

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Rafael Silveira Nunes Valadão

**EXPLORAÇÃO NO ESPAÇO DE PARÂMETROS DO ALGORITMO DAP
(DOUBLE AFFINE PROJECTION) VISANDO À REDUÇÃO DE RUÍDOS
EM SISTEMAS HANDS-FREE AUTOMOTIVOS**

Belo Horizonte
2017

Rafael Silveira Nunes Valadão

**EXPLORAÇÃO NO ESPAÇO DE PARÂMETROS DO ALGORITMO DAP
(DOUBLE AFFINE PROJECTION) VISANDO À REDUÇÃO DE RUÍDOS
EM SISTEMAS HANDS-FREE AUTOMOTIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Flávia Magalhães Freitas
Ferreira

Coorientador: Profa. Dra. Zélia Myriam Assis Peixoto

Belo Horizonte

2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

V316e	<p>Valadão, Rafael Silveira Nunes</p> <p>Exploração no espaço de parâmetros do algoritmo DAP (Double Affine Projection) visando à redução de ruídos em sistemas Hands-Free automotivos / Rafael Silveira Nunes Valadão. Belo Horizonte, 2017.</p> <p>81 f. : il.</p> <p>Orientadora: Flávia Magalhães Freitas Ferreira Coorientadora: Zélia Myriam Assis Peixoto Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica</p> <p>1. Automóveis. 2. Ruído - Medição. 3. Isolamento acústico - Métodos. 4. Processamento de sinais. 5. Processamento de dados. 4. Algoritmos. 5. Engenharia acústica. I. Ferreira, Flávia Magalhães Freitas. II. Peixoto, Zélia Myriam Assis. III. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.</p> <p>CDU: 629.113</p>
-------	---

Rafael Silveira Nunes Valadão

**EXPLORAÇÃO NO ESPAÇO DE PARÂMETROS DO ALGORITMO DAP
(DOUBLE AFFINE PROJECTION) VISANDO À REDUÇÃO DE RUÍDOS
EM SISTEMAS HANDS-FREE AUTOMOTIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Profa. Dra. Flávia Magalhães Freitas Ferreira (Orientador) - PUC Minas

Profa. Dra. Zélia Myriam Assis Peixoto (Coorientador) - PUC Minas

Prof. Dr. Christian Gonçalves Herrera - CEFET-MG

Belo Horizonte, 24 de Fevereiro de 2017.

AGRADECIMENTOS

À querida Professora Doutora Flávia por sua orientação, dedicação, paciência e incentivo, que demonstraram o exemplo de profissional e de pessoa com quem tive a oportunidade de aprender.

À querida Professora Doutora Zélia pela orientação, amizade e incentivo.

Ao Carlos pelos ensinamentos, amizade e ideias.

À Isabel e Eliza, por serem tão receptivas e gentis, dando o suporte sempre que necessário.

Ao Alan pelo seu apoio técnico, sempre tão fundamental.

Ao Wellington Fonseca pelo seu apoio, amizade, incentivos e contribuições, que foram fundamentais no desenvolver desta pesquisa.

Ao Willian Gomes pelo suporte na reta final e a sua amizade.

Aos companheiros, professores e funcionários do PPGEE da PUC-MG.

Ao apoio da CAPES, que foi de fundamental ajuda.

À FIAT Automóveis e aos colegas de trabalho pelos incentivos.

À família, em especial meu pai, meu maior amigo e companheiro. À Francisca por suas palavras de orientação e amor. Ao meu irmão Thiago, por entender minha distância neste período.

À Marianna, Sr. Marcos e Da. Meira pelo amor, compreensão, paciência e carinho, que foram imprescindíveis.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta no desenvolvimento desse trabalho.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.” (Albert Einstein)

RESUMO

O ambiente veicular, para aplicação de sistemas de comunicação hands-free, apresenta um desafio em se conseguir uma boa inteligibilidade da voz do locutor no habitáculo (como é chamado o interior do veículo) principalmente devido a interferências e ruídos intrínsecos ao funcionamento de um automóvel. Este trabalho visa ao estudo da aplicação dos algoritmos ANC e DAP no processo de redução de ruído (NR). Visa, também, explorar a variação de desempenho dos algoritmos quanto à variação dos seus parâmetros. A fim de se otimizar a resposta do algoritmo DAP quanto à qualidade da filtragem e ao tempo de processamento, utilizou-se o algoritmo NSGA-II com a relação sinal ruído (SNR) e o Real Time Factor (RTF) como funções objetivo. Além disso, utilizou-se a base TIMIT para os testes dos algoritmos; as simulações foram conduzidas em ambiente MATLAB®. Para uma validação do uso do algoritmo em ambiente real, considerou-se também características do meio físico, como atraso e reverberação de sinal. Com base nos resultados mostrados, pôde-se verificar a aplicabilidade do algoritmo nos cenários de teste propostos.

Palavras-chave: Hands-free, Voz, Redução de ruído, ANC, DAP, NSGA-II, SNR, RTF.

ABSTRACT

The automotive environment, for application of hands-free communication systems, presents a challenge in achieving a good intelligibility of the speaker's voice in the passengers compartment (interior of the vehicle) mainly due intrinsic interferences and noises from car operation. This work aims to study the application of ANC and DAP algorithms in the noise reduction process (NR). It also aims to explore the algorithms performance variation regarding the parameters variation. In order to optimize the DAP algorithm response regarding filter quality and processing time, the NSGA-II algorithm with the signal-to-noise ratio (SNR) and Real Time Factor (RTF) were used as objective functions. In addition, the TIMIT base was used to test the algorithms. The simulations were performed in a MATLAB[®] environment. For a validation of the use of the algorithm in real environment, it was also considered characteristics of the physical environment, such as delay and reverberation of signal. Based on the presented results, it was possible to verify the algorithm applicability in the proposed test scenarios.

Keywords: Hands-free, Voice, Noise Reduction, ANC, DAP, NSGA-II, SNR, RTF.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Imagem do posicionamento de microfones em veículo.	34
FIGURA 2 – Modelo de sinal completo.	36
FIGURA 3 – Modelo de sinal simplificado.	36
FIGURA 4 – Representação em bloco de um ANC.	37
FIGURA 5 – Esquema básico de um ANC.	37
FIGURA 6 – Diagrama de blocos do algoritmo DAP.	39
FIGURA 7 – DAP estrutura interna.	39
FIGURA 8 – Representação gráfica da seleção do indivíduo 3 a partir do método da roleta.	44
FIGURA 9 – Cálculo da distância de agrupamento.	47
FIGURA 10 – DAP modificado proposto.	52
FIGURA 11 – Imagem do habitáculo do veículo com indicação do posicionamento dos microfones, da fonte de ruído e de sinal de voz.	57
FIGURA 12 – Relação entre μ e L para SNR de entrada saída do ANC igual a 5 dB Relação entre μ e L para SNR de entrada do ANC igual a 5 dB.	58
FIGURA 13 – Espectrograma do sinal de voz puro da vocalização SA1 TIMIT.	59
FIGURA 14 – Espectrograma do microfone de entrada d1.	59
FIGURA 15 – Espectrograma do microfone de entrada d2.	60
FIGURA 16 – Espectrograma de saída do ANC para entrada com SNR = 5 dB e $\mu=1$ e $L=1$	61
FIGURA 17 – SNR de saída em função dos parâmetros μ_1 e μ_2 para uma SNR de entrada igual a 5 dB	64
FIGURA 18 – SNR de saída em função do parâmetro μ_1 , para uma SNR de entrada igual a 5 dB, com $\mu_2 = 0,5$, $\delta_1 = \delta_2 = 10$ e $L = P = 10$	64
FIGURA 19 – Curva de SNR de saída pela variação de δ_1 e δ_2 , para uma SNR de entrada igual a 5 dB, com $L = P = 10$, $\mu_1 = 2$ e $\mu_2 = 0,50$	65
FIGURA 20 – Espectrograma de saída do algoritmo DAP para entrada com SNR=5 dB.	67
FIGURA 21 – Espectrograma de saída do algoritmo DAP para entrada com SNR=10 dB.	68
FIGURA 22 – Espectrograma de saída do algoritmo DAP para entrada com SNR=15 dB.	69
FIGURA 23 – Espectrograma de saída do algoritmo DAP para entrada com SNR=20 dB.	70
FIGURA 24 – Fronteira de Pareto execução inicial.	73
FIGURA 25 – Resultado Treinamento.	74
FIGURA 26 – Resultado Teste.	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Tabela Timit	41
TABELA 2 – Representação de indivíduos por cadeia binária	43
TABELA 3 – Representação de indivíduos por vetores de números reais	43
TABELA 4 – Cálculo das aptidões relativas para o método da roleta	44
TABELA 5 – Seleção utilizando o método da roleta	45
TABELA 6 – Tabela de resultados. Fonte: (GABREA, 2003b)	51
TABELA 7 – Tabela de resultados 1 Nisachon. Fonte: (THUMCHIRDCHUPONG; TANGSANGIUMVISAI, 2013)	52
TABELA 8 – Tabela de resultados 2 Nisachon. Fonte: (THUMCHIRDCHUPONG; TANGSANGIUMVISAI, 2013)	53
TABELA 9 – Distâncias de referência, no habitáculo do veículo, para cálculo do atraso de sinal entre os diferentes pontos de interesse	56
TABELA 10 – Resultados com maiores valores de SNR de saída obtidos no ANC .	58
TABELA 11 – SNR de saída quando a SNR de entrada é igual a 5 dB, para diferentes valores de P e L	61
TABELA 12 – SNR de saída quando a SNR de entrada é igual a 10 dB, para diferentes valores de P e L	62
TABELA 13 – SNR de saída quando a SNR de entrada é igual a 15 dB, para diferentes valores de P e L	62
TABELA 14 – SNR de saída quando a SNR de entrada é igual a 20 dB, para diferentes valores de P e L	63
TABELA 15 – SNR de saída variando μ_1 e μ_2 para SNR de entrada igual a 5 dB .	63
TABELA 16 – Valores de SNR de saída pela variação de δ_1 e δ_2 , para uma SNR de entrada igual a 5 dB, com $L = P = 10$, $\mu_1 = 2$ e $\mu_2 = 0,50$	65
TABELA 17 – Valores de SNR de saída pela variação de δ_1 e δ_2 , para entrada com SNR = 5 dB, $L = P = 10$, $\mu_1 = 2$ e $\mu_2 = 0,50$	65
TABELA 18 – Resultados de SNR de saída obtidos no algoritmo DAP com $L =$ $P = 10$, $\mu_1 = 1$ e $\mu_2 = 1$, $\delta_1 = 10$ e $\delta_2 = 10$	66
TABELA 19 – Valores de SNR de saída pela variação de L e p em um intervalo de 20 a 25, considerando as distâncias dos microfones, para uma SNR de entrada igual a 5 dB, com $\delta_1 = 7$, $\delta_2 = 3$, $\mu_1 = 2$ e $\mu_2 = 0,50$. . .	68
TABELA 20 – Valores de SNR de saída pela variação de L e p em um intervalo de 20 a 25, considerando a presença de reverberação, para uma SNR de entrada igual a 5 dB, com $\delta_1 = 7$, $\delta_2 = 3$, $\mu_1 = 2$ e $\mu_2 = 0,50$	69
TABELA 21 – Tabela Variação dos Parâmetros DAP para o AG	72
TABELA 22 – Tabela Variação dos Parâmetros DAP para o AG	73
TABELA 23 – Parâmetros indivíduo com maior SNR no resultado do treinamento .	75
TABELA 24 – Parâmetros indivíduo com maior SNR no resultado do teste	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Contextualização do problema	27
1.2	Problema Motivador e Soluções Propostas	28
1.3	Objetivos e Metas	29
1.4	Contribuições da Pesquisa	30
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS E TRABALHOS RELACIONADOS	33
2.1	Sistema de <i>Hands-free</i>	33
2.2	Técnicas de <i>Noise Reduction</i> NR	34
2.2.1	<i>Modelo de sinal em sistemas NR dual-microphone</i>	35
2.2.2	<i>Adaptive Noise Canceller (ANC)</i>	36
2.2.3	<i>Double Affine Projection(DAP)</i>	38
2.3	Base de dados TIMIT	40
2.4	Métricas de validação	41
2.5	Otimização Multiobjetivo	41
2.6	Dominância e fronteira de Pareto	42
2.7	Algoritmos evolucionários multiobjetivo	42
2.7.1	<i>Representação do indivíduo</i>	43
2.7.2	<i>Função de aptidão</i>	43
2.7.3	<i>Seleção dos indivíduos</i>	43
2.7.4	<i>Reprodução</i>	45
2.7.5	<i>Algoritmos evolucionários multiobjetivo baseados nos algoritmos evolucionários mono-objetivo</i>	46
2.7.6	<i>NSGA-II</i>	46
2.7.7	<i>Métricas de desempenho</i>	48
2.7.7.1	<i>Métrica C</i>	49
2.7.7.2	<i>Métrica do Hipervolume</i>	49
2.8	Trabalhos relacionados	50
3	ESTUDO EXPLORATÓRIO DA CALIBRAGEM DOS ALGORITMOS ANC E DAP	55
3.1	Modelo de Sinal à Entrada dos Microfones em Sistemas <i>Dual-Microphone</i>	55
3.2	Estudo exploratório 1	57
3.2.1	<i>Calibração dos parâmetros ANC</i>	57
3.2.2	<i>Calibração dos parâmetros DAP</i>	60

3.2.2.1	<i>Influência dos parâmetros L e p no algoritmo DAP</i>	60
3.2.2.2	<i>Influência dos parâmetros μ_1 e μ_2 no algoritmo DAP</i>	63
3.2.2.3	<i>Influência dos parâmetros δ_1 e δ_2 no algoritmo DAP</i>	65
3.2.2.4	<i>Resultados da Filtragem com o DAP</i>	66
3.3	Estudo exploratório 2	67
3.3.1	<i>Influência do atraso de sinal no DAP</i>	67
3.4	Estudo exploratório 3	69
3.4.1	<i>Influência da reverberação de sinal no DAP</i>	69
3.5	Conclusão	70
4	EXPERIMENTO DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO UTILIZANDO ALGORITMO GENÉTICO NSGAI E DAP	71
4.1	Estrutura do experimento	71
4.1.1	<i>Definições do treinamento</i>	72
4.1.2	<i>Determinação do número de gerações do experimento</i>	72
4.1.3	<i>Definições dos testes</i>	73
4.2	Resultados do Treinamento	74
4.3	Resultados do Teste	75
4.4	Conclusão	76
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	79