSH. **Perda Auditiva relacionada ao trabalho**. 2020. Disponível em: <<https://tempoocupacional.com.br/blog/perda-auditiva-relacionada-ao-trabalho-niosh>>. Acesso em 09 de Abril de 2020.

OLIVEIRA, E. A. M.; XAVIER, A. P.; SILVA, A. A.; MENDES, B.; TAKEDA, L. **Programação Linear Aplicada a Designação de Pessoas: Uma Análise da Literatura Especializada**. XIII Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial. ISSN 2176-3097. Campo Mourão, 2019.

OLIVEIRA FILHO, R. H. **Uma Metodologia para a Avaliação Virtual da Dose de Exposição ao Ruído no Ambiente de Trabalho**. Uberlândia – MG, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2011, 186 p. Tese de Doutorado.

OLIVEIRA, R. C.; SANTOS, J. N.; RABELO, A. T. V.; MAGALHÃES, M. C. **The Impact of Noise Exposure on Workers in Mobile Support Units**. *CoDAS*, v. 27, n. 3, 2015, DOI: 10.1590/2317-1782/20152014136. <https://doi.org/10.1590/2317-1782/20152014136>.

OR-Library. **Operations Research problems:** distributing tests problems. Disponível em <<http://people.brunel.ac.uk/~mastjbjeb/info.html>>. Acesso em 05 de Janeiro de 2019.

PEREIRA JÚNIOR, W. M.; SILVA, A. C. **Application of Numerical Methods for Minimizing Functions of Various Variables.** Revista Eletrônica de Educação da Faculdade Araguaia, v. 10, p. 44-62, 2016.

Portal Acústica. **Isolamento do Ruído e Vibrações de Equipamentos.** Disponível em <<http://portalacustica.info/isolamento-do-ruído-e-vibrações-de-equipamentos-tecnicos/>>. Acesso em 10 de Abril de 2020.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations.** Miami: Prentice Hall. 2011. 1105 p. Fifth edition.

REIS, D. A. S.; REIS, J. V. A.; DUARTE, M. A. V. **PCV Aplicado à Otimização de Roteamento de Funcionário para Minimizar o Tempo de Exposição ao Ruído no Ambiente de Trabalho.** Simpósio do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia. 2018.

RUSSO, I. C. P.; SANTOS, T. M. M. **A prática da Audiologia Clínica.** São Paulo: Cortez, 1993. 253 p.

SALIBA, T. M. **Manual prático de avaliação e controle do ruído.** São Paulo, 2008.

SALIBA, T. M. **Manual prático de higiene ocupacional e PPRA: avaliação e controle dos riscos ambientais.** 4ª Edição. – São Paulo: LTr, 2013.

SILVA, I. P.; CAPOCCI, N. R.; GONÇALVES, V. C.; BUENO, M. J. C.; OLIVEIRA, M. A. M. **Minimizing Freight Costs in the Cleaning Distribution by Linear Programming.** Revista ENIAC Pesquisa, v. 7, n. 1, 2018, Guarulhos.

SILVA, P. G. **Meta-heurísticas.** DECOM. Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em <<http://www.decom.ufop.br/gustavo/bcc342/Metaheurísticas.pdf>>. Acesso em 10 de Fevereiro de 2019.

SOSA, N. G. M.; GALVÃO, R. D.; GANDELMAN, D. A. **Algoritmo de busca dispersa aplicado ao problema clássico de roteamento de veículos.** Pesqui. Oper. vol. 27. no. 2. Rio de Janeiro. May/Aug. 2007. Print version ISSN 0101-7438 On-line. <https://doi.org/10.1590/S0101-74382007000200006>.

SOUSA, R.; FURTADO, C. J. G.; HORTA, J. C. L. **Graphical Resolution of Linear Programming problems, using 3D graphics sheet of GeoGebra.** Revista do Instituto GeoGebra de São Paulo, v. 7, n. 2, p. 45-64, 2018, ISSN 2237-9657.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TAVARES, J. C. R. **Ruído no trabalho: 8 medidas adequadas para a proteção do trabalhador.** 2020. Disponível em: <<https://okup.com.br/seguranca-auditiva-no-trabalho-8-medidas-adequadas-para-protecao-do-trabalhador/>>. Acesso em 10 de Abril de 2020.

VIEIRA FERNANDES, F. P. **Problemas de Alocação de Recursos Humanos: Proposta de solução pelo Método AHP e Programação Linear Inteira.** Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2019, Trabalho de Conclusão de Curso.

WANG, Y.; ZHANG, N.; ZHUO, Z.; KANG, C.; KIRSCHEN, D. **Mixed-integer linear programming-based optimal configuration planning for energy hub: Starting from scratch.** Applied Energy, v. 210, 1141-1150, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.114>.

WSZOLEK, T. (2017), **Cumulative Industrial Noise Impact on the Environment**, Archives of Acoustics Magazine, 42, 2, 169-174. <https://doi.org/10.1515/aoa-2017-0019>.

YIN, J.; YANG, L.; TANG, T.; GAO, Z.; RAN, B. **Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy-efficiency and waiting time minimization: Mixed-integer linear**

**programming approaches.** Transportation Research Part B: Methodological, v. 97, 182-213, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.001>.

## ANEXO A

O Anexo A contém uma tabela da norma NR15 com a máxima exposição permissível diária para ruídos contínuos.

NPS dB(A)	Máxima exposição diária permissível
85	08 horas
86	07 horas
87	06 horas
88	05 horas
89	04 horas e 30 minutos
90	04 horas
91	03 horas e 30 minutos
92	03 horas
93	02 horas e 30 minutos
94	02 horas e 15 minutos
95	02 horas
96	01 hora e 45 minutos
98	01 hora e 15 minutos
100	01 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	08 minutos
115	07 minutos

*Tabela A.1. Limites de exposição*

Fonte: Portaria 3.214, 1.978.