

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

APLICAÇÃO INTERATIVA EM PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO POR MÉTODO
DAS ESTRATÉGIAS DE EVOLUÇÃO

LUIZ HENRIQUE REIS DE JESUS

GOIÂNIA

2017

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS
DE TESES E
DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

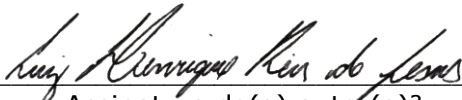
Nome completo do autor: Luiz Henrique Reis de Jesus

Título do trabalho: Aplicação Interativa em Processos de Otimização por Método das Estratégias de Evolução

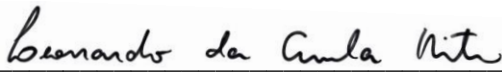
3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento ☒ **SIM** ☐ **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.


Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:


Assinatura do(a) orientador(a)²

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente
- Submissão de artigo em revista científica
- Publicação como capítulo de livro
- Publicação da dissertação/tese em livro

²A assinatura deve ser escaneada.

LUIZ HENRIQUE REIS DE JESUS

**APLICAÇÃO INTERATIVA EM PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO POR MÉTODO
DAS ESTRATÉGIAS DE EVOLUÇÃO**

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação – EMC UFG, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO
ORIENTADOR: PROF. DR. LEONARDO DA CUNHA BRITO

GOIÂNIA

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Jesus, Luiz Henrique Reis de

Aplicação Interativa em Processos de Otimização por Método das
Estratégias de Evolução [manuscrito] / Luiz Henrique Reis de Jesus. -
2017.

68 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola
de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia,
2017.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de
figuras, lista de tabelas.

1. Alto-falante. 2. Análises de funções mono-objetivo e multi
objetivo. 3. Estratégias de Evolução. 4. Interface Gráfica. 5. Otimização
Interativa. I. Brito, Leonardo da Cunha, orient. II. Título.

CDU 621.3



Ata de Defesa de Dissertação de Mestrado

Ata da sessão de julgamento da Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação, área de concentração Engenharia Elétrica, do candidato **Luiz Henrique Reis de Jesus** realizada em 15 de maio de 2017.

Aos quinze dias do mês de maio de dois mil e dezessete, às 14:00 horas, na sala Caryocar Brasiliensis nas dependências da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Universidade Federal de Goiás (UFG), reuniram-se os seguintes membros da Comissão Examinadora designada pela Coordenadoria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação: os Doutores Leonardo da Cunha Brito – Orientador (EMC/UFG), Geyverson Teixeira de Paula - (EMC/UFG) e Cacilda de Jesus Ribeiro - (EMC/UFG), para julgar a Dissertação de Mestrado de **Luiz Henrique Reis de Jesus**, intitulada **“Aplicação Interativa em Processos de Otimização por Método das Estratégias de Evolução”**, apresentada pelo candidato como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre, em conformidade com a regulamentação em vigor. O Professor Doutor Leonardo da Cunha Brito, Presidente da Comissão, abriu a sessão e apresentou o candidato que discorreu sobre seu trabalho, após o que, foi arguido pelos membros da Comissão na seguinte ordem: Geyverson Teixeira de Paula e Cacilda de Jesus Ribeiro. A parte pública da sessão foi então encerrada e a Comissão Examinadora reuniu-se em sessão reservada para deliberar. A Comissão julgou então que o candidato, tendo demonstrado conhecimento suficiente, capacidade de sistematização e argumentação sobre o tema de sua Dissertação, foi considerado **aprovado** e deve satisfazer as exigências listadas na Folha de Modificação, em anexo a esta Ata, no prazo máximo de 60 dias, ficando o professor orientador responsável por atestar o cumprimento dessas exigências. Os membros da Comissão Examinadora descreveram as justificativas para tal avaliação em suas respectivas Folhas de Avaliação, anexas a esta Ata. Nada mais havendo a tratar, o presidente da Comissão declarou encerrada a sessão. Nos termos do Regulamento Geral dos Cursos de Pós-graduação desta Universidade, a presente Ata foi lavrada, lida e, julgada conforme, segue assinada pelos membros da Comissão supracitados e pelo candidato. Goiânia, 15 de maio de 2017.

Comissão Examinadora designada:

Leonardo da Cunha Brito
Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito – Orientador (EMC/UFG) (Avaliação: Aprovado)

Paulo
Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula – EMC/UFG (Avaliação: Aprovado)

Ribeiro
Profa. Dra. Cacilda de Jesus Ribeiro - EMC/UFG (Avaliação: Aprovado)

Prof. Dr. Adson Silva Rocha – IF Goiano (Avaliação: _____)

Prof. Dr. Gélson da Cruz Júnior - EMC/UFG (Avaliação: _____)

Candidato

Luiz Henrique Reis de Jesus
Luiz Henrique Reis de Jesus

Dedico este trabalho à minha família e amigos pelo apoio irrestrito durante mais esta jornada acadêmica. Dedico também ao amigo e orientador Leonardo Brito, fundamental no desenvolvimento deste projeto, bem como todos os professores que participaram desta etapa de minha formação. Por fim, e acima de tudo, a Deus, pela orientação em todos os campos da vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Leonardo da Cunha Brito pela orientação, sugestão e confiança a mim atribuídos, para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço-o também pelos conhecimentos apresentados em sala sobre heurísticas modernas, fundamental para a execução desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Rodrigo Pinto Lemos e ao Professor Dr. Antônio Melo de Oliveira pelos incentivos ao prosseguimento na carreira acadêmica, assim como o fornecimento das cartas de recomendações para meu ingresso no mestrado.

Aos Professores Drs. que nos concederam com seus conhecimentos apresentados em sala de aula.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo suporte financeiro em todo período de desenvolvimento desta pesquisa.

E a todos que direta ou indiretamente participaram da minha formação, o meu muito obrigado.

“Um bom mecanismo supera uma centena de bons planos. ”

Robert K. Cooper

RESUMO

Esta dissertação de mestrado descreve uma abordagem do processo de otimização interativa associado ao método das Estratégias de Evolução para a avaliação do projeto de otimização do alto-falante, com o objetivo de apresentar as vantagens alcançadas após as intervenções do usuário ao longo do processo de otimização. Seu desenvolvimento é baseado na metodologia das Estratégias de Evolução caracterizada pelo conceito de seleção natural, o qual utiliza de métodos de combinação e mutação para a geração de novos indivíduos. No entanto, para maior eficiência nas respostas a função objetivo, bem como a redução em seu tempo de convergência, o processo de otimização necessita de intervenções em estabilizações de mínimos e máximos locais. Nas intervenções disponibilizadas ao usuário, serão consideradas manipulações nos operadores de mutação e combinação, mutação dos parâmetros de auto-adaptação, bem como a mudança de objetivo e a variação de sua respectiva restrição. Como diferencial, foi desenvolvida uma interface para viabilizar as intervenções do usuário aplicadas ao processo de otimização, bem como o acompanhamento de todo o processo. Neste trabalho, também foram avaliadas funções de teste de otimização com o objetivo de validar a metodologia proposta.

Palavras-chave: Alto-falante, Análises de Funções Mono-objetivo e Multi-objetivo, Estratégias de Evolução, Interface Gráfica, Otimização Interativa.

ABSTRACT

This dissertation of master degree describes an approach of the interactive optimization process associate to the Evolution Strategies method for the evaluation of the loudspeaker optimization project, with the objective to present the advantages achieved after the user interventions throughout the optimization process. Its development is based on the methodology of the Evolution Strategies characterized by the concept of natural selection, which uses combination and mutation methods to generate new individuals. However, for greater efficiency in the responses of the objective function, as well as the reduction in its convergence time, the optimization process requires interventions in stabilization of local minima and maxima. In the interventions made available to the user, will be considered manipulations in the operators of mutation and combination, mutation of the parameters of self-adaptation, as well as the change of objective and the variation of their respective restriction. As a differential, an interface was developed to make feasible the user interventions applied to the optimization process, as well as the monitoring of the entire process. In this work, also evaluated optimization test functions with the objective of validating the proposed methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Avaliação de um modelo do projeto alto-falante.....	20
Figura 2.2 - Disposição das variáveis estruturais do alto-falante.	21
Figura 2.3 - Estrutura do alto-falante 3D.	21
Figura 2.4 - Disposição das variáveis estruturais do alto-falante (otimização parcial).	23
Figura 3.1 - Estratégia de adaptação Log-normal para $n = 2$	28
Figura 3.2 - Interface Gráfica do Usuário.	30
Figura 3.3 - Função distribuição acumulada - Função Ackley.....	34
Figura 3.4 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Ackley.	34
Figura 3.5 - Função distribuição acumulada - Função Griewank.....	35
Figura 3.6 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Griewank.	36
Figura 3.7 - Função distribuição acumulada - Função Rastrigin.....	37
Figura 3.8 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Rastrigin.	37
Figura 3.9 - Função distribuição acumulada - Função Schwefel.....	38
Figura 3.10 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Schwefel.	39
Figura 3.11 - Função distribuição acumulada - Função Sphere.	40
Figura 3.12 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Sphere.	40
Figura 3.13 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial mono- objetivo).....	42
Figura 3.14 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização parcial mono-objetivo).	42
Figura 3.15 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa mono- objetivo).....	43
Figura 3.16 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização completa mono-objetivo).....	44

Figura 3.17 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (3) sem a inserção de indivíduos).	46
Figura 3.18 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (3) sem a inserção de indivíduos).	46
Figura 3.19 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (3) com a inserção de indivíduos).	47
Figura 3.20 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (3) com a inserção de indivíduos).	48
Figura 3.21 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (4) sem a inserção de indivíduos).	49
Figura 3.22 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (4) sem a inserção de indivíduos).	50
Figura 3.23 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (4) com a inserção de indivíduos).	51
Figura 3.24 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (4) com a inserção de indivíduos).	51
Figura 3.25 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (3) sem a inserção de indivíduos).	53
Figura 3.26 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (3) sem a inserção de indivíduos).	53
Figura 3.27 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (3) com a inserção de indivíduos).	54
Figura 3.28 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (3) com a inserção de indivíduos).	55
Figura 3.29 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (4) sem a inserção de indivíduos).	56

Figura 3.30 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (4) sem a inserção de indivíduos).....	57
Figura 3.31 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi- objetivo (4) com a inserção de indivíduos).	58
Figura 3.32 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (4) com a inserção de indivíduos).....	58
Figura 3.33 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi- objetivo (3) melhores casos).....	60
Figura 3.34 - Mudança de objetivo com a inserção de indivíduos (1º Caso).....	62
Figura 3.35 - Mudança de objetivo com a inserção de indivíduos (2º Caso).....	63
Figura 3.36 - Mudança de objetivo sem a inserção de indivíduo (3º Caso).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Materiais utilizados no projeto alto-falante.	20
Tabela 2.2 - Limites do espaço de busca.....	22
Tabela 2.3 - Características das funções de teste de otimização.	24
Tabela 3.1 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Ackley.....	34
Tabela 3.2 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Griewank.....	36
Tabela 3.3 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Rastrigin.....	37
Tabela 3.4 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Schwefel.	38
Tabela 3.5 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Sphere.	40
Tabela 3.6 - Probabilidade de ocorrência de mínimos do projeto Alto-falante (otimização parcial mono-objetivo).....	42
Tabela 3.7 - Probabilidade de ocorrência de mínimos do projeto Alto-falante (otimização completa mono-objetivo).....	44
Tabela 3.8 - Probabilidade de ocorrência de volumes do projeto Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo sem a inserção de indivíduos).....	46
Tabela 3.9 - Probabilidade de ocorrência de volumes do projeto Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo com a inserção de indivíduos).	48
Tabela 3.10 - Probabilidade de ocorrência de densidades de fluxo magnético do projeto Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo sem a inserção de indivíduos).	49
Tabela 3.11 - Probabilidade de ocorrência de densidades de fluxo magnético do projeto Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo com a inserção de indivíduos).....	51
Tabela 3.12 - Probabilidade de ocorrência de volumes do projeto Alto-falante (otimização completa multi-objetivo sem a inserção de indivíduos).	53
Tabela 3.13 - Probabilidade de ocorrência de volumes do projeto Alto-falante (otimização completa multi-objetivo com a inserção de indivíduos).....	55
Tabela 3.14 - Probabilidade de ocorrência de densidades de fluxo magnético do projeto Alto-falante (otimização completa multi-objetivo sem a inserção de indivíduos).....	56
Tabela 3.15 - Probabilidade de ocorrência de densidades de fluxo magnético do projeto Alto-falante (otimização completa multi-objetivo com a inserção de indivíduos). ...	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EE	Estratégias de Evolução
FDA	Função Distribuição Acumulada
FEMM	Finite Element Method Magnetics
GUI	Graphical User Interface

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Introdução	14
1.2	Objetivo	15
1.3	Estrutura do Trabalho	15
2	DEFINIÇÃO DE PROBLEMAS E MÉTODO DE AVALIAÇÃO	17
2.1	Aplicação da Interatividade em Processos de Otimização	17
2.2	Processo de Otimização	18
2.3	Definição dos Problemas Avaliados	18
2.3.1	Projeto Alto-falante	18
2.3.2	Funções de Teste de Otimização	23
2.4	Estratégias de Evolução	25
3	ADEQUAÇÃO E APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO INTERATIVA	27
3.1	Metodologia Proposta	27
3.2	Interface Gráfica	29
3.2.1	Configuração Inicial da Interface	31
3.3	Estratégias de Avaliação	31
3.4	Avaliação dos Casos e Resultados	32
3.4.1	Funções Mono-objetivo	33
3.4.1.1	Funções de Teste de Otimização	33
3.4.1.1.1	Função Ackley	33
3.4.1.1.2	Função Griewank	35
3.4.1.1.3	Função Rastrigin	36
3.4.1.1.4	Função Schwefel	38
3.4.1.1.5	Função Sphere	39

3.4.1.2	Projeto Alto-falante.....	41
3.4.1.2.1	Alto-falante (Otimização Parcial)	41
3.4.1.2.2	Alto-falante (Otimização Completa).....	43
3.4.2	Função Multi-objetivo	44
3.4.2.1	Alto-falante (Otimização Parcial).....	45
3.4.2.1.1	Minimização do Volume Total Sem a Inserção de Indivíduos... ..	45
3.4.2.1.2	Minimização do Volume Total Com a Inserção de Indivíduos.. ..	47
3.4.2.1.3	Maximização da Densidade de Fluxo Magnético Sem a Inserção de Indivíduos	48
3.4.2.1.4	Maximização da Densidade de Fluxo Magnético Com a Inserção de Indivíduos	50
3.4.2.2	Alto-falante (Otimização Completa).....	52
3.4.2.2.1	Minimização do Volume Total Sem a Inserção de Indivíduos... ..	52
3.4.2.2.2	Minimização do Volume Total Com a Inserção de Indivíduos.. ..	54
3.4.2.2.3	Maximização da Densidade de Fluxo Magnético Sem a Inserção de Indivíduos	55
3.4.2.2.4	Maximização da Densidade de Fluxo Magnético Com a Inserção de Indivíduos	57
3.4.3	Comparação dos Melhores Resultados	59
3.4.4	Avaliação com Alteração de Objetivo	60
3.4.4.1	Análise do 1º Caso Com a Inserção de Indivíduos	61
3.4.4.2	Análise do 2º Caso Com a Inserção de Indivíduos	62
3.4.4.3	Análise do 3º Caso Sem a Inserção de Indivíduos.....	63
4	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O campo relacionado à interatividade do homem com processos de otimização cresce consideravelmente [5] [7] [10] [12], apresentando novos métodos de intervenções com uma melhora na eficiência e uma redução em seu custo operacional. Pesquisas com elevado grau de complexidade, ou mesmo aquelas em que não exista um conhecimento explícito, podem ocasionar-se em estruturas com trabalhosas implementações (descontínuas, multimodais, não lineares), sendo necessárias adequações naquelas que melhor se corresponde ao perfil do problema.

Estratégias de Evolução é um método de otimização pertencente ao grupo dos algoritmos evolutivos de domínio da computação evolucionária. Os algoritmos evolutivos são caracterizados por procedimentos naturais, heurísticos ou estocásticos, que usufruem somente de informações da função objetivo a ser otimizada, almejando à solução ótima por meio de especificações de probabilidades empregadas de forma aleatória direcionada [14] [16].

Fundamentada na concepção de seleção natural e na genética da população, as Estratégias de Evolução utilizam-se de operadores de mutação, combinação e seleção, para a maximização de adequação às escolhas de soluções no âmbito de uma função objetivo [17]. No entanto, o processo de otimização necessita de intervenções ao longo de suas avaliações para que se obtenham maiores eficiências na solução ótima e menores perdas em seu tempo de convergência.

Deste modo, a interação do homem durante o processo de otimização se torna essencial para que sejam realizadas as modificações preventivas e/ou corretivas da população de indivíduos que está sendo construída.

Esta dissertação apresenta a aplicação de interatividade do homem (usuário) em processos de otimização, bem como os efeitos alcançado pela intervenção ao longo do processo iterativo. São avaliadas funções de teste para otimização mono-objetivo, tal como a otimização do projeto alto-falante, avaliada tanto na forma mono-objetivo quanto multi-objetivo, utilizando-se das Estratégias de Evolução.

1.2 Objetivo

O objetivo deste projeto de mestrado está relacionado com os benefícios que a intervenção do usuário exerce no processo de otimização de um problema específico, sendo o projeto de otimização do alto-falante, auxiliado pela metodologia das Estratégias de Evolução.

A aplicação da intervenção do usuário no processo de otimização é realizada tanto por meio da metodologia abordada, quanto através da função avaliada, disponibilizando ao usuário a manipulação nos operadores da metodologia (combinação e mutação), a possibilidade da inserção ou manipulação das soluções durante o processo iterativo, ou ainda através da mudança de objetivo do problema, tal como a manipulação em suas respectivas restrições.

As intervenções disponibilizadas ao usuário são realizadas apenas em momentos de estabilizações, pois se trata de um problema de otimização o qual não se conhece a solução ótima. Com isso, a manipulação de dados em momentos distintos aos de estabilizações, podem direcionar os indivíduos em desenvolvimento a seus mínimos/máximos locais ou mesmo afastá-los do mínimo/máximo global, posto que os incrementos realizados pelo usuário terão como alvo indivíduos com seus genótipos e parâmetros auto-adaptativos em formação.

Além de propor uma eficiência em encontrar o melhor indivíduo em um menor tempo para a função avaliada, a interatividade do usuário proposta neste trabalho permite uma maior flexibilidade em torno da solução ótima, disponibilizando ao usuário a validação de qualquer resposta durante o processo evolutivo como satisfatória, conforme suas especificações e restrições.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é dividido em quatro capítulos os quais são apresentados a formulação do problema alvo avaliado, os embasamentos teóricos que asseguram a hipótese, a proposta para a interatividade nos processos de otimização, a aplicação do método, os resultados alcançados com a aplicação em estudos de casos e a conclusão do trabalho.

No Capítulo 1 apresenta-se os problemas e defini o objetivo do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se o que já foi desenvolvido sobre o tema, à pesquisa bibliográfica sobre os problemas avaliados e o embasamento teórico para o desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 3 é apresentado a adequação da metodologia abordada aos problemas avaliados e ao processo interativo, bem como os resultados alcançados para os casos das estratégias de avaliação.

Por fim, no Capítulo 4 tem-se as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 DEFINIÇÃO DE PROBLEMAS E MÉTODO DE AVALIAÇÃO

2.1 Aplicação da Interatividade em Processos de Otimização

Determinados problemas de otimização demonstram não serem satisfatoriamente solucionados por meio apenas de métodos iterativos. Como exemplo destes problemas é a programação de horários de aula de uma universidade [12], em que não podem ocorrer conflitos em reservas de salas de aula, e que deverão ser satisfeitos as preferências de horário propostas pelos professores em seu maior número. Neste caso, a intervenção do homem é fundamental ao processo de otimização.

Os benefícios da intervenção humana nos processos de otimização foram observados na aplicação de diversas metodologias avaliativas, nas quais a interatividade do usuário acrescenta condições à metodologia abordada, repara ou aceita soluções previamente encontradas ou mesmo coordena os aspectos disponíveis do problema.

Neste contexto, a interatividade nas Estratégias de Evolução proposta por [5], avalia o melhor desempenho entre os diversos meios de intervenções executadas pelo usuário, comparando os efeitos entre intervenção humana, realizada com base na avaliação subjetiva, e seleção determinística, executada por meio da seleção do melhor indivíduo obtido pela máquina, ilustrando através de estudos de casos o tempo de convergência e consequentemente os benefícios que a interação humana agrega na aplicação da proposta. A proposta é definida como o redesenho das cores RGB (Sistema de cores aditivas compostas por vermelho, verde e azul), sendo ampliado ao uso de padrões de cores e não somente a uma única cor.

Na proposta [7], o processo de otimização interativa é desenvolvido nas simulações de evolução natural, o qual é pontuado pela seleção de indivíduos, realizadas pelo usuário, que irão sobreviver e posteriormente se reproduzir, constituindo uma nova população com evoluções estruturais verificado em plantas e animais, expondo soluções para eventuais problemas de paleontologia (referente à formação dos seres vivos, bem como o seu desenvolvimento) e ontogenia (mudanças estruturais de células ou organismos). Assim, a proposta demonstra que a interatividade da evolução artificial auxilia paleontólogos na solução de problemas de identificação de possíveis ausências de estruturas, fornecendo um método para gerar conjecturas restritas referentes às lacunas nos dados evolutivos.

2.2 Processo de Otimização

Processo de otimização faz referência ao estudo de métodos aptos em estabelecer as melhores configurações possíveis para a construção ou funcionamento de sistemas de interesse, ou seja, são análises que buscam minimizar ou maximizar a função objetivo através da otimização de seus respectivos parâmetros.

A formulação das características de um problema o qual se deseja otimizar, é realizada através da definição do modelo do processo de otimização e de suas restrições, conforme apresentadas em (1) e (2) respectivamente [11].

$$x^* = \arg \min_x f(x) \quad \text{ou} \quad x^* = \arg \max_x f(x) \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a: } \begin{cases} g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, p \\ h_i(x) = 0, i = 1, \dots, p \end{cases} \quad (2)$$

Assim, após a formulação das características do problema, inicia-se sua aplicação ao processo de otimização.

2.3 Definição dos Problemas Avaliados

2.3.1 Projeto Alto-falante

O projeto Alto-falante é tido como problema principal nas avaliações deste trabalho, o qual relaciona a aplicação da interatividade do usuário na metodologia das Estratégias de Evolução.

O paradigma associa ferro e ímã em sua estrutura, embasada em um protótipo a princípio proposto por Infolytica Corporation [9].

Para a avaliação deste projeto, foi especificada a redução em suas medidas estruturas, mantendo a densidade de fluxo magnético $\mathbf{B}$ igual ou superior a uma densidade de fluxo magnético mínima $\mathbf{B}_{min}$, de 0,5 T, necessária para o funcionamento do alto-falante. A redução do volume da estrutura ferro-ímã refere-se exclusivamente aos custos obtidos com a produção

do modelo, principalmente em relação ao ímã permanente, o qual corresponde a maior parcela dos gastos com materiais utilizados em sua estrutura.

Como diferencial, foi proposto ao projeto de otimização do alto-falante o objetivo da maximização da densidade de fluxo magnético, mantendo a variação de seu volume total entre o percentual especificado pelo usuário. O projeto é descrito matematicamente em (3) e (4) [9]:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= volume \\ \text{Sujeito a, } g(x): |B| &\geq B_{min} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \max f(x) &= B \\ \text{Sujeito a, } g(x): volume &\pm \% \end{aligned} \quad (4)$$

Sendo que, o *volume* representa a soma total do volume das partes do alto-falante (ferro e ímã) e **B** sua densidade de fluxo magnético.

Além da metodologia aqui abordada, fez-se necessário a utilização de um “software” auxiliar de análises numéricas, Método dos Elementos Finitos Magnéticos *FEMM* 4.2 [13], para a elaboração e avaliação do modelo após o fornecimento de suas medidas estruturais, bem como a obtenção dos dados dos materiais empregados nesta proposta.

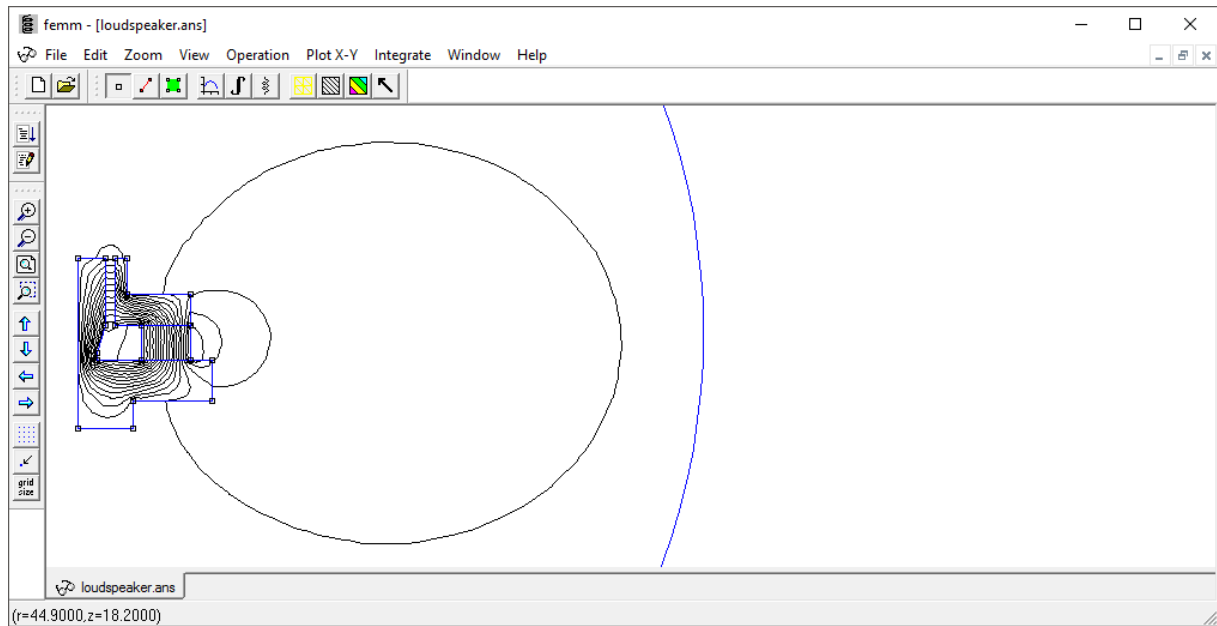
O “software” além de permitir a criação do próprio projeto a ser avaliado, fornece ao usuário uma biblioteca com modelos pré-elaborados, tal como as características físicas dos possíveis materiais utilizados para a construção dos modelos das áreas de sua abordagem, dos quais envolvem problemas relacionados a magnetismo, fluxo de calor, fluxo de corrente e eletrostática.

A ideia principal do *FEMM* 4.2 consiste em dividir o domínio do problema em sub-regiões de geometria simples (formato cúbico, triangular, quadrilateral, entre outros), possibilitando a obtenção de uma solução analítica exata utilizando métodos algébricos.

Assim, uma vez definida a estrutura do alto-falante no processo de otimização, é então enviada a *FEMM* 4.2 os parâmetros para o dimensionamento do modelo. O “software” então avalia o modelo, obtendo seu volume e a densidade de fluxo magnético no entreferro, definida pela dimensão x_9 , retornando à metodologia as medidas de densidade de fluxo magnético e do volume total do alto-falante (volume da estrutura ferro-ímã).

A Figura 2.1 ilustra a interface do “software” *FEMM* 4.2 após a avaliação de um modelo para o projeto alto-falante.

Figura 2.1 - Avaliação de um modelo do projeto alto-falante.



Fonte: Print screen da aplicação FEMM 4.2.

A Tabela 2.1 [13] apresenta as características dos materiais utilizados na construção deste modelo.

Tabela 2.1 - Materiais utilizados no projeto alto-falante.

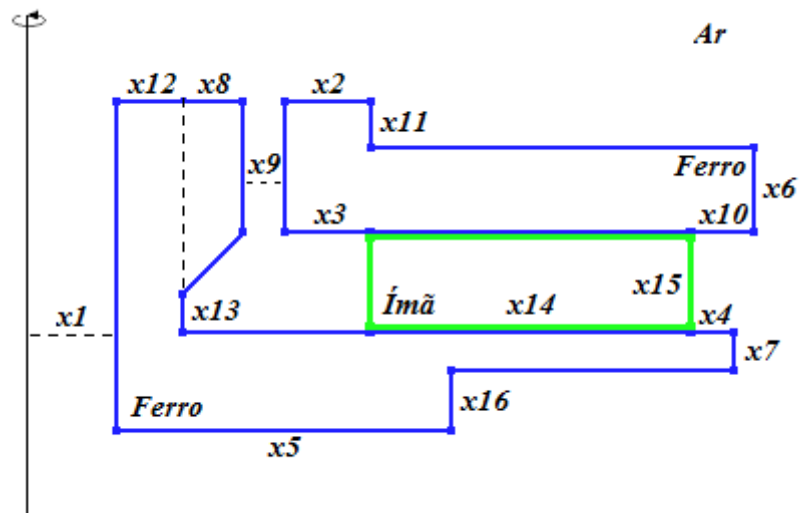
Material	Ar	Ferro	Ímã
μ_r	1,0	-	-
Campo Magnético H_c [A/m]	0,0	0,0	191262
Condutância σ [MS/m]	0,0	10,44	0,0

Fonte: Elaborada a partir das referências [9] e [13].

Como requisitos do processo de minimização do volume total do alto-falante, ou mesmo a maximização da densidade de fluxo magnético proposta neste trabalho, apresentado em (3) e (4), é postulado que o modelo se mantenha entre limites estabelecidos para as variáveis de sua estrutura, ilustradas na Figura 2.2.

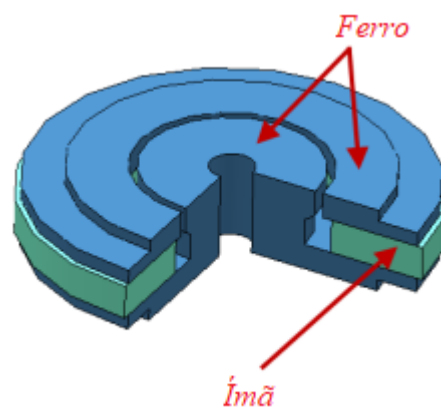
A Tabela 2.2 [9] apresenta os limites a serem cumpridos no processo.

Figura 2.2 - Disposição das variáveis estruturais do alto-falante.



Fonte: Print screen do modelo do alto-falante obtido na aplicação Matlab®.

Figura 2.3 - Estrutura do alto-falante 3D.



Fonte: www.infolytica.com.

Tabela 2.2 - Limites do espaço de busca.

Variável	Mínimo [mm]	Máximo [mm]	Fixo [mm]
x_1	3,0	12,0	5,0
x_2	1,0	4,0	3,0
x_3	1,0	4,0	2,0
x_4	0,0	3,0	1,5
x_5	5,0	15,0	7,0
x_6	2,0	5,0	4,0
x_7	1,0	10,0	2,0
x_8	1,0	3,0	2,0
x_9	0,5	2,0	1,0
x_{10}	0,0	3,0	1,0
x_{11}	1,0	5,0	2,0
x_{12}	2,0	5,0	2,0
x_{13}	0,0	2,0	1,0
x_{14}	5,0	12,0	7,0
x_{15}	2,0	5,0	4,0
x_{16}	1,0	5,0	2,0

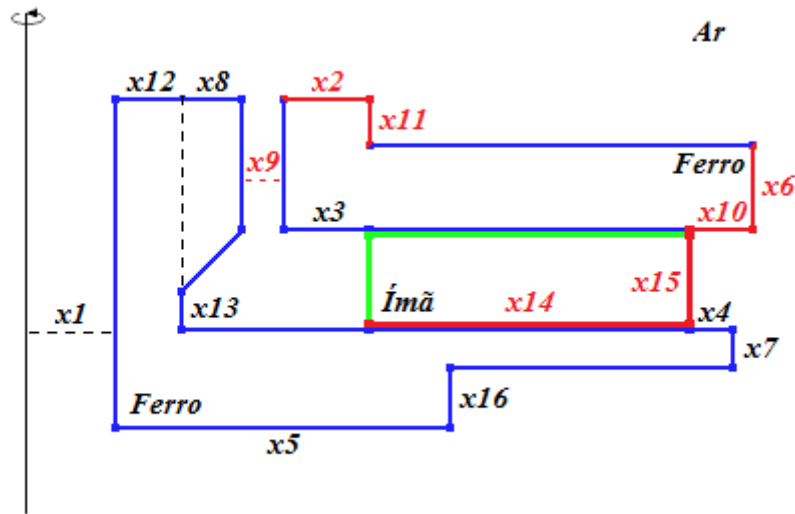
Fonte: Elaborada a partir da referência [9].

Neste trabalho, o processo avaliativo do projeto alto-falante é composto de duas etapas de avaliação.

Em sua primeira etapa, definida como otimização parcial, são otimizadas apenas 7 variáveis de sua estrutura, sendo-as x_2 , x_6 , x_9 , x_{10} , x_{11} , x_{14} e x_{15} . As variáveis complementares são mantidas fixas conforme descrito na Tabela 2.2. A Figura 2.4 ilustra a estrutura do alto-falante, destacando as dimensões que serão otimizadas nesta etapa.

Em sua segunda etapa de avaliação, caracterizada pela otimização completa, tem-se as 16 variáveis de sua estrutura otimizadas, conforme ilustra a Figura 2.2.

Figura 2.4 - Disposição das variáveis estruturais do alto-falante (otimização parcial).



Fonte: Print screen do modelo do alto-falante obtido na aplicação Matlab®.

2.3.2 Funções de Teste de Otimização

As funções de teste de otimização avaliadas neste trabalho [19 - 21] foram selecionadas com o objetivo de validar a metodologia proposta, aplicando-a em comportamentos distintos aos apresentados no problema principal (projeto alto-falante).

Assim, as funções selecionadas foram avaliadas de forma mono-objetivo, almejando a minimização de suas respectivas funções, onde X refere-se à estrutura do indivíduo avaliado e n à quantidade de parâmetros de cada indivíduo. Como forma de padronizar a estrutura dos indivíduos, considerou-se para as análises das funções de teste de otimização a mesma estrutura adotada no projeto alto-falante, com 16 parâmetros a serem otimizados ($n = 16$).

A. Função Ackley:

Distinguida por apresentar um grande vale centralizado em uma superfície quase plana.

$$f(X) = -ae^{\left(-b\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}\right)} - e^{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(cx_i)\right)} + a + e^1 \quad (5)$$

B. Função Griewank:

Reconhecida pela semelhança de seus mínimos locais dispostos regularmente.

$$f(X) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1 \quad (6)$$

C. Função Rastrigin:

Similarmente à *Griewank*, *Rastrigin* é definida pelos diversos mínimos locais distribuídos em uma superfície regular, contudo, em escalas diferenciadas.

$$f(X) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)] \quad (7)$$

D. Função Schwefel:

Representada por numerosos mínimos locais distribuídos de formas complexas.

$$f(X) = 418,9829n - \sum_{i=1}^n x_i \sin(\sqrt{|x_i|}) \quad (8)$$

E. Função Sphere:

Reconhecida pela forma contínua, convexa e unimodal.

$$f(X) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (9)$$

A Tabela 2.3 apresenta as características das funções descritas acima.

Tabela 2.3 - Características das funções de teste de otimização.

Função	Forma	Simetria	Continuidade
<i>Ackley</i>	Multimodal	Simétrica	Contínua
<i>Griewank</i>	Multimodal	Simétrica	Contínua
<i>Rastrigin</i>	Multimodal	Simétrica	Contínua
<i>Schwefel</i>	Multimodal	Assimétrica	Contínua
<i>Sphere</i>	Unimodal	Simétrica	Contínua

Fonte: Elaborada a partir das referências [19 - 21].

2.4 Estratégias de Evolução

As Estratégias de Evolução (EE) surgiram em meados da década de 1960, proposto pelos alemães I. Rechenberg e H. P. Schwefel, com o propósito de maximizar a adequação de candidatos às soluções de uma função objetivo. Para tal, as EE usufruem de métodos de combinação e mutação utilizados tanto para a busca no espaço de soluções, quanto para a busca no espaço dos parâmetros auto-adaptativos, tendo em ambos os casos um agente de seleção determinístico.

Em sua primeira versão, o processo de busca era caracterizado como $(1 + 1) - EE$, ou seja, um único genitor gerava um único descendente, que quando confrontados em uma competição pela sobrevivência, permanecia aquele com as melhores características. Nesta versão, observou-se que o processo de convergência era lento, com grandes possibilidades de estagnações em mínimos locais.

Na sua segunda versão, caracterizada como $(\mu + 1) - EE$, o processo de busca propiciava a combinação de μ genitores para a geração de um único descendente, incrementando nesta versão o método de combinação, tendo no final deste processo a eliminação de um único indivíduo com as piores características.

Fundamentada na versão anterior, a terceira versão conhecida como $(\mu + \lambda) - EE$, proporcionava em seu processo de busca a combinação de μ genitores para geração de λ descendentes, selecionando para a composição de uma nova população os melhores μ indivíduos dentre os μ genitores e os λ descendente. Com isto, o processo de busca permitia a fuga dos pontos de mínimos locais auto adaptando os parâmetros da estratégia em busca da solução ótima. Em variação a esta versão, caracterizada como $(\mu, \lambda) - EE$, o processo de busca proporcionava a combinação de μ genitores para a geração de λ descendentes, em que a quantidade de descendentes é necessariamente maior que a quantidade de genitores, ou seja, $\lambda > \mu$, selecionando os melhores μ indivíduos apenas entre os λ descendentes, limitando o período de vida de cada indivíduo a uma geração. Este tipo de processo apresenta bom desempenho em problemas em que a melhor solução está vinculada ao tempo, ou mesmo que seja afetada por ruídos [14 - 17].

As finalidades das EE às quais são abordadas neste trabalho estão vinculadas aos métodos de combinação e mutação, os quais terão intervenção do usuário, juntamente com o processo de seleção da população descendente, em que cada indivíduo carrega consigo

parâmetros que monitoram a variação de seus respectivos genótipos, manipulados dinamicamente a partir de seu comportamento [6], explicados no capítulo seguinte.

3 ADEQUAÇÃO E APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO INTERATIVA

3.1 Metodologia Proposta

Como mencionado anteriormente, a abordagem das EE é caracterizada por agregar nos indivíduos de sua população, parâmetros que supervisionam a variação de seus respectivos genótipos, ou seja, o tamanho do passo executado em direção ao objetivo do problema (parâmetros de auto-adaptação).

A equação (10) [11] [17] apresenta a estrutura de um indivíduo das EE, representada por dois vetores reais, especificado pelo seu genótipo x (características de sua estrutura formada por n genes), com seus respectivos parâmetros de auto-adaptação σ .

$$X^a = [x_1^a \ x_2^a \ x_3^a \ \dots \ x_n^a \mid \sigma_1^a \ \sigma_2^a \ \sigma_3^a \ \dots \ \sigma_n^a] \quad (10)$$

Com a estrutura do indivíduo definida, gera-se a população inicial com μ indivíduos e então os avalia, obtendo o resultado da fitness (função objetivo) para cada indivíduo.

A partir dos resultados adquiridos, são sorteados aleatoriamente dois indivíduos para o processo de combinação, resultando na geração do descendente X' . Neste trabalho, o processo de combinação dos vetores referentes aos pais se fez através do método de recombinação intermediária local, conforme descrita em (11) [11] [18]:

$$X' = \alpha X^a + (1 - \alpha) X^b \quad (11)$$

Sendo que, α corresponde a um número aleatório entre 0 e 1 obtido para cada processo de recombinação, e os índices a e b referentes ao pais selecionados.

Além da alteração dos parâmetros auto-adaptativos σ ocorridos no processo de combinação como parte da informação genética do indivíduo proposto por [17], os mesmos também estão suscetíveis ao processo de mutação, cujas equações referentes à mutação dos parâmetros auto-adaptativos e à mutação dos genótipos de cada indivíduo são dadas respectivamente em (12) e (13):

$$\sigma_i^{t+1} = \sigma_i^t e^{(\tau' N(0,1) + \tau N_i(0,1))} \quad (12)$$

$$\tau' \propto (2n)^{-1/2} \quad \tau \propto (4n)^{-1/4}$$

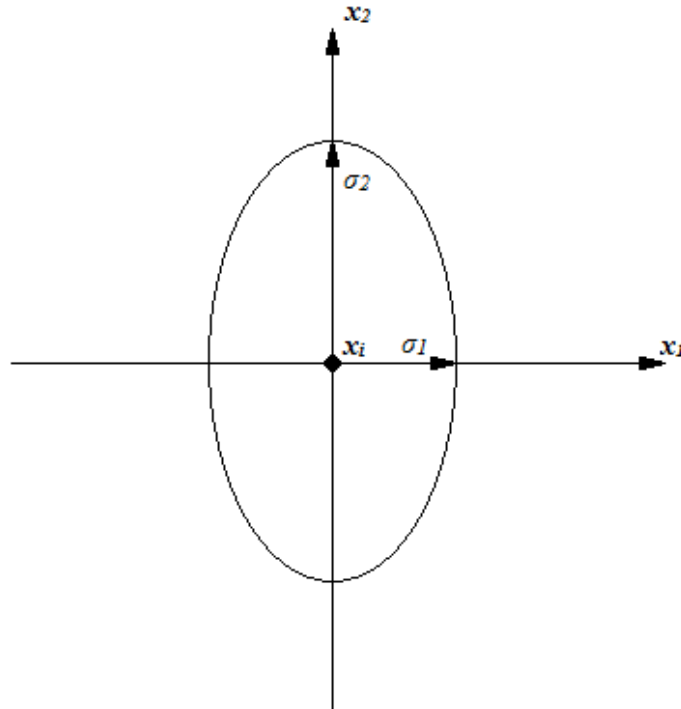
$$x_i^{t+1} = x_i^t + \sigma_i^{t+1} N_i(0,1) \quad (13)$$

Sendo que, $i = 1, \dots, n$, sendo n a quantidade de genes de cada indivíduo e $N(0,1)$ representando uma distribuição Gaussiana com média zero e desvio padrão unitário [2 - 4].

A mutação dos parâmetros auto-adaptativos σ é baseada na estratégia de adaptação Log-normal, onde o agente global τ' proporciona uma modificação completa na mutabilidade de seus parâmetros, e o agente local τ proporciona alterações individuais nos tamanhos dos passos [1] [8].

A Figura 3.1 ilustra seu comportamento para o indivíduo com 2 genes ($n = 2$).

Figura 3.1 - Estratégia de adaptação Log-normal para $n = 2$.



Fonte: Elaborada a partir da referência [1] [8].

Após essa etapa, obtêm-se os valores das fitness dos descendentes gerados, constituindo uma população provisória de $(\mu + \lambda)$ indivíduos, ou seja, formada pelos pais e seus descendentes, selecionando os melhores μ indivíduos para a composição da população seguinte.

Para as funções mono-objetivo, os indivíduos são organizados conforme seu único objetivo, selecionando aqueles melhores qualificados. Para as funções multi-objetivo, fez-se necessário o emprego do método de dominância de Pareto, o qual compara as soluções factíveis do problema, selecionando os indivíduos pertencentes ao grupo de soluções não dominadas ou Pareto-ótimas.

Após a execução de todas as etapas mencionadas, o processo iterativo (combinação, mutação e seleção) se repetia até que o número total de iterações fornecido pelo usuário fosse completado.

3.2 Interface Gráfica

Com uma proposta diferencial, este trabalho desenvolveu uma interface gráfica que proporciona a aplicação completa da interatividade do usuário aos processos de otimização, possibilitando a escolha da função a ser avaliada, a escolha do objetivo prioritário referente à função multi-objetivo, a alteração de percentuais de probabilidades exercidas em seus operadores, a inserção manual de indivíduos ao processo evolutivo, ilustrando os resultados de suas avaliações e de seus incrementos em tempo real, bem como o desempenho de todo o processo iterativo.

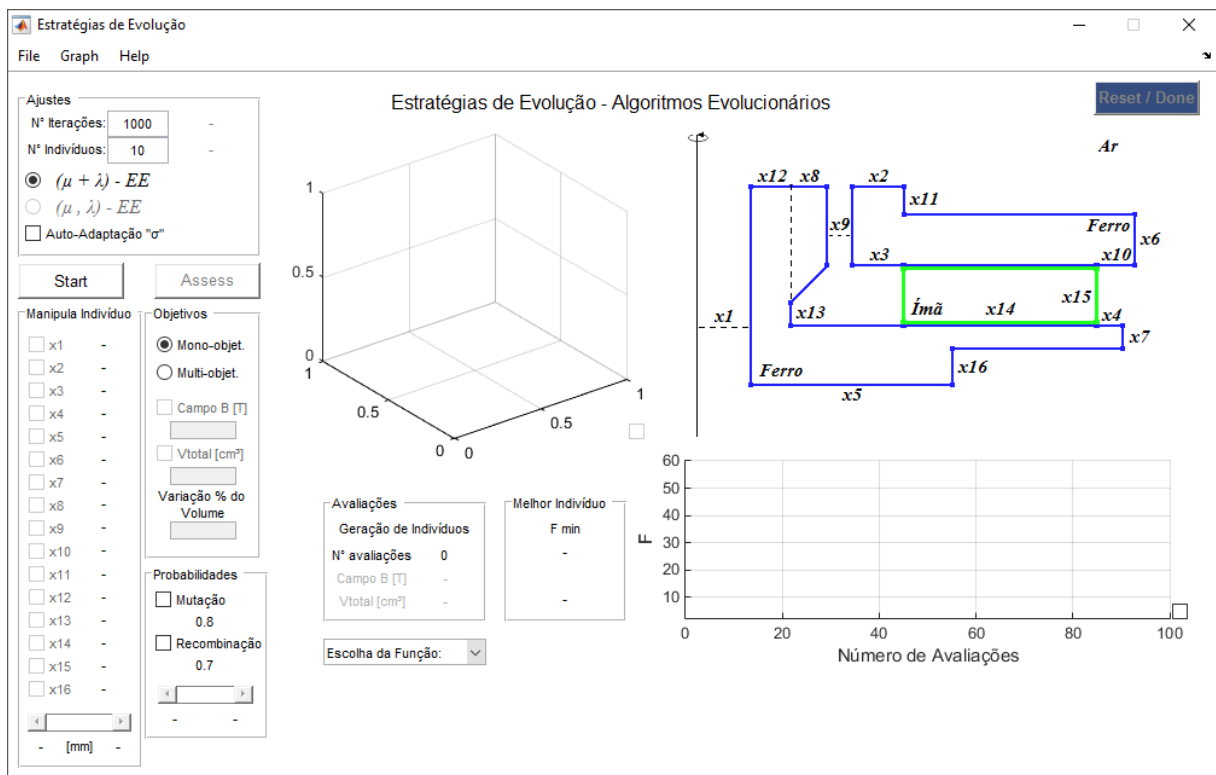
A interface interativa foi desenvolvida por meio do “software” Matlab[®], mediante a ferramenta GUI (“Graphical User Interface”), que disponibiliza elementos gráficos comportando a manipulação e obtenção de resultados.

A Figura 3.2 exibe a tela principal desenvolvida para a aplicação da interatividade proposta neste trabalho, com os respectivos campos de manipulação no qual:

- N° Iteração: número de repetições do processo à procura da melhor solução;
- N° Indivíduos: tamanho da população;
- Auto-Adaptação “ σ ”: seleção do recurso de mutação dos parâmetros auto-adaptativos, representado em (12);
- Manipula Indivíduo: destinado à inserção ou manipulação de indivíduos durante o processo iterativo;
- Objetivos (Mono-objetivo): minimização das funções de teste de otimização, bem como do projeto alto-falante;

- Objetivos (Multi-objetivo): possibilidade de escolha da restrição e consequentemente do objetivo a ser cumprido, apresentado em (3) e (4), para a avaliação do projeto alto-falante;
- Probabilidade de Mutação: probabilidade de indivíduos que irão se submeter ao processo de mutação, apresentado em (13); e
- Probabilidade de Recombinação: probabilidade de indivíduos formados através da recombinação intermediária local, apresentado em (11).

Figura 3.2 - Interface Gráfica do Usuário.



Fonte: Desenvolvida para este trabalho por meio da aplicação Matlab®.

Vale enfatizar que as modificações realizadas nos números de iterações e de indivíduos somente são definidas nas etapas iniciais ou em reinicialização de suas avaliações, bem como a escolha do objetivo (Mono-objetivo ou Multi-objetivo) e da função a ser avaliada. Diferentemente dos mesmos, os demais campos estão sujeitos às manipulações não somente nas etapas mencionadas, mas sempre após uma pausa momentânea na execução do processo avaliativo, realizada através do botão “Start”.

3.2.1 Configuração Inicial da Interface

Após a execução de várias avaliações relacionadas ao projeto de otimização do alto-falante, observou-se que os efeitos alcançados a partir da intervenção do usuário se compreendiam na região com ambas as probabilidades iguais ou superiores a 70%.

Assim, como recomendação para as avaliações realizadas neste trabalho, na qual as intervenções do usuário promovem impactos na busca pela solução ótima, configuraram-se os campos da interface gráfica mencionados anteriormente da seguinte maneira:

- N° Iterações: *1.000*;
- N° Indivíduos: *10*;
- Auto-Adaptação “ σ ”: *Desabilitada*;
- Probabilidade de Mutação: *80%*;
- Probabilidade de Recombinação: *70%*;

3.3 Estratégias de Avaliação

Após as configurações dos campos aplicadas, elaboraram-se as estratégias de avaliação para as funções mono-objetivo e multi-objetivo, segmentadas em casos como:

1º Caso:

- Auto-Adaptação “ σ ” – *Desabilitada*;
- Probabilidade de Mutação: *80% (aumento de 10% a cada estabilização)*;
- Probabilidade de Recombinação: *70% (aumento de 10% a cada estabilização)*;

2º Caso:

- Auto-Adaptação “ σ ” – *Habilitada*;
- Probabilidade de Mutação: *80% (aumento de 10% a cada estabilização)*;
- Probabilidade de Recombinação: *70% (aumento de 10% a cada estabilização)*;

Além dos casos das estratégias de avaliação definidos para a análise das funções abordadas neste trabalho, foram obtidos os desempenhos das mesmas sem a aplicação da

interatividade no processo de otimização. Nesta etapa, toda a população avaliada se sujeitou ao processo de mutação e recombinação, bem como à auto-adaptação σ de seus parâmetros durante todo o processo, como apresentado no caso a seguir:

3º Caso:

- Auto-Adaptação “ σ ” – *Habilitada*;
- Probabilidade de Mutação: *100%*;
- Probabilidade de Recombinação: *100%*;

Os casos mencionados foram considerados tanto para as análises das funções mono-objetivo, avaliando as funções de teste de otimização e o projeto alto-falante, quanto para as análises da função multi-objetivo, avaliando o projeto alto-falante.

Para os casos das estratégias de avaliação os quais a interatividade do usuário é aplicada (1º Caso e 2º Caso), foi implementado às suas intervenções a inserção e/ou manipulação de indivíduos no decorrer do processo evolutivo das análises da função multi-objetivo. Assim, suas avaliações apresentaram comportamentos tanto para a intervenção completa da interatividade do usuário (com inserção de indivíduos), quanto para a intervenção parcial do usuário (sem inserção de indivíduos).

3.4 Avaliação dos Casos e Resultados

Nas etapas seguintes, foram realizadas análises para as funções de teste de otimização e para o projeto de otimização do alto-falante, abordado como problema principal neste trabalho, considerando avaliações mono-objetivo e multi-objetivo.

Para o alcance de resultados quantitativos, foram realizadas 50 repetições para cada caso das estratégias de avaliação (1º Caso, 2º Caso e 3º Caso), obtendo-se assim a função de distribuição acumulada das análises realizadas.

3.4.1 Funções Mono-objetivo

As funções de teste de otimização, avaliadas de forma mono-objetivo, têm como objetivo a minimização de suas respectivas funções.

Para ambas as funções de teste de otimização (*Ackley*, *Griewank*, *Rastrigin*, *Schwefel* e *Sphere*) [19 – 21], incluindo o projeto de otimização do alto-falante, o qual também foi avaliado de forma mono-objetivo, foram aplicadas as estratégias de avaliação definidas pelo 1º Caso, 2º Caso e 3º Caso.

A seguir são apresentados os estudos dos comportamentos das funções para cada caso sugerido em suas estratégias de avaliação.

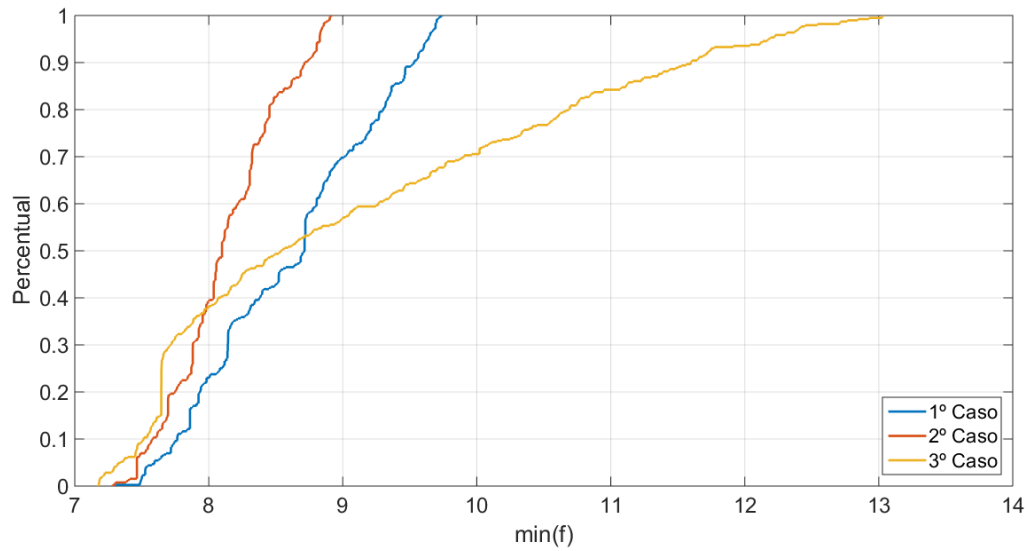
3.4.1.1 Funções de Teste de Otimização

3.4.1.1.1 Função Ackley

No 1º Caso da função Ackley, verificou-se que aumentos nos percentuais de mutação e recombinação aperfeiçoaram o cenário de estabilização da resposta, permitindo a fuga de mínimos locais. Por outro lado, a habilitação da mutação dos parâmetros auto-adaptativos σ realizados no 2º Caso, foram suficientes para a obtenção de bons mínimos para a função.

No ensaio realizado sem a intervenção do usuário durante o processo, caracterizado pelo 3º Caso, obtiveram-se os menores valores para a função. Contudo, observa-se na Figura 3.3 que, apesar do menor valor para a função ter sido obtido no 3º Caso, a média dos melhores resultados para a função foram constatados a partir do emprego do 2º Caso. Nota-se também que os melhores rendimentos se referem aos casos com a interatividade do usuário executadas durante o processo, apresentadas na Tabela 3.1 através do percentual de 80%, tomado como referência neste trabalho. A Figura 3.4 ilustra o comportamento dos casos avaliados conforme apresentados na Tabela 3.1.

Figura 3.3 - Função distribuição acumulada - Função Ackley.

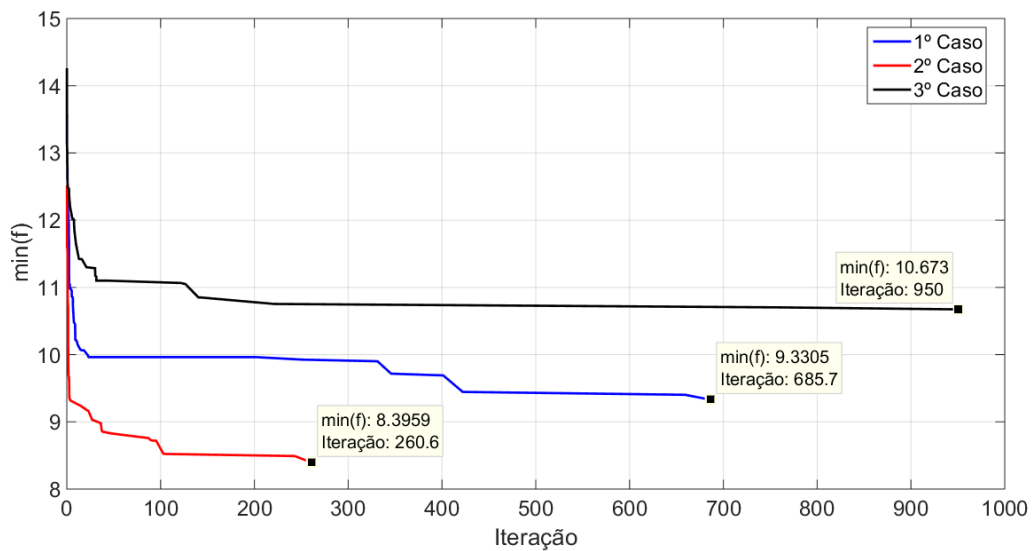


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.1 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Ackley.

Percentual	1º Caso	2º Caso	3º Caso
80%	9,3026	8,4530	10,6850

Figura 3.4 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Ackley.



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.1.1.2 Função Griewank

As manipulações nos percentuais de mutação e recombinação referentes ao 1º Caso da função Griewank não acarretaram em alterações dos mínimos locais após a estabilização. Contudo, neste caso obtiveram-se bons valores em poucas iterações do processo.

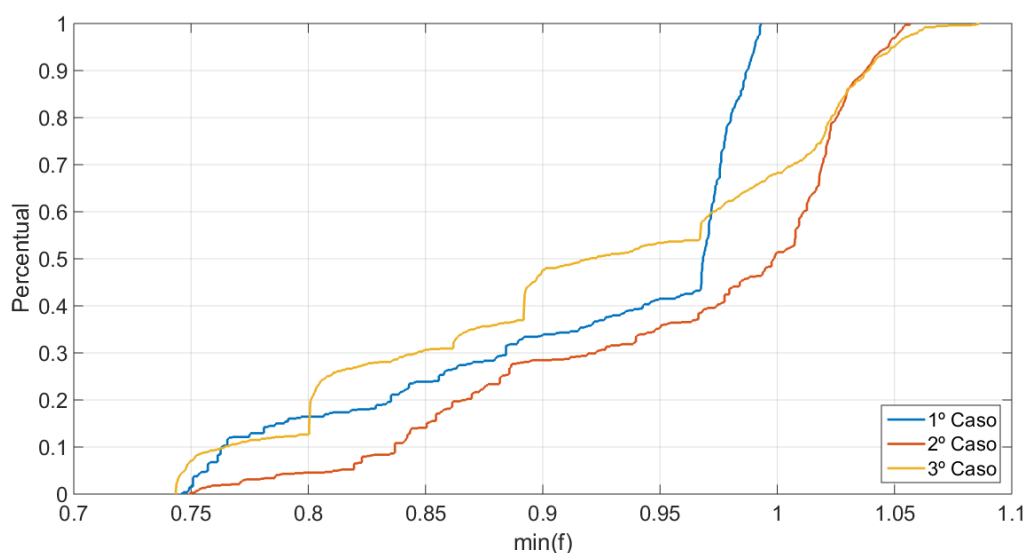
No 2º Caso, observou-se uma melhora no número de iterações necessárias para a obtenção de bons mínimos, tendo o menor valor encontrado aproximado ao do caso anterior.

Com um comportamento mais suavizado, o 3º Caso obteve em suas respostas os melhores valores em média, comparados aos casos anteriores.

Os pontos para o percentual de ocorrência de 80% apresentados na Tabela 3.2, ilustram através da Figura 3.6 o comportamento dos casos avaliados, exibindo o mínimo da função encontrado para cada caso, juntamente com o número de iterações necessárias para sua obtenção. Conforme exibe a Figura 3.5, os casos avaliados apresentam rendimentos semelhantes para a função objetivo, possuindo pequenas variações nos mínimos alcançados.

Desse modo, verifica-se que a função apresenta aspectos simplificados, tendo soluções facilmente encontradas através da metodologia abordada, com uma eficiência considerável nos casos em que há interatividade no processo evolutivo.

Figura 3.5 - Função distribuição acumulada - Função Griewank.

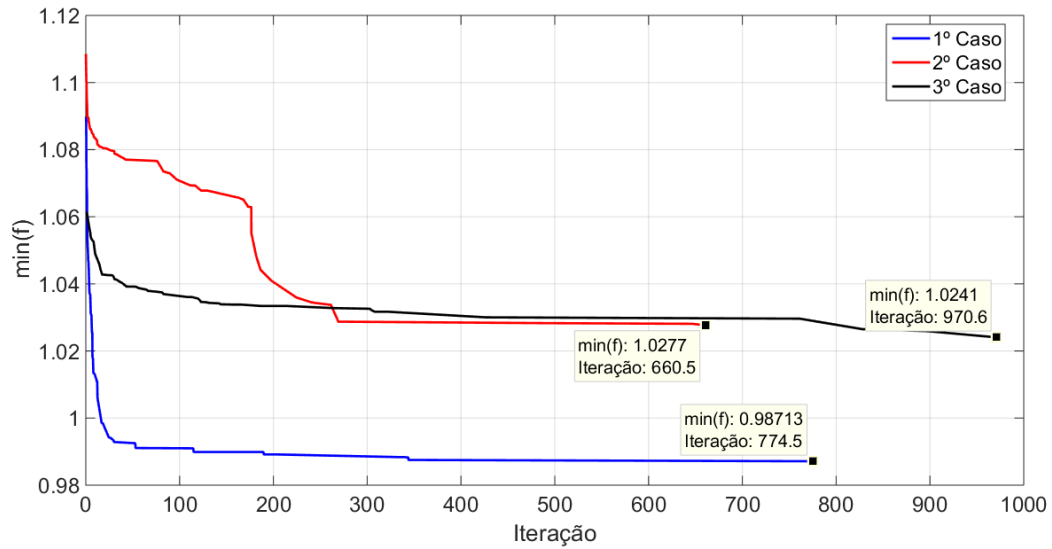


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.2 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Griewank.

Percentual	1º Caso	2º Caso	3º Caso
80%	0,9802	1,0257	1,0230

Figura 3.6 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Griewank.



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

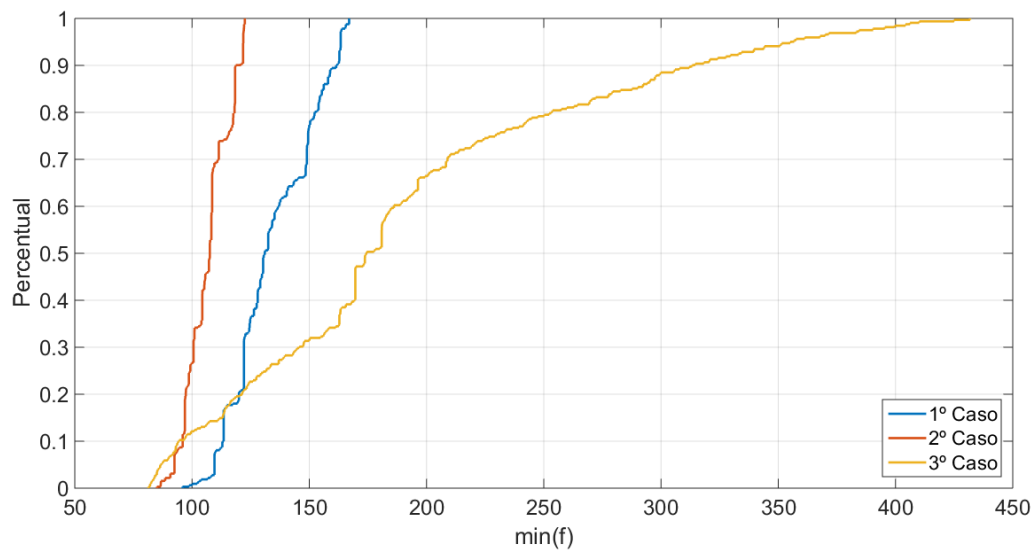
3.4.1.1.3 Função Rastrigin

As intervenções do usuário durante o processo de minimização da função Rastrigin, foram capazes de perturbar as avaliações em meio às estagnações, obtendo boas respostas finais tanto para as avaliações do 1º Caso, quanto para as avaliações do 2º Caso. Porém, o 2º Caso se destaca por apresentar o menor valor para o objetivo da função em comparação ao 1º Caso, assim como a menor média das avaliações realizadas para a função, como ilustradas na Figura 3.7. Essa melhora refere-se diretamente à habilitação da mutação dos parâmetros auto-adaptativos σ realizados neste caso.

No 3º Caso, obtém-se o menor valor para a função, contudo, os valores médios para o mínimo da mesma são inferiores comparando-os com os demais casos.

A Figura 3.8 ilustra o comportamento dos casos no processo de minimização, destacadas pela eficiência da interatividade do usuário ao longo do processo iterativo referentes aos mínimos alcançados para o percentual de ocorrência de 80%, conforme apresentados na Tabela 3.3.

Figura 3.7 - Função distribuição acumulada - Função Rastrigin.

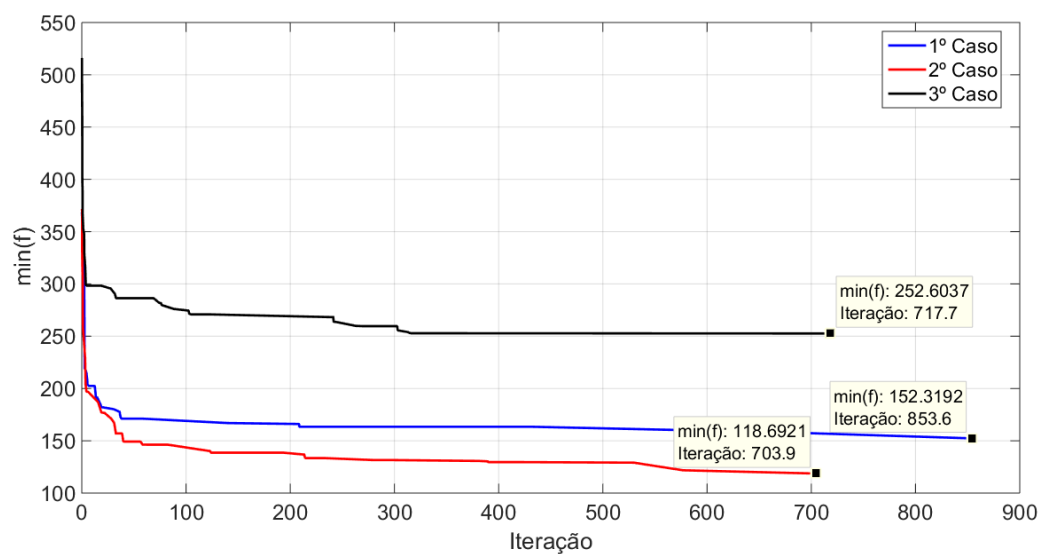


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.3 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Rastrigin.

Percentual	1º Caso	2º Caso	3º Caso
80%	152,2952	118,1409	253,2001

Figura 3.8 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Rastrigin.



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

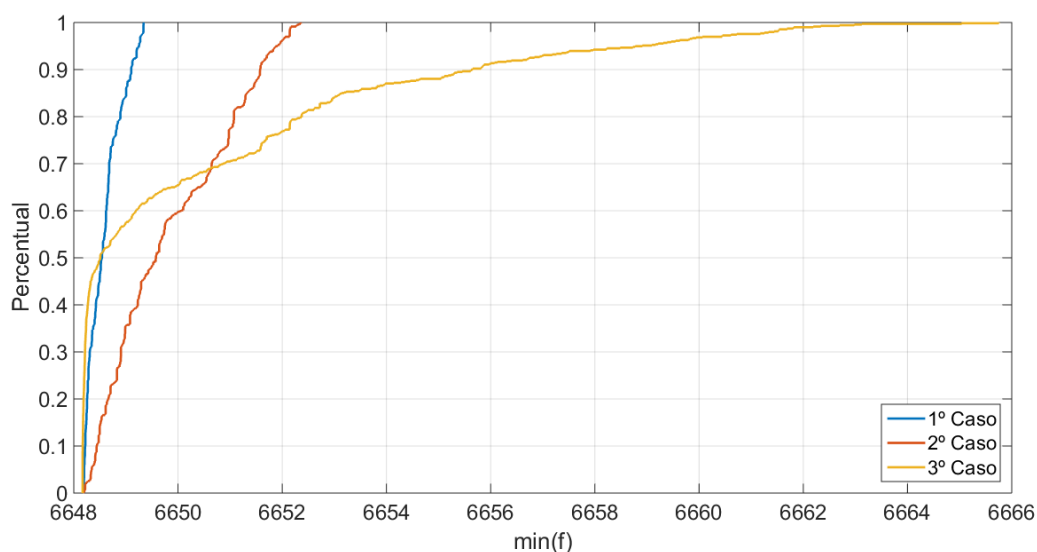
3.4.1.1.4 Função Schwefel

No 1º Caso da função Schwefel, observa-se que bons resultados são obtidos em poucas iterações, tendo um impacto significativo por parte das manipulações realizadas pelo usuário nesta etapa. Diferentemente do caso anterior, o 2º Caso não apresenta melhoras significativas após intervenções realizadas pelo usuário.

Conforme ilustra a Figura 3.9, o 1º Caso apresenta os melhores resultados tanto para os percentuais de 50% de ocorrência, quanto para o menor valor encontrado, comparados ao 2º Caso. Por outro lado, os resultados obtidos no 3º Caso apontam a melhor média, assim como o menor mínimo encontrado para a função.

A Figura 3.10 ilustra o comportamento dos casos ocorridos em 80% das avaliações conforme apresenta a Tabela 3.4.

Figura 3.9 - Função distribuição acumulada - Função Schwefel.

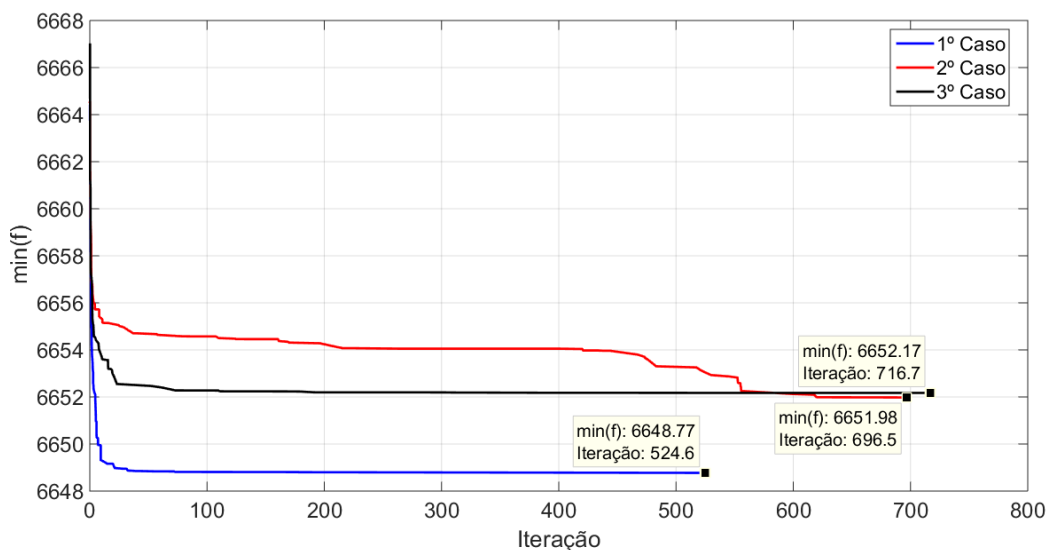


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.4 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Schwefel.

Percentual	1º Caso	2º Caso	3º Caso
80%	6648,9	6651,1	6652,4

Figura 3.10 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Schwefel.



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.1.1.5 Função Sphere

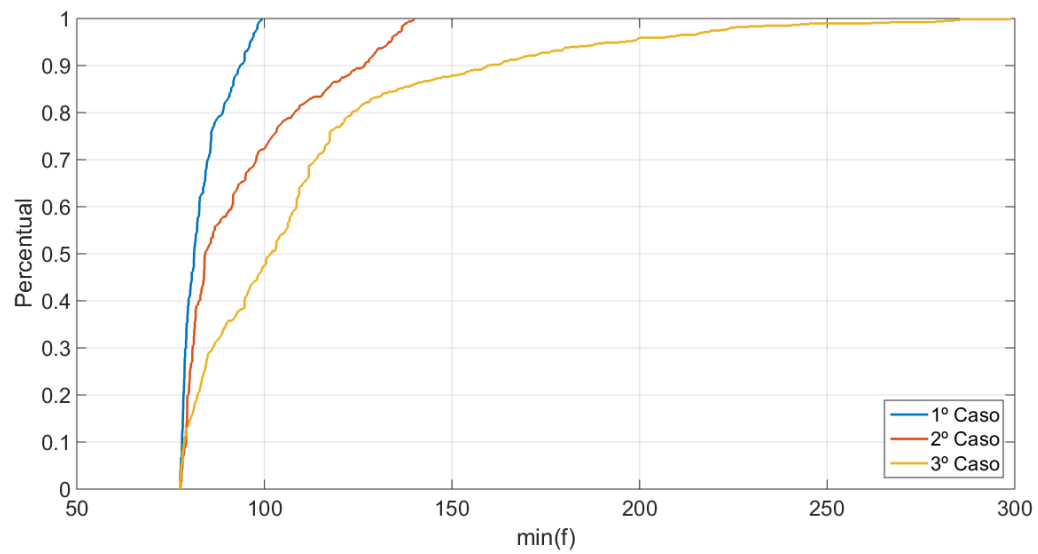
As interações executadas pelo usuário ao longo do processo de minimização provocaram no 1º Caso da função Sphere, uma grande eficiência em torno de seus mínimos locais. Tal eficiência é ilustrada na Figura 3.11, a qual é possível observar que para este e os demais casos, alcançou-se o menor valor das avaliações para a função, assim como o menor valor mais ocorrido entre os casos.

No 2º Caso, verificaram-se também êxitos após intervenções do usuário em suas avaliações, aproximando-se das respostas obtidas para o 1º Caso.

Por fim, o 3º Caso exibe soluções com uma menor eficiência tanto no número de iterações necessárias para a sua obtenção, quanto no mínimo encontrado para a solução. No entanto, o mesmo alcança o menor mínimo para a função como obtidos no 1º e 2º Caso das estratégias de avaliação.

A Figura 3.12 ilustra o comportamento dos casos com ocorrência em 80% das avaliações realizadas para a função. Nota-se nesta ilustração que, além da melhora obtida nos mínimos para a função, foi possível reduzir o tempo de obtenção de suas soluções quando comparado os casos em que há intervenção do usuário (1º e 2º Caso), com o caso em que não há intervenção do usuário (3º Caso).

Figura 3.11 - Função distribuição acumulada - Função Sphere.

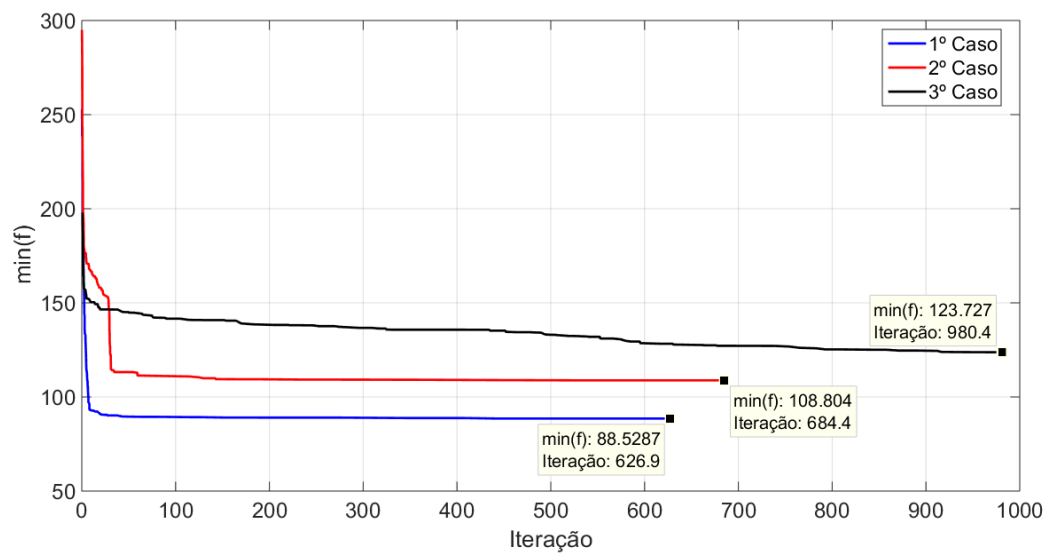


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.5 - Probabilidade de ocorrência de mínimos da função Sphere.

Percentual	1º Caso	2º Caso	3º Caso
80%	88,8348	108,0830	123,2480

Figura 3.12 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% - Função Sphere.



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.1.2 Projeto Alto-falante

Nas avaliações mono-objetivo do projeto alto-falante apresentadas a seguir, foi considerado o objetivo e a restrição apresentados em (3), com algumas modificações, uma vez que a mesma se refere a aplicações multi-objetivo.

A equação (14) apresenta a função para a avaliação do projeto alto-falante mono-objetivo.

$$\min f(x) = volume + k \times \max(0 \mid 0,5 - \mathbf{B}) \quad (14)$$

Sendo k um valor expressivamente grande, penalizando aqueles indivíduos que não cumprem a restrição da densidade de fluxo magnético $\mathbf{B}$ do projeto.

3.4.1.2.1 Alto-falante (Otimização Parcial)

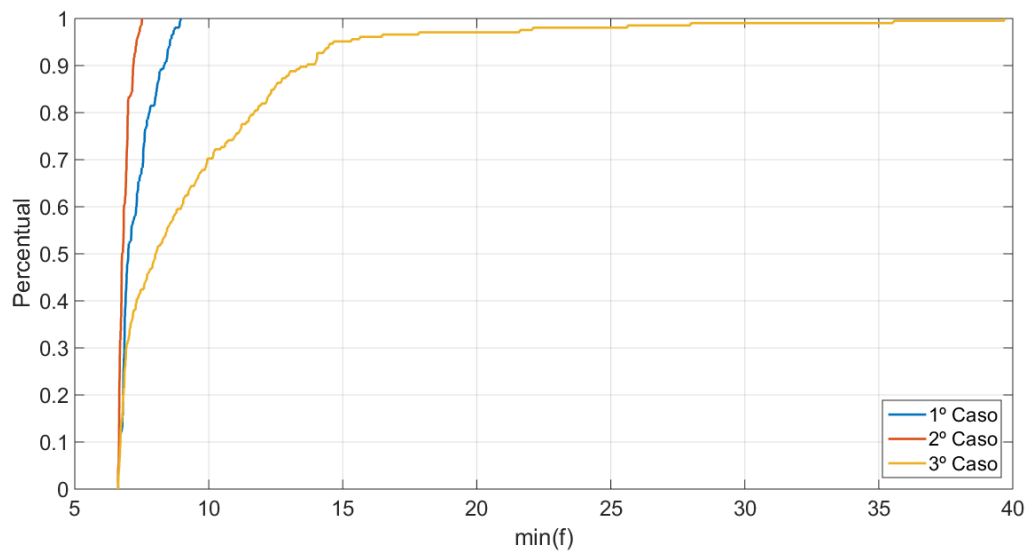
Conforme ilustra a Figura 3.13, as estratégias de avaliação (1º Caso, 2º Caso e 3º Caso) proposta neste trabalho, resultaram em bons mínimos para o projeto do alto-falante.

No 1º Caso da otimização parcial dos parâmetros do projeto, nota-se que os auxílios do usuário no decorrer do processo aproximaram-se os resultados obtidos com maior frequência à resposta de menor valor encontrado.

Com uma melhor eficiência, o 2º Caso alcançou respostas ainda mais próximas ao menor valor obtido nesta etapa. Agrega-se este comportamento ao evento de auto-adaptação σ dos parâmetros, uma vez que o mesmo foi habilitado neste ciclo.

No 3º Caso, o qual não usufrui da intervenção do usuário durante o processo de minimização, mas que se expõem todas as amostras aos efeitos das Estratégias de Evolução, alcançam-se bons valores para a proposta aqui avaliada com um menor rendimento. A Figura 3.14 ilustram a grande eficiência das intervenções realizadas pelo usuário durante o processo de minimização desta etapa, alcançadas em 80% das avaliações realizadas.

Figura 3.13 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial mono-objetivo).

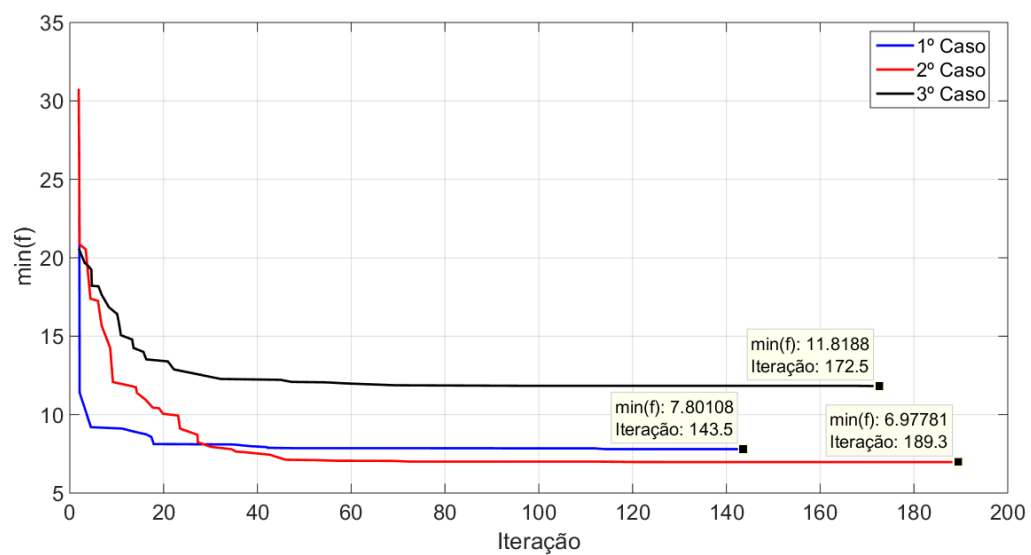


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.6 - Probabilidade de ocorrência de mínimos do projeto Alto-falante (otimização parcial mono-objetivo).

Percentual	1º Caso [cm ³]	2º Caso [cm ³]	3º Caso [cm ³]
80%	7,7951	6,9853	11,8365

Figura 3.14 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80%
Alto-falante (otimização parcial mono-objetivo).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.1.2.2 Alto-falante (Otimização Completa)

Nas avaliações dos casos para a otimização completa do projeto do alto-falante, observa-se que tanto as manipulações efetuadas pelo usuário, quanto às propostas das estratégias de avaliação, definida pelos casos avaliados, apresentaram resultados significativos em uma análise mono-objetivo.

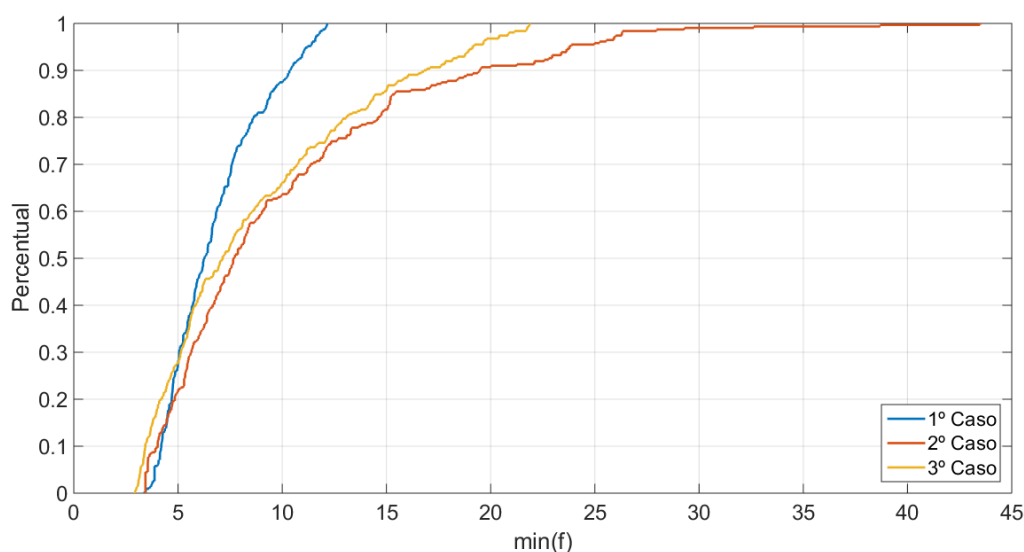
No 1º Caso, as modificações realizadas nos percentuais de mutação e recombinação, fizeram com que as estabilizações em mínimos locais fossem perturbadas, ocasionando uma melhora em sua resposta. Com uma menor eficiência com relação ao caso anterior, o 2º Caso não alcançou boas soluções a partir das intervenções do usuário nos operadores de mutação e combinação, bem como na ativação da mutação dos parâmetros auto-adaptativos σ .

No 3º Caso, verificou-se uma evolução mais lenta durante o processo. Porém, com o uso completo dos efeitos da metodologia aqui proposta, atingiu-se o menor valor para o volume total do alto-falante, conforme ilustra a Figura 3.15.

A Tabela 3.7 apresenta os mínimos alcançados com um percentual de ocorrência de 80% para cada caso das estratégias de avaliação.

Nos comportamentos ilustrados na Figura 3.16 é possível observar que, os casos em que é exercida a intervenção do usuário apresentam uma considerável melhora no tempo de obtenção dos mínimos para o projeto. No entanto, apenas o 1º Caso obtém uma maior eficiência, tanto no mínimo encontrado, quanto no número de iterações necessárias para sua obtenção.

Figura 3.15 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa mono-objetivo).

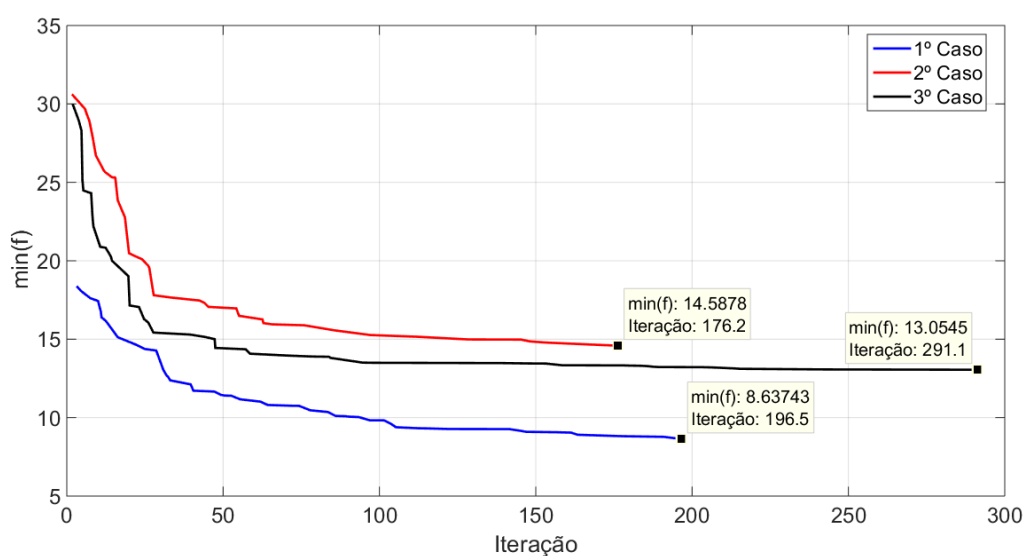


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.7 - Probabilidade de ocorrência de mínimos do projeto Alto-falante
(otimização completa mono-objetivo).

Percentual	1º Caso [cm ³]	2º Caso [cm ³]	3º Caso [cm ³]
80%	8,6318	14,5856	13,0670

Figura 3.16 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80%
Alto-falante (otimização completa mono-objetivo).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.2 Função Multi-objetivo

Nas etapas seguintes, foram realizadas análises do projeto otimização do alto-falante, considerando os objetivos e restrições apresentados em (3) e (4).

Para ambos os objetivos e suas restrições, foram aplicadas as estratégias de avaliação definidas pelo 1º Caso, 2º Caso e 3º Caso, executando avaliações com otimização completa e parcial de sua estrutura. Além das etapas das avaliações mencionadas, cada análise foi reavaliada incrementando indivíduos durante o processo iterativo, para os casos em que a interatividade do usuário é aplicada (1º Caso e 2º Caso), como mencionado nas estratégias de avaliação.

A seguir são apresentados os estudos dos comportamentos do projeto de otimização do alto-falante.

3.4.2.1 Alto-falante (Otimização Parcial)

Na sequência são apresentados os estudos referentes às etapas mencionadas anteriormente, aplicadas à otimização parcial do projeto alto-falante.

Para o objetivo e restrição da equação (3), foi proposto a minimização do volume total do alto-falante mantendo a densidade de fluxo magnético igual ou superior a B_{min} , como definido anteriormente. Para o objetivo e restrição da equação (4), foi proposto a maximização da densidade de fluxo magnético do projeto, mantendo seu volume total em $6,9853 \text{ cm}^3$ com uma variação percentual de $\pm 14\%$. A restrição deste volume foi definida a partir do menor volume encontrado com o percentual de ocorrência de 80% nas avaliações mono-objetivo do projeto de otimização do alto-falante.

3.4.2.1.1 Minimização do Volume Total Sem a Inserção de Indivíduos

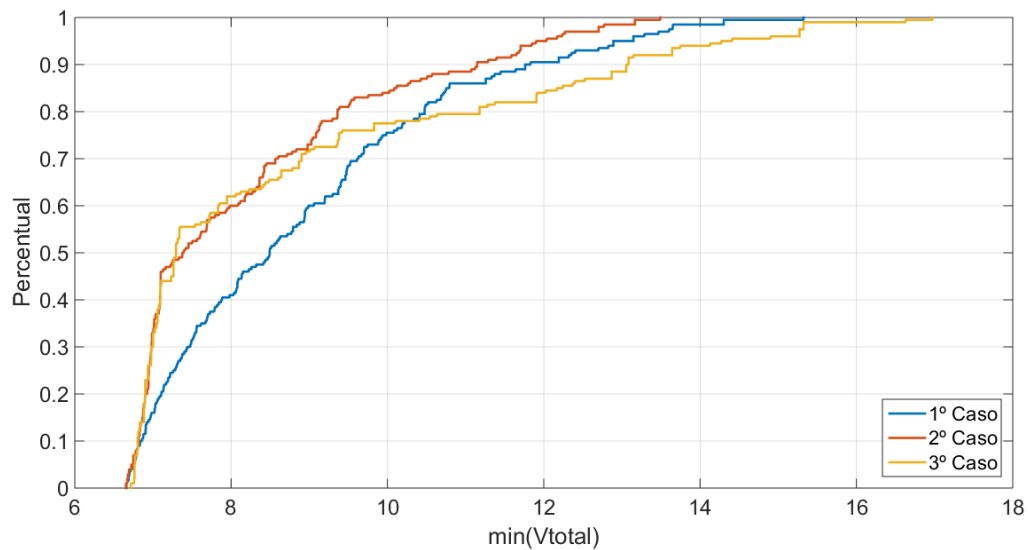
Em sua avaliação multi-objetivo para a minimização do volume total, apresentada em (3), é possível verificar que as intervenções realizadas pelo usuário em momentos de estagnações surtiram grandes efeitos na busca pela solução ótima.

Conforme ilustra a Figura. 3.17, os casos em que a interatividade do usuário foi aplicada (1º Caso e 2º Caso) apresentaram os melhores rendimentos para as altas taxas de probabilidade de ocorrência, obtendo ao final de suas avaliações os melhores resultados para o objetivo avaliado.

Com grande eficiência, o 3º Caso apresentou resultados significativos para as probabilidades de ocorrências inferiores a 70%. Contudo, o menor valor obtido para a análise foi relativamente superior aos alcançados nos casos anteriores.

A Tabela 3.8 apresenta o volume total do modelo obtido em cada caso avaliado, com o percentual de ocorrência de 80%. Na Figura 3.18, é ilustrado o comportamento dos casos em uma única avaliação para o percentual apresentado na Tabela 3.8.

Figura 3.17 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (3) sem a inserção de indivíduos).

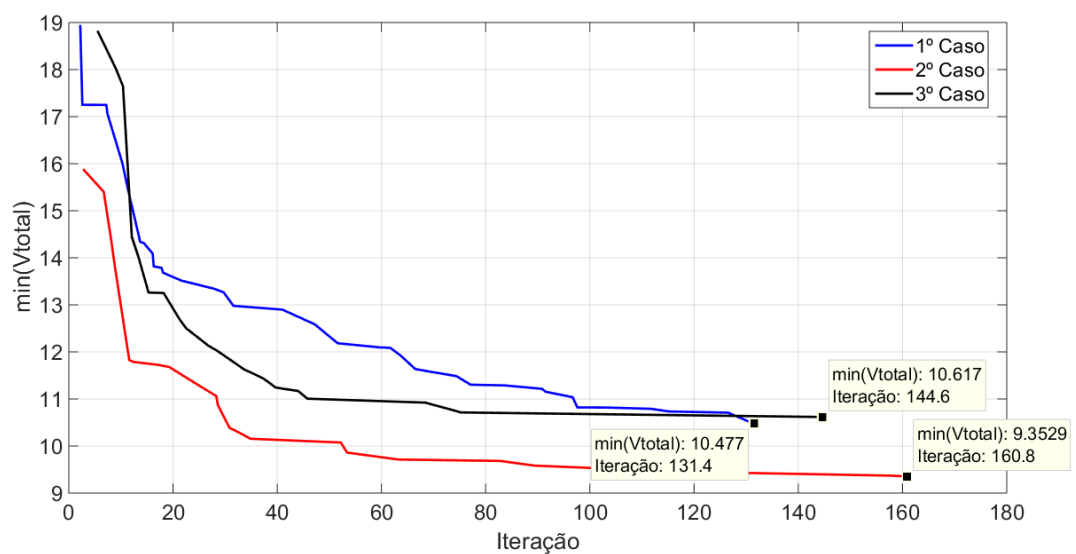


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.8 - Probabilidade de ocorrência de volumes do projeto Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo sem a inserção de indivíduos).

Percentual	1º Caso [cm ³]	2º Caso [cm ³]	3º Caso [cm ³]
80%	10,4750	9,3596	10,6360

Figura 3.18 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (3) sem a inserção de indivíduos).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.2.1.2 Minimização do Volume Total Com a Inserção de Indivíduos

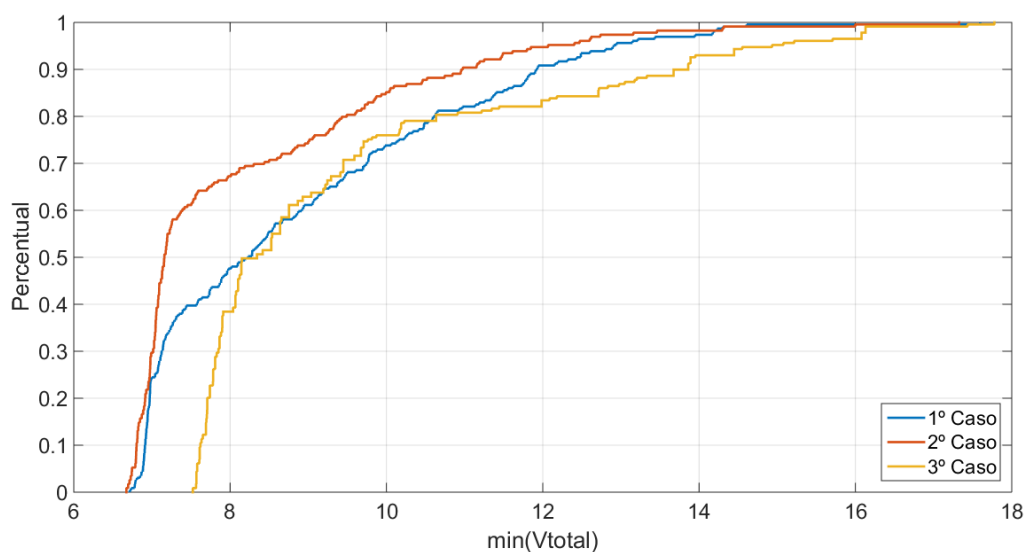
Nesta etapa da minimização do volume total do projeto alto-falante, foi incrementada às intervenções do usuário, descritas através do 1º e 2º Caso das estratégias de avaliação, a possibilidade de inserção manual de indivíduos ao longo do processo iterativo. Sendo assim, além das intervenções aplicadas em seus operadores em momentos de estabilizações do processo evolutivo, o usuário acrescentava paralelamente ao sistema indivíduos com especificações por ele definidas.

A Figura. 3.19 ilustra a grande eficiência que a inserção manual de indivíduos provocou no processo de minimização. Esta eficiência é evidenciada entre os percentuais de ocorrência de 30% e 60%, o qual demonstra uma maior probabilidade de obtenção das melhores respostas, bem como melhorias em seus valores. Nota-se também que, diferentemente da etapa anterior, o 2º Caso sobressaiu completamente em relação ao 3º Caso, obtendo volumes ainda menores para objetivo avaliado.

Com uma eficiência menor comparada ao 2º Caso desta etapa, porém com grandes evoluções comparadas ao mesmo caso na etapa anterior, o 1º Caso exibe também a capacidade de melhoria das avaliações após a inserção manual de indivíduos durante o processo evolutivo.

Vale ressaltar, que além dos ganhos alcançados para os resultados do objetivo aqui avaliado, as intervenções do usuário no processo iterativo proporcionaram uma melhora expressiva no tempo de obtenção de suas respostas, ilustrados na Figura 3.20.

Figura 3.19 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (3) com a inserção de indivíduos).

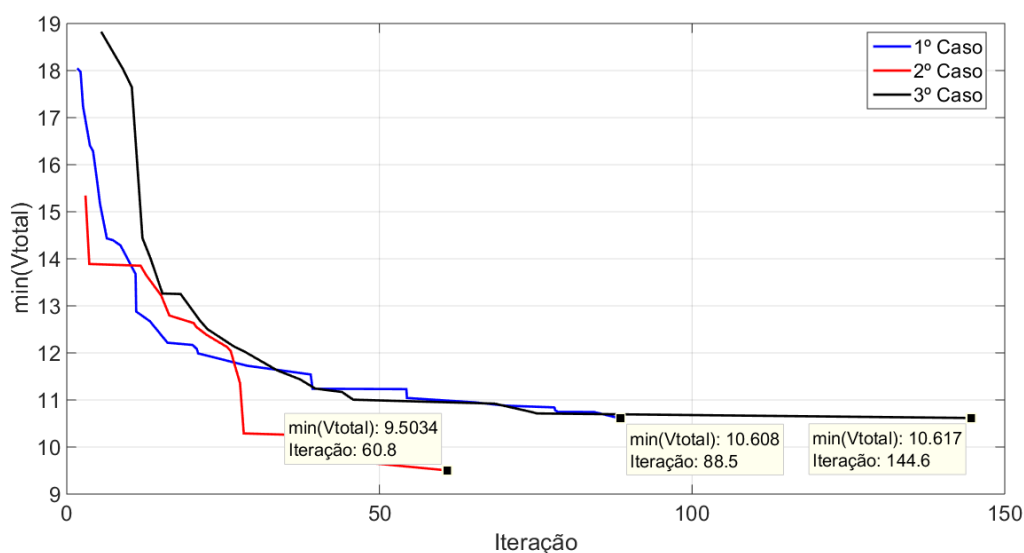


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.9 - Probabilidade de ocorrência de volumes do projeto Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo com a inserção de indivíduos).

Percentual	1º Caso	2º Caso	3º Caso
80%	10,6210	9,4918	10,6360

Figura 3.20 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (3) com a inserção de indivíduos).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.2.1.3 Maximização da Densidade de Fluxo Magnético Sem a Inserção de Indivíduos

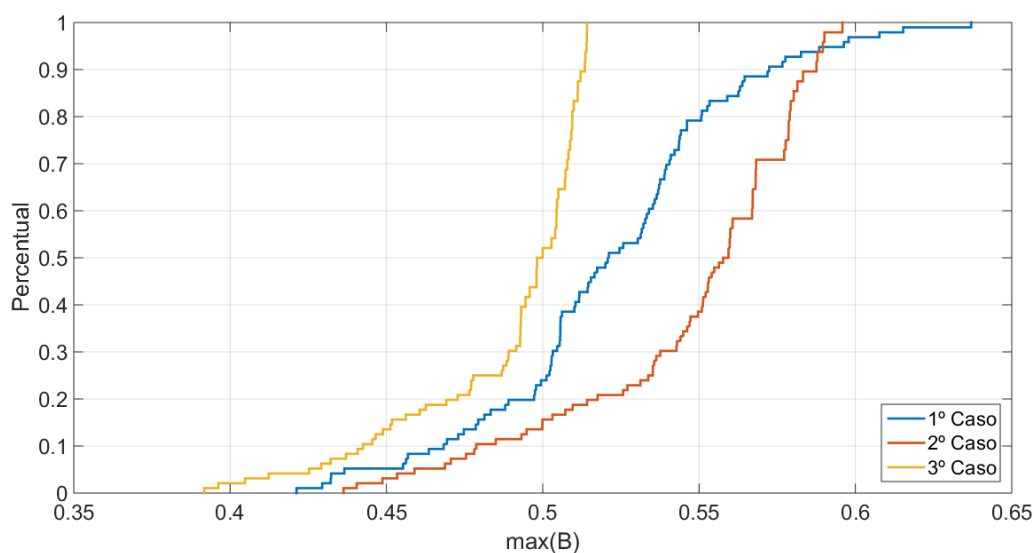
No 1º Caso da maximização da densidade de fluxo magnético B para o projeto alto-falante, verificou-se uma melhora no cenário de estabilização da resposta a partir de manipulações nos percentuais de mutação e recombinação, permitindo a fuga dos máximos locais, alcançando os melhores fluxos magnéticos nesta etapa da avaliação. Já no 2º Caso, a habilitação da mutação dos parâmetros auto-adaptativos σ realizada pelo usuário, foram suficientes para a obtenção de fluxos magnéticos significativos para a função.

Na avaliação realizada sem a intervenção do usuário durante o processo, definida pelo 3º Caso, obtiveram-se bons fluxos magnéticos para o projeto. Contudo, observa-se na Figura 3.21 que, apesar de bons resultados alcançados para as avaliações do 3º Caso, a média

das melhores respostas foram alcançadas nas análises para as estratégias de avaliação definidas pelo 2º Caso, apresentando as melhores respostas para o objetivo aqui avaliado através das avaliações realizadas no 1º Caso.

Na Figura 3.22 é ilustrado o comportamento para o percentual de ocorrência de 80% das densidades de fluxo magnético obtidos em cada caso de suas estratégias de avaliação, conforme Tabela 3.10, constatando-se o alcance dos melhores rendimentos mediante aos casos em que a intervenção do usuário é aplicada ao processo.

Figura 3.21 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (4) sem a inserção de indivíduos).

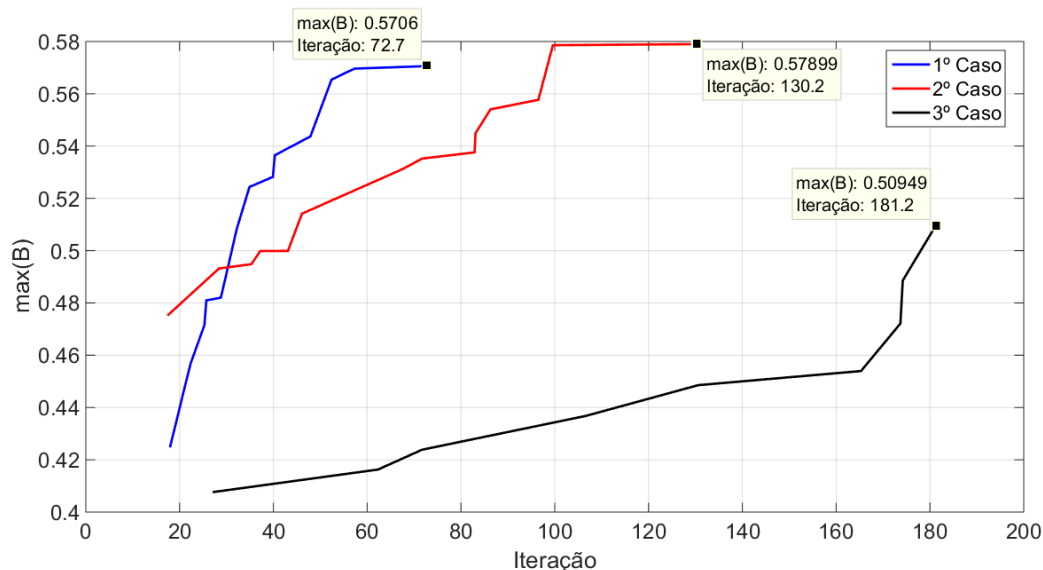


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.10 - Probabilidade de ocorrência de densidades de fluxo magnético do projeto Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo sem a inserção de indivíduos).

Percentual	1º Caso [T]	2º Caso [T]	3º Caso [T]
80%	0,5507	0,5790	0,5095

Figura 3.22 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (4) sem a inserção de indivíduos).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.2.1.4 Maximização da Densidade de Fluxo Magnético Com a Inserção de Indivíduos

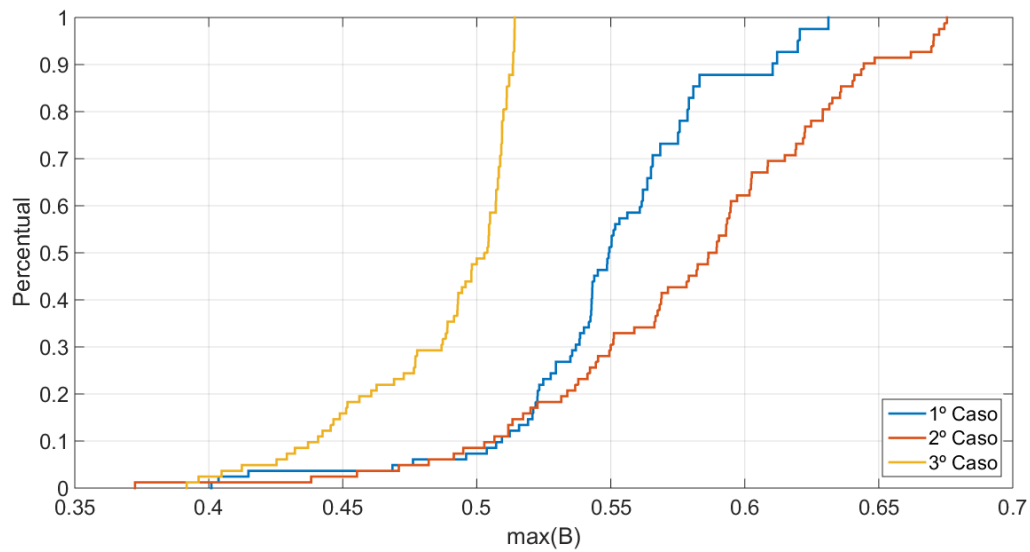
Na presente etapa de maximização da densidade de fluxo magnético B do projeto alto-falante, acrescentou-se a inserção de indivíduos manualmente nos casos em que o usuário exerce sua interatividade no processo (1º Caso e 2º Caso).

Com esse incremento, foi possível observar que os casos em que o usuário exerce sua intervenção alcançaram resultados ainda mais satisfatórios com relação à etapa anterior, avaliada sem a inserção manual de novos indivíduos.

A Figura 3.23 ilustra a grande eficiência adquirida a partir das inserções de indivíduos no processo. A respectiva inserção permite nesta etapa de avaliação, aumentos significativos tanto na resposta para a densidade de fluxo magnético B , quanto na diminuição do tempo de obtenção das mesmas, uma vez que o incremento manual de indivíduos contribui diretamente para a evolução desde as baixas probabilidades de ocorrência. A Figura 3.24 ilustra o respectivo comportamento com a probabilidade de ocorrência das densidades de fluxo magnético de 80%.

Novamente constata-se que os casos em que se aplicam a interatividade do usuário, incrementados com novos indivíduos ao processo de otimização, alcançam os melhores resultados ao longo de toda avaliação. Destaca-se nesta etapa das análises o comportamento do 2º Caso, que diferentemente da análise anterior, nesta alcança o melhor resultado para o objetivo do projeto avaliado.

Figura 3.23 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (4) com a inserção de indivíduos).

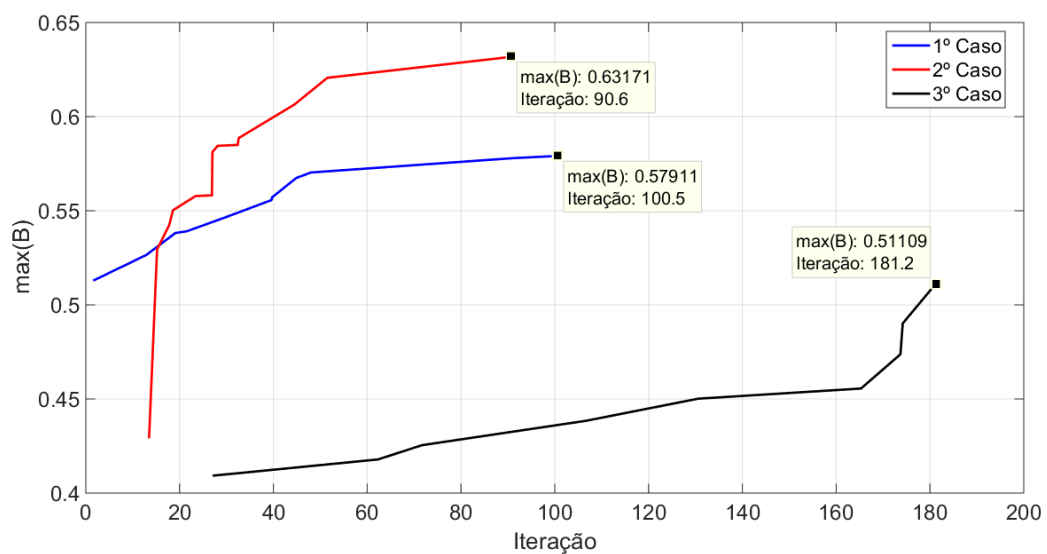


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.11 - Probabilidade de ocorrência de densidades de fluxo magnético do projeto Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo com a inserção de indivíduos).

Percentual	1º Caso [T]	2º Caso [T]	3º Caso [T]
80%	0,5791	0,6315	0,5111

Figura 3.24 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização parcial multi-objetivo (4) com a inserção de indivíduos).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.2.2 Alto-falante (Otimização Completa)

Na sequência são apresentados os estudos referentes às etapas mencionadas anteriormente, aplicadas à otimização completa do projeto alto-falante.

Para o objetivo e restrição da equação (3), foi proposto a minimização do volume total do alto-falante mantendo a densidade de fluxo magnético igual ou superior a B_{min} , como definido anteriormente. Para o objetivo e restrição da equação (4), foi proposto a maximização da densidade de fluxo magnético do alto-falante mantendo seu volume total em 4 cm^3 com uma variação percentual de $\pm 12\%$. A restrição deste volume foi definida a partir do menor volume encontrado nas avaliações mono-objetivo do projeto alto-falante em sua otimização completa.

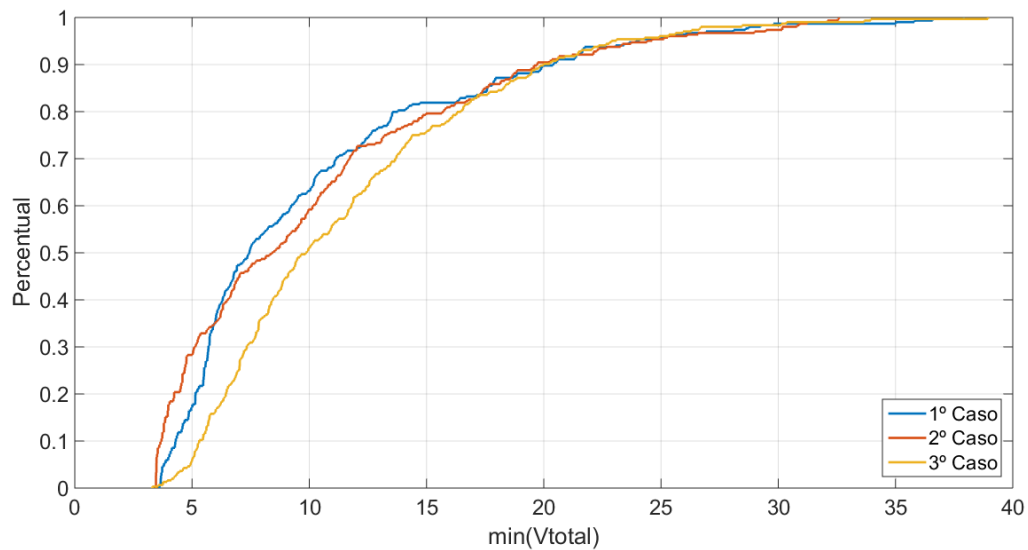
3.4.2.2.1 Minimização do Volume Total Sem a Inserção de Indivíduos

As interações executadas pelo usuário no processo de minimização do volume total da otimização completa dos parâmetros do projeto alto-falante, promoveram no 1º Caso de sua avaliação, eficiências consideráveis na busca pelo seu objetivo. Esta eficiência é ilustrada na Figura 3.26, a qual ilustra o comportamento dos casos para o percentual de ocorrência de 80%.

No 2º Caso, com a aplicação da mutação dos parâmetros auto-adaptativos σ de seus indivíduos, bem como as manipulações em seus operadores, realizados pelo usuário, é possível observar que para as altas taxas de ocorrência, conforme ilustrada na Figura 3.25, o 1º Caso sobressai aos resultados aqui obtidos. No entanto, para as baixas probabilidades de ocorrência, alcançando o objetivo do problema, observa-se que o recurso habilitado nesta etapa obtém não somente uma melhora no volume mínimo para o projeto, como reduz o seu tempo de obtenção.

Por fim, e com grande eficácia em seu processo, o 3º Caso alcança boas soluções em suas avaliações, tendo como no 2º Caso, valores semelhantes para o volume mínimo do modelo. Apesar disto, devido ao caso não usufruir de manipulações do usuário, seu rendimento em termos de tempo de convergência foi relativamente superior, comparando-o ao 1º Caso em que a intervenção do usuário foi aplicada.

Figura 3.25 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (3) sem a inserção de indivíduos).

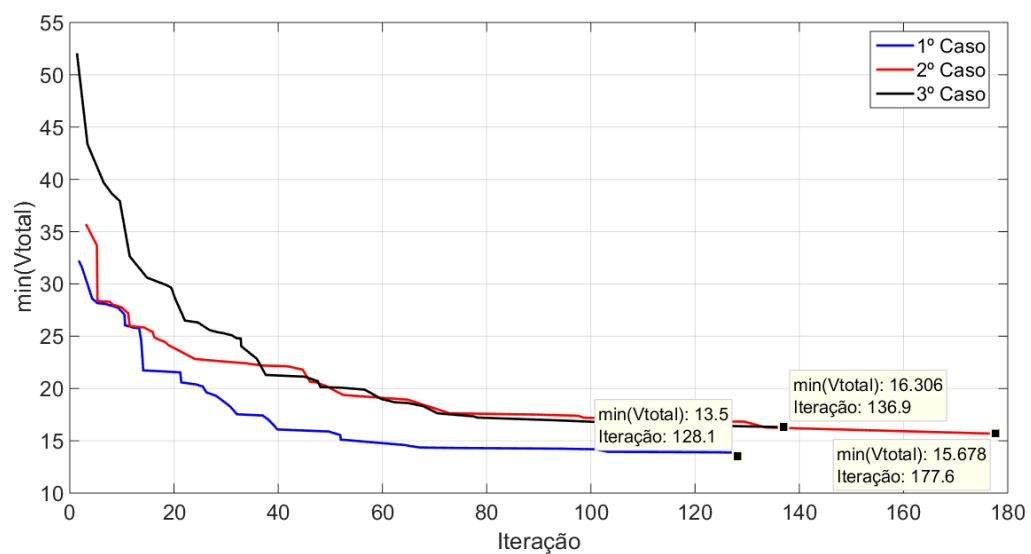


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.12 - Probabilidade de ocorrência de volumes do projeto Alto-falante (otimização completa multi-objetivo sem a inserção de indivíduos).

Percentual	1º Caso [cm ³]	2º Caso [cm ³]	3º Caso [cm ³]
80%	13,544	15,662	16,296

Figura 3.26 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (3) sem a inserção de indivíduos).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.2.2 Minimização do Volume Total Com a Inserção de Indivíduos

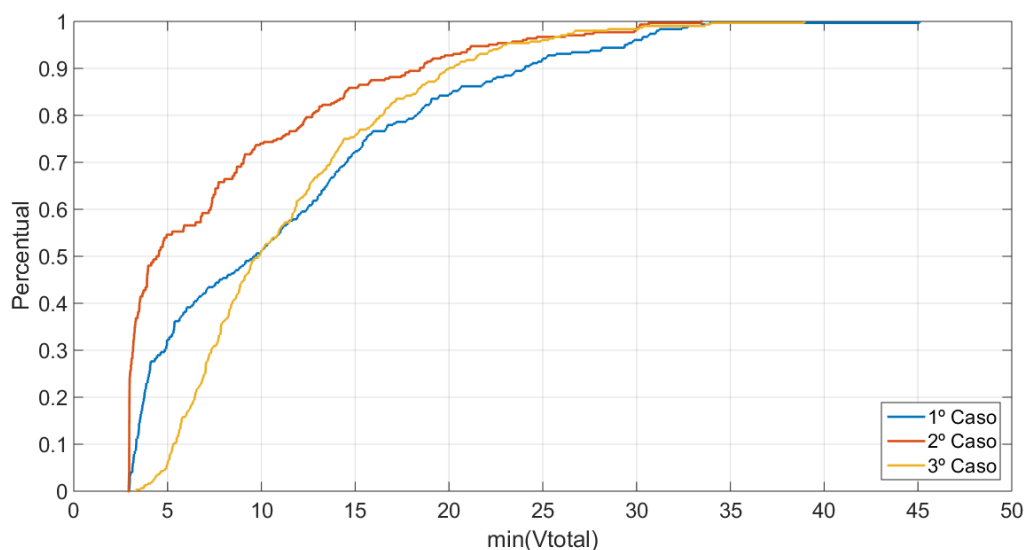
Como aplicadas à otimização parcial do projeto alto-falante, a inserção manual de indivíduos incrementados através do 1º e 2º Caso das estratégias de avaliação, apresentaram nesta etapa de minimização do volume total do projeto, grandes eficiências em suas avaliações.

Conforme ilustra a Figura 3.27, o 2º Caso obteve os melhores rendimentos na aplicação de suas estratégias de avaliação, comparando-o aos demais casos. A Tabela 3.13 apresenta os volumes alcançados para o percentual de ocorrência de 80%.

Além da melhora em seu desempenho para altas taxas de probabilidade de ocorrência, a inserção de novos indivíduos contribuiu para o aumento dos percentuais de ocorrência de obtenção das melhores respostas, isto é, inserindo indivíduos durante o processo de otimização, as probabilidades de se alcançar os menores volumes para o projeto aumentaram, diminuindo consequentemente o tempo de obtenção dos mesmos. Destaca-se novamente o comportamento do 2º Caso, apresentado a melhor eficiência nesta etapa, a qual o usuário faz uso de todas as possibilidades de intervenção disponibilizadas neste trabalho.

Vale ressaltar, que o menor volume obtido nesta etapa foi alcançado somente pelos casos em que se aplicaram a intervenção do usuário ao longo do processo iterativo, aliados à melhora significativa do objetivo do projeto (minimização do volume total) comparando-o à análise anterior (sem a inserção de indivíduos).

Figura 3.27 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (3) com a inserção de indivíduos).

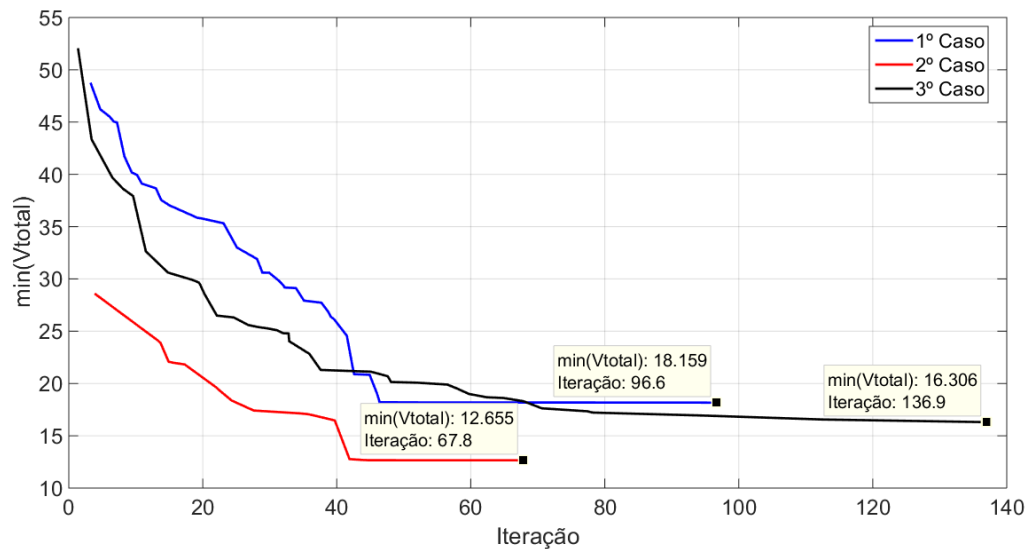


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.13 - Probabilidade de ocorrência de volumes do projeto Alto-falante (otimização completa multi-objetivo com a inserção de indivíduos).

Percentual	1º Caso [cm ³]	2º Caso [cm ³]	3º Caso [cm ³]
80%	18,172	12,704	16,296

Figura 3.28 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (3) com a inserção de indivíduos).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

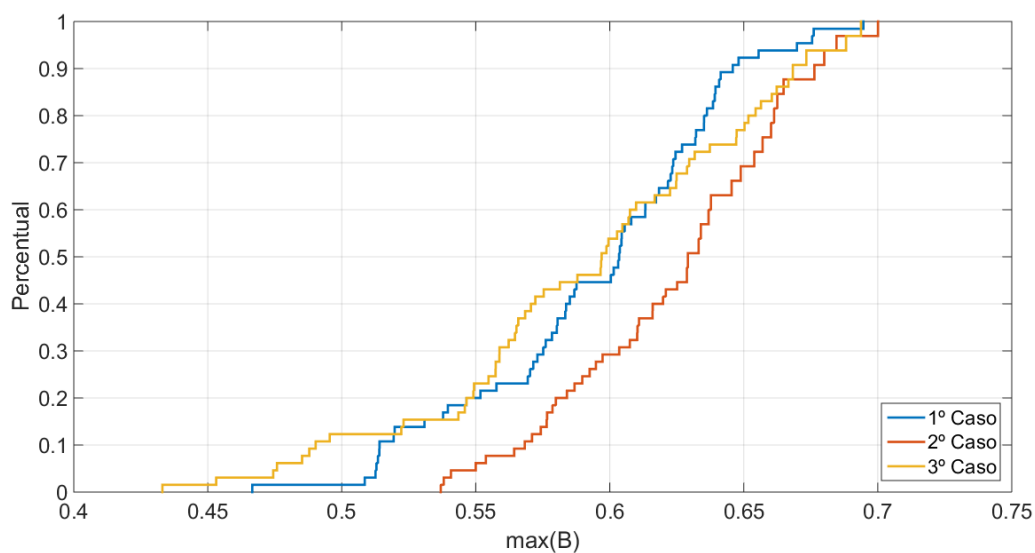
3.4.2.2.3 Maximização da Densidade de Fluxo Magnético Sem a Inserção de Indivíduos

As manipulações nos percentuais de mutação e recombinação referentes ao 1º Caso da maximização da densidade de fluxo magnético B para o projeto alto-falante em sua otimização completa, acarretaram em alterações dos máximos locais após as estabilizações, apresentando resultados relevantes para o objetivo aqui avaliado. Semelhante ao 1º Caso, o 2º Caso obteve grandes eficiências após as intervenções do usuário em momentos de estabilizações, alcançando a melhor resposta entre os casos avaliados.

No 3º Caso obtiveram-se também bons valores para a densidade de fluxo magnético B , principalmente para as elevadas taxas de ocorrência. Contudo, os casos em que a interatividade do usuário foi aplicada, apresentaram os melhores rendimentos ao longo do processo, assim como os melhores resultados para a maximização da densidade de fluxo magnético do projeto.

As densidades de fluxo magnético obtidas para o percentual de ocorrência de 80% são apresentadas na Tabela 3.14 na qual o 2º Caso se destaca, dando ênfase à participação do usuário no processo.

Figura 3.29 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (4) sem a inserção de indivíduos).

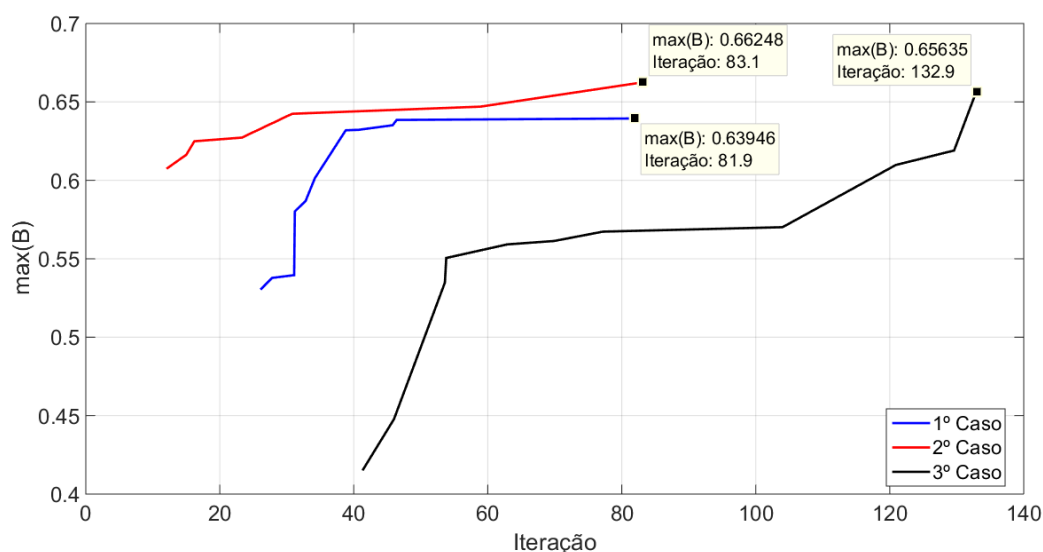


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.14 - Probabilidade de ocorrência de densidades de fluxo magnético do projeto Alto-falante (otimização completa multi-objetivo sem a inserção de indivíduos).

Percentual	1º Caso [T]	2º Caso [T]	3º Caso [T]
80%	0,6385	0,6625	0,6564

Figura 3.30 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (4) sem a inserção de indivíduos).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.2.2.4 Maximização da Densidade de Fluxo Magnético Com a Inserção de Indivíduos

Na presente etapa de maximização da densidade de fluxo magnético B do projeto alto-falante, acrescentou-se ao 1º e 2º Caso das estratégias de avaliação, a inserção de indivíduos ao processo de otimização, especificados conforme seu conhecimento (usuário). Com esse incremento, observou-se uma evolução nas respostas alcançadas para os elevados percentuais de ocorrência, comparando-os à análise anterior (sem inserção de indivíduos).

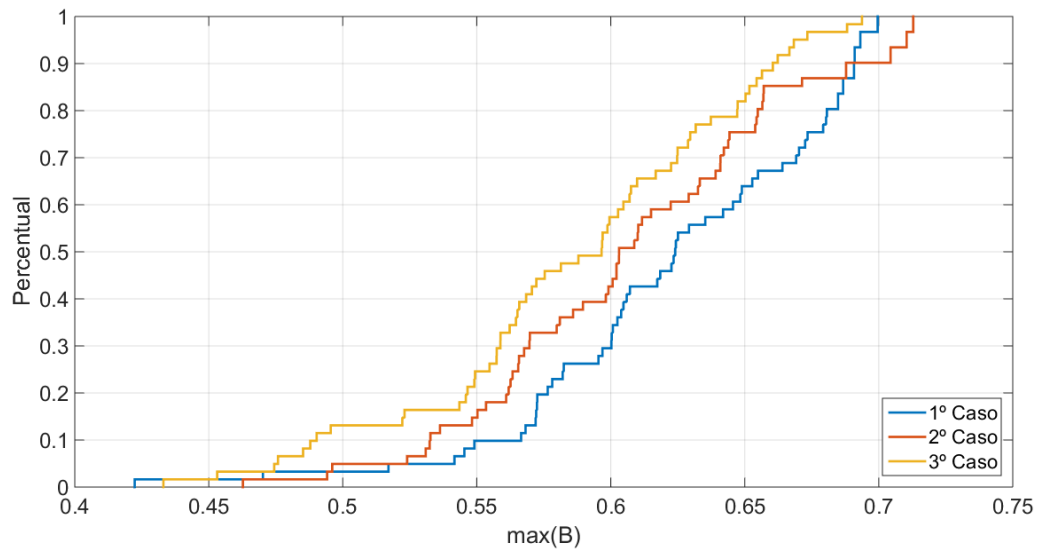
Destaca-se nesta etapa o comportamento do 1º Caso, que diferentemente da etapa anterior, a qual foi em sua maioria superior com relação ao desempenho obtido no 3º Caso, porém apresentando uma eficiência inferior em relação ao 2º caso, nesta consegue ter seu rendimento bastante evidenciado, alcançando o melhor resultado para o percentual de ocorrência de 80%, evidenciados na Figura 3.32.

Além da obtenção das melhores respostas para o objetivo proposto nesta análise, as intervenções do usuário proporcionaram o alcance das melhores soluções no decorrer de todo o processo evolutivo, para ambos os casos em que se aplicaram sua interatividade.

Vale salientar, que apesar de não ser uma restrição deste objetivo, tanto para as avaliações sem a inserção de indivíduos durante a execução do processo, quanto nas avaliações aqui realizadas, os resultados alcançados conseguem superar a densidade de fluxo magnético

B_{min} desde as baixas probabilidades de ocorrência, disponibilizando ao usuário uma maior flexibilidade na escolha do modelo para o projeto.

Figura 3.31 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (4) com a inserção de indivíduos).

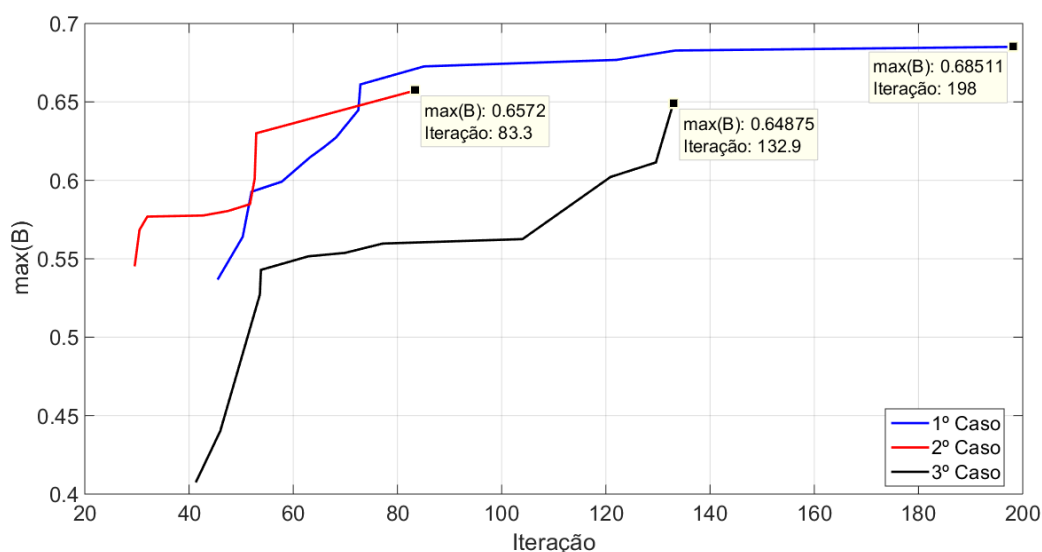


Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

Tabela 3.15 - Probabilidade de ocorrência de densidades de fluxo magnético do projeto Alto-falante (otimização completa multi-objetivo com a inserção de indivíduos).

Percentual	1º Caso	2º Caso	3º Caso
80%	0,6848	0,6566	0,6474

Figura 3.32 - Comportamento dos casos com probabilidade de ocorrência em torno de 80% Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (4) com a inserção de indivíduos).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.3 Comparação dos Melhores Resultados

Nesta etapa são comparados os melhores casos referentes ao processo de minimização do volume total do projeto de otimização do alto-falante.

O objetivo desta análise é apresentar a eficiência alcançada nas avaliações através dos diferentes métodos de intervenção do usuário. Sendo assim, a possibilidade de comparação entre os casos se restringem ao 1º e 2º Casos das estratégias de avaliação.

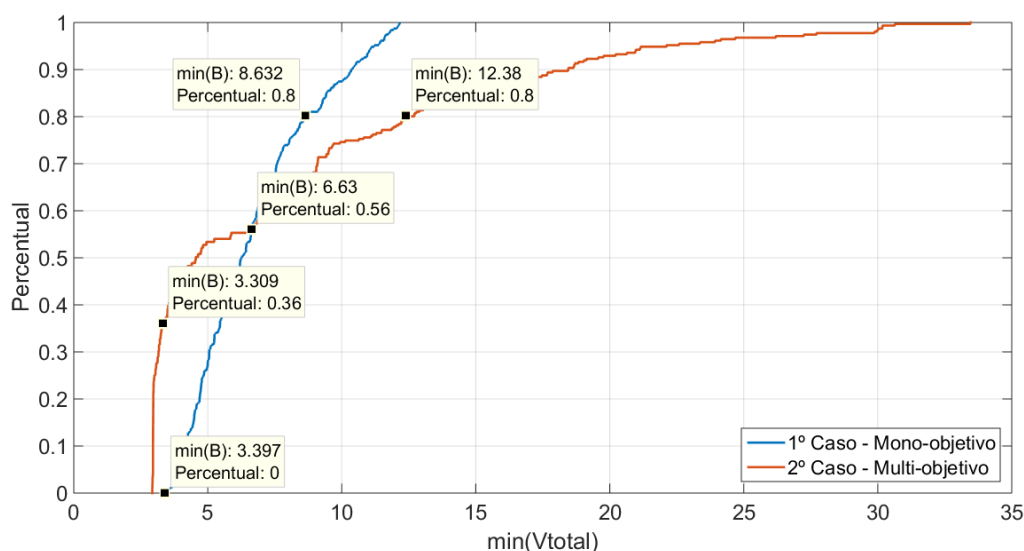
Nesta comparação, é apresentado o melhor desempenho através da otimização completa do projeto alto-falante multi-objetivo, obtido no 2º Caso do processo de minimização do volume total com a inserção de indivíduos, juntamente com o desempenho da otimização completa do projeto alto-falante mono-objetivo, obtido no 1º Caso do processo de minimização do volume total.

Conforme ilustra a Figura 3.33, para as altas taxas de probabilidade de ocorrência, o 1º Caso obtido nas análises mono-objetivo supera todas as intervenções e inserções de indivíduos aplicadas ao 2º Caso, obtido nas avaliações multi-objetivo.

Contudo, abaixo do percentual de ocorrência de 56%, as intervenções e inserções aplicadas nas avaliações multi-objetivo alcançam resultados com melhores eficiências, superando o melhor indivíduo encontrado no 1º Caso a partir dos percentuais de ocorrência de 36%, com uma melhora significativa em seu tempo de obtenção.

Como o objetivo analisado é a minimização do volume total do projeto alto-falante, tendo os comportamentos dos casos comparados ilustrados na Figura 3.33, conclui-se que quanto maior for a interatividade do usuário nos processos de otimização, melhor eficiência terá o processo evolutivo, tomando como exemplo o projeto de otimização do alto-falante, o qual apresenta os melhores resultados para a minimização do volume total através da intervenção completa do usuário em seu processo de avaliação, apresentando um ganho no tempo de obtenção das melhores soluções.

Figura 3.33 - Função distribuição acumulada - Alto-falante (otimização completa multi-objetivo (3) melhores casos).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.4 Avaliação com Alteração de Objetivo

As avaliações com alterações de objetivo apresentadas nesta etapa, referem-se à alternância entre o objetivo e sua restrição apresentados em (3), para o objetivo e sua restrição apresentados em (4).

Para tal, foram aplicadas as estratégias de avaliação (1º Caso, 2º Caso e 3º Caso) para a otimização completa do projeto alto-falante, permitindo a inserção de indivíduos ao longo do processo iterativo para os casos em que a interatividade do usuário é aplicada (1º Caso e 2º Caso).

A escolha da otimização completa do projeto alto-falante com a inserção de indivíduos durante o processo evolutivo se fez, devido ao melhor desempenho apresentado entre as avaliações multi-objetivo, avaliadas anteriormente.

Vale ressaltar, que as análises apresentadas a seguir foram obtidas através dos melhores resultados das 50 repetições executadas para cada caso das estratégias de avaliação, tendo um total de 200 iterações para cada avaliação, efetuando a mudança de objetivo na iteração de número 100.

A seguir são apresentados os comportamentos dos casos avaliados para a mudança de objetivo.

3.4.4.1 Análise do 1º Caso Com a Inserção de Indivíduos

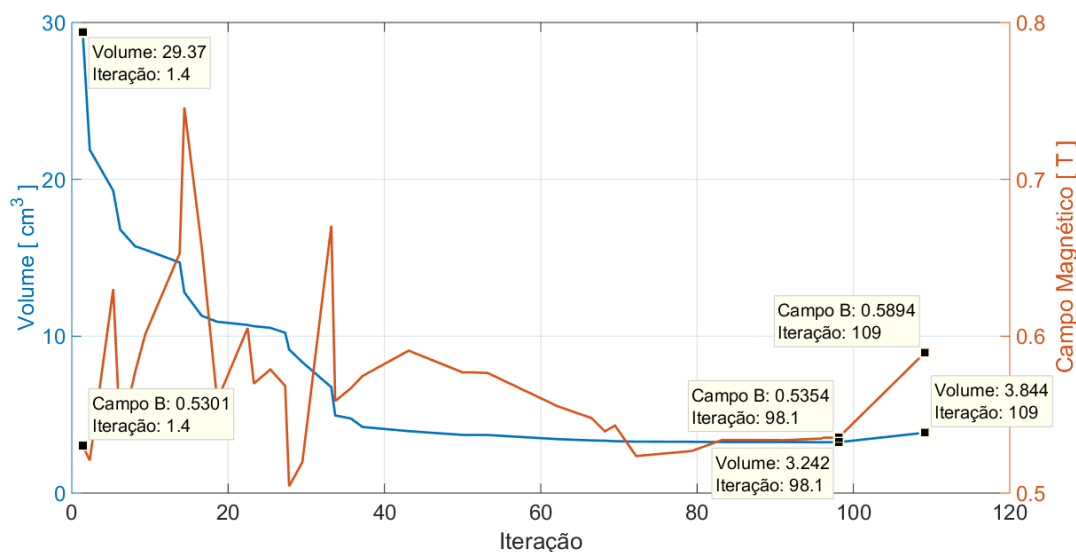
Na avaliação do 1º Caso com a inserção de indivíduos, tendo como alvo a mudança de objetivo, observa-se que com poucas iterações o sistema apresentou respostas satisfatórias.

Na Figura 3.34, é possível verificar a existência de duas estabilizações no início do processo iterativo. Entretanto, nota-se que após a inserção de indivíduos juntamente com manipulações em seus operadores, o sistema alcança rapidamente bons resultados para sua avaliação.

Ao realizar a mudança de objetivo (iteração 100), o caso avaliado apresenta como menor volume 3,2421 cm³. Sendo assim, este volume passa a ser a restrição para o objetivo seguinte, com um percentual de variação de $\pm 14\%$, definidos pelo usuário.

Após as intervenções do usuário, verifica-se que o sistema conseguiu melhorar com poucas iterações a densidade de fluxo magnético obtido antes da mudança de objetivo. Mesmo com esta melhora em sua densidade de fluxo magnético, o caso avaliado não foi capaz de escapar do máximo local encontrado somente com as intervenções disponibilizadas em sua estratégia de avaliação, bem como através da inserção de indivíduos. Contudo, o caso avaliado obteve uma melhora de 10,1% em sua densidade de fluxo magnético, a partir das intervenções realizadas pelo usuário após as restrições impostas ao objetivo do problema.

Figura 3.34 - Mudança de objetivo com a inserção de indivíduos (1º Caso).



3.4.4.2 Análise do 2º Caso Com a Inserção de Indivíduos

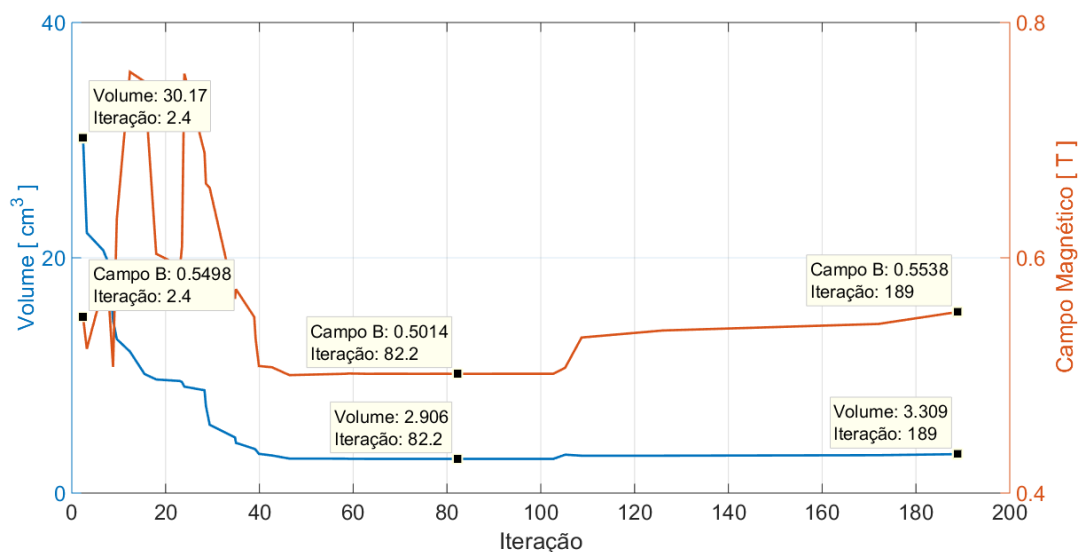
Na mudança de objetivo avaliada através do 2º Caso das estratégias de avaliação, com a inserção de indivíduos fornecidos pelo usuário, é possível verificar a existência de algumas estabilizações durante todo o processo. No entanto, as estratégias avaliativas para este caso, juntamente com a inserção de indivíduos realizadas pelo usuário, apresentaram grandes eficiências para a análise realizada.

Como ilustrada na Figura 3.35, as intervenções do usuário alcançaram como menor volume 2,9065 cm³ na iteração 82. Assim, na mudança de objetivo da iteração 100, a restrição do objetivo passou a ser o menor volume encontrado, com um percentual de variação de $\pm 14\%$.

Após algumas iterações com o objetivo alterado, o sistema encontra rapidamente uma melhora na densidade de fluxo magnético para seu indivíduo, estabilizando-o por algumas iterações. Apesar disso, alcançou-se uma melhora em sua resposta após algumas inserções de indivíduos, bem como a manipulação em seus operadores, aumentando significativamente a densidade de fluxo magnético do objetivo avaliado.

Para este caso, a melhora na densidade de fluxo magnético após as intervenções do usuário foi de 10,46%, superando a eficiência do caso anterior.

Figura 3.35 - Mudança de objetivo com a inserção de indivíduos (2º Caso).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

3.4.4.3 Análise do 3º Caso Sem a Inserção de Indivíduos

Por fim, o 3º Caso das estratégias de avaliação foi aplicado à análise da proposta para a mudança de objetivo.

Como definido neste trabalho, o 3º Caso das estratégias de avaliação não inclui a intervenção do usuário em suas avaliações. Sendo assim, para esta etapa não foram inseridos indivíduos durante o processo, bem como intervenções em seus operadores.

Conforme ilustra a Figura 3.36, as definições do caso avaliado proporcionaram à análise com mudança de objetivo poucas estabilizações, as quais foram rapidamente corrigidas conforme sua estratégia de avaliação. Contudo, o melhor indivíduo encontrado para o primeiro objetivo é significativamente maior do que aqueles encontrados no 1º Caso e 2º Caso desta análise. Isto se explica devido ao fato do usuário não inserir indivíduos manualmente no processo, assim como a manipulação em seus operadores.

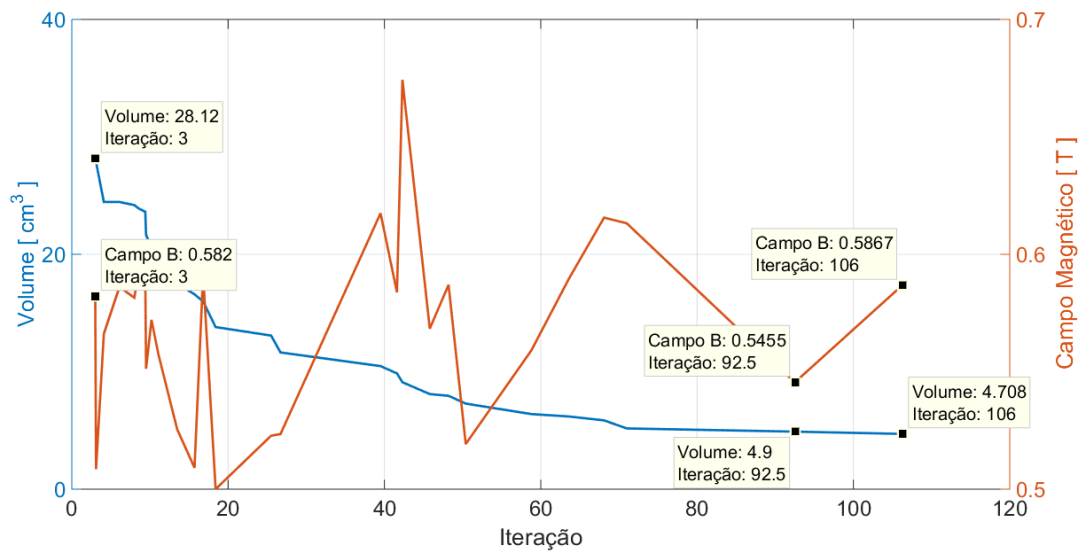
Na iteração 92, foi encontrado o melhor indivíduo para o primeiro objetivo, com um volume total de 4,9004 cm³. Desse modo, o mesmo volume encontrado passou a ser a restrição do segundo objetivo da análise, com uma probabilidade de variação de $\pm 14\%$.

Após poucas iterações a partir da mudança de objetivo, o sistema obteve uma melhora em sua densidade de fluxo magnético, reduzindo seu volume. A Figura 3.36 ilustra a indicação do respectivo indivíduo.

Mesmo com a melhora rápida tanto na densidade de fluxo magnético, quanto na restrição do volume, o sistema permaneceu-se estagnado no máximo local encontrado, tendo a menor eficiência em comparação com os casos aqui avaliados, sendo de 7,55%.

Novamente, foi verificado que a melhor eficiência da análise se refere às avaliações em que há uma maior interatividade do usuário no processo evolutivo.

Figura 3.36 - Mudança de objetivo sem a inserção de indivíduo (3º Caso).



Fonte: Elaborada por meio da aplicação Matlab®.

4 CONCLUSÃO

A metodologia das Estratégias de Evolução é uma das mais utilizadas dentre os Algoritmos Evolucionários devido à capacidade de solucionar problemas de sistemas complexos, problemas de otimização, visto que, a geração de soluções aceitáveis é obtida por meio do acúmulo de informações do problema ao longo do processo, bem como da auto-adaptação dos parâmetros da estratégia. No entanto, para uma melhor eficiência no tempo de obtenção de soluções aceitáveis, juntamente com melhorias nas informações obtidas, fazem-se necessários incrementos durante o processo evolutivo.

Neste trabalho, foi aplicada a interatividade do usuário ao processo de otimização das funções mono-objetivo e multi-objetivo, permitindo o usuário à manipulação e/ou inserção de dados na busca pela solução ótima. Nesta intervenção foram considerados os percentuais dos operadores de mutação e de recombinação, ativação/desativação da mutação dos parâmetros auto-adaptativos σ dos indivíduos, alterações dos objetivos e restrições para a função multi-objetivo, assim como a inserção de indivíduos no processo avaliativo.

Foi desenvolvida uma interface intuitiva para viabilizar o processo de interatividade do usuário, apresentando resultados de suas avaliações em tempo real, como o desempenho de todo processo evolutivo, tornando sua interpretação mais rápida.

Por fim, como demonstração de sua aplicabilidade, foram registradas as avaliações referentes às funções de testes de otimização, bem como às avaliações do projeto de otimização do alto-falante. Seus êxitos foram observados tanto nas avaliações mono-objetivo, quanto nas avaliações multi-objetivo.

Em sua avaliação mono-objetivo, a interatividade proposta neste trabalho forneceu uma melhora qualitativa para as funções de testes e para o problema principal avaliado, apresentando maiores eficiências no tempo de obtenção dos mínimos encontrados para cada função analisada. Para a função *Schwefel*, alcançou-se um rendimento de 0,05% na resposta à função, e 26,82% em seu tempo de obtenção, o qual foi considerado a menor eficiência das avaliações mono-objetivo após as intervenções do usuário. Por outro lado, a função *Rastrigin* obteve um rendimento de 53,01% na resposta à função, com uma melhora de 1,95% no seu tempo de obtenção, caracterizando a melhor eficiência das avaliações mono-objetivo referentes as soluções encontradas com a probabilidade de ocorrência de 80%.

Na avaliação multi-objetivo do problema principal (projeto alto-falante), foi possível verificar que para os dois objetivos avaliados, apresentados em (3) e (4), a interatividade do

usuário foi capaz de melhorar o processo de busca pela solução ótima, garantindo melhores respostas com um número menor de iterações. Para o objetivo apresentado em (3), alcançou-se através de sua otimização completa com a inserção de indivíduos, o melhor rendimento após as intervenções realizadas pelo usuário, obtendo uma melhora de 22,39% em sua resposta, com uma redução de 50,74% em seu tempo de convergência. Já no objetivo apresentado em (4), encontrou-se através da otimização parcial com a inserção de indivíduos as melhores soluções após a aplicação da interatividade, tendo uma eficiência de 23,60% em sua resposta, e 50,28% no seu tempo de obtenção, referentes as soluções obtidas para o percentual de ocorrência de 80%.

Na avaliação com mudança de objetivo, observou-se que a melhor solução encontrada para o objetivo apresentado em (3) se fez através do 2º Caso, com uma eficiência em sua resposta com relação ao caso em que não se aplica a intervenção do usuário (3º Caso) de 40,69%, juntamente com uma melhora em seu tempo de convergência de 10,87%. Após a mudança de objetivo, apresentado em (4), considerando as respostas alcançadas por estes casos, verificou-se uma melhora de 9,46% na resposta referente ao caso com a intervenção do usuário (2º Caso), e uma melhora de 7,02% na resposta referente ao caso sem a intervenção do usuário (3º Caso).

Na implementação em um ambiente industrial, espera-se que a contribuição do especialista (usuário) no decorrer do processo evolutivo proporcione ganhos tanto no tempo de adequações das soluções ao objetivo do projeto em análise, quanto no aperfeiçoamento das soluções encontradas, tendo em vista que o mesmo fornecerá informações baseadas em sua experiência profissional e/ou baseadas no histórico dos resultados já alcançados. Assim, a indústria eleva o desempenho do seu sistema corrigindo ou melhorando as soluções previamente encontradas, por meio da intervenção do usuário.

Como sugestão para trabalhos futuros, ampliando a aplicação da Interatividade do usuário às Estratégias de Evolução, é esperado que o método de seleção e de cruzamento possa ser realizado através da intervenção do usuário, selecionando para o processo de recombinação as soluções que melhor se qualificam ao objetivo do problema. Deste modo, as possibilidades de intervenção do manipulador na busca pela solução ótima aumentaram, proporcionando melhores resultados dentro do custo estimado, bem como a redução no tempo de convergência das mesmas, aumentando à robustez do processo.

REFERÊNCIAS

- [1] BÄCK, T. **Evolutionary Algorithms in Theory and Practice**. New York: Oxford University Press, 1996.
- [2] BÄCK, T. et al. **Evolutionary Programming and Evolution Strategies**: Similarities and Differences. In Proceedings of the Second Annual Conference on Evolutionary Programming, 1993.
- [3] BÄCK, T.; SCHWEFEL, H. An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization. **Evolutionary computation**, p. 1-23, 1993.
- [4] BÄCK, T.; SCHWEFEL, H. **Evolutionary Computation**: An Overview. International Conference on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE. 1996.
- [5] BREUKELAER, R. et al. On Interactive Evolution Strategies. **Applications of Evolutionary Computing**, p. 530-541, 2006.
- [6] BROWNLEE, J. **Clever Algorithms**: Narute-Inspired Programming Recipes. ©Copyright, 2011.
- [7] GRAF, J.; BANZHAF, W. **Artificial Evolution**. Interactive evolution for simulated natural evolution. Heidelberg: Springer. 1995.
- [8] HILDEBRAND, L. et al. **Directed Mutation – A New Self-Adaptation for Evolution Strategies**. Congress on Evolutionary Computation. Washington: IEEE. 1999.
- [9] INFOLYTICA CORPORATION. Optimization - Minimizing Loudspeaker Mass. **Infolytica Corporation**, 1978. Disponível em: <<http://www.infolytica.com/en/applications/ex0086/>>. Acesso em: 01 abr. 2016.
- [10] JESUS, L. H. R.; BRITO, L. C. Interactive Evolution Strategies for Minimizing Single-objective Functions. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, n. 5, p. 981-987, 2017.
- [11] MAGELE, C. **Evolution Strategies and Optimization**. Austria: IGTE Graz University of Technology, 2001.
- [12] MARTINS, J. P. **O Problema de Agendamento Semanal de Aulas**. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 83. 2010.
- [13] MEEKER, D. Finite Element Method Magnetics - FEMM v. 4.2. **Finite Element Method Magnetics**, 2015. Disponível em: <<http://www.femm.info/wiki/HomePage>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

- [14] RECHENBERG, I. **Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem.** Farnborough: Roy. Aircr. Establ. Libr. Transl., 1122, 1965.
- [15] RECHENBERG, I. **Evolutionsstrategie:** Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution. Frommann-Holzboog Verlag., 1973.
- [16] SCHWEFEL, H. **Kybernetische Evolution als Strategie der Experimentellen Forschung in der Strömungstechnik.** Berlin: 1965.
- [17] SCHWEFEL, H. **Numerical Optimization of Computer Models.** Chichester: Wiley, 1981.
- [18] SCHWEFEL, H. **Evolution and Optimum Seeking.** New York: Wiley, 1995.
- [19] SILAGADZE, Z. K. **Finding two-dimensional peak.** 2004.
- [20] SUDHANSHU, M. **Some new test functions for global optimization and performance of repulsive particle swarm method.** MPRA, 2006.
- [21] SUN, W.; YUAN, Y.-X. **Optimization Theory and Methods Nonlinear Programming.** [S.l.]: Springer Verlag., 2006.