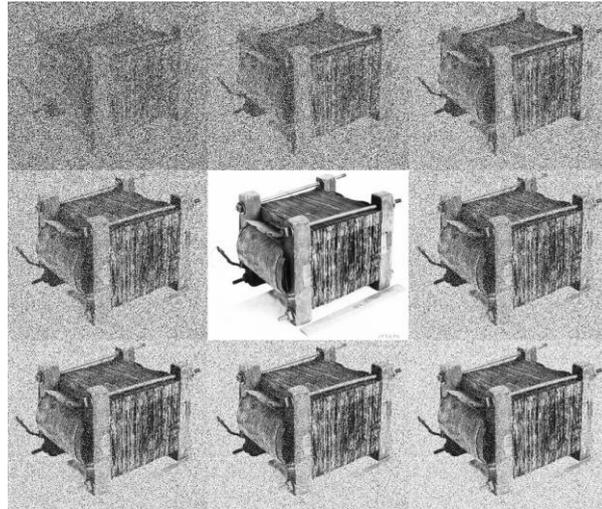




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica Energia e Automação



Dimensionamento de transformadores de distribuição recorrendo a técnicas heurísticas

PEDRO MIGUEL LEITE CLEMENTE ALVES

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Eletrotécnica – ramo de Energia

(Documento Final)

Orientadores:

Professor Pedro Miguel Neves da Fonte

Professora Rita Marcos Fontes Murta Pereira

Júri:

Presidente: Professor Luís Manuel dos Santos Redondo

Vogais:

Professor Fernando Manuel Fernandes Melício

Professor Pedro Miguel Neves da Fonte

Julho de 2021

RESUMO

Os transformadores têm um papel chave nas redes energéticas. A sua construção e design deve considerar vários aspetos, tais como limitações técnicas e legais, limitações de segurança e o custo de construção. Considerando apenas as componentes ativas do transformador é possível identificar 20 parâmetros específicos do fabrico, e do ponto de vista económico, 13 variáveis também são consideradas. Utilizando uma abordagem clássica, as variáveis são escolhidas tendo em conta as restrições impostas, seguidas de uma análise de sensibilidade feita a cada variável, para otimizar o custo de fabrico. Este processo pode ser demorado e o ótimo pode não ser encontrado. Nesta dissertação utilizam-se algoritmos genéticos na solução deste problema. É utilizada uma abordagem inovadora através da introdução do conceito de compensação genética no operador da mutação. Os resultados mostram um aumento de performance e convergência comparativamente à abordagem com algoritmos genéticos na versão original.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de potência, otimização, algoritmos genéticos, compensação genética.

ABSTRACT

Power transformers have a key role in the power system grids. Their manufacturing and design must consider several aspects, such as technical limits, legal constrains, security constrains and manufacturing price. Considering only power transformers' active parts, it is possible to identify 20 manufacturing specific parameters, and in economic point of view, 13 variables are also considered. Using a classic approach, variables are chosen accordingly with the defined constraints, followed by a sensitivity analysis preformed to each variable, to optimize the manufacturing cost. This procedure can be time consuming, and the optimum may not be reached. In this thesis, genetic algorithms are used. An innovative approach through the introduction of genetic compensation concept in mutation operator is detailed. Results pointed out an increased performance and consistency when compared with the genetic algorithm generic approach.

KEYWORDS

Power Transformer, Genetic Algorithms, Genetic Compensation.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus pais, Maria José e Paulo, pelo apoio incondicional e carinho que sempre me deram, e ao meu tio João, uma mente engenhosa que partiu cedo demais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Professora Rita Pereira e Professor Pedro Fonte, por todo o apoio, não podia ter tido melhores orientadores.

A toda a equipa docente e não docente do ISEL por toda a dedicação e profissionalismo que fazem desta escola um exemplo a ser seguido.

Aos meus colegas, Santos, Malheiro e Oliveira, que fizeram este percurso comigo, e que se vieram a tornar não só colegas, mas também amigos.

ABREVIATURAS

⌘ - Unidade monetária genérica

ADN – Ácido desoxirribonucleico

AI – Inteligência artificial (de *artificial intelligence*)

AG – Algoritmo genético

BT – Baixa tensão

FEM – Método dos elementos finitos (de *finite element method*)

GA – Algoritmo genético (de *genetic algorithm*)

GENITOR – Implementador genético (de *genetic implementor*)

NSGA-II – Algoritmo genético com ordenação não-dominada II (de *nondominated sorting genetic algorithm II*)

MT – Média tensão

REQM – Raiz do erro quadrático médio

LISTA DE VARIÁVEIS

Variável

a	Parâmetro de escala da equação do coeficiente de aproximação
A_{I1}	Área equivalente considerando a espessura do enrolamento de MT, [m ²]
A_{I2}	Área dos ductos de refrigeração de MT, [m ²]
A_{I3}	Área equivalente adicionando os ductos de refrigeração de MT, [m ²]
A_3	Área equivalente incluindo o papel de isolamento, [m ²]
A_5	Área equivalente de BT excluindo os ductos de refrigeração, [m ²]
A_6	Área dos ductos de refrigeração, [m ²]
A_7	Área do enrolamento de BT com os ductos, [m ²]
A_7	Área total de painéis de aço, [m ²]
A_9	Área equivalente considerando o isolamento entre o enrolamento de BT e MT, [m ²]
ACR	Aumento médio de temperatura do cobre, [K]
A_{CT}	Área ótima do reservatório de óleo, [m ²]
AOR	Aumento médio da temperatura do óleo, [K]
$area_{HV}$	Área do condutor do enrolamento de MT, [m ²]
$area_{LV}$	Área da secção do enrolamento de BT, [m ²]
$AvGra_{HV}$	Gradiente de temperatura médio entre o óleo e o enrolamento de MT, [K]
$AvGra_{LV}$	Gradiente médio de temperatura entre o óleo e o enrolamento de BT, [K]
b	Parâmetro de forma da equação de coeficiente de aproximação
$B_{LD_{HV}}$	Espessura do enrolamento de MT, [m]
$B_{LD_{LV}}$	Espessura do enrolamento de BT, [m]
BP	Preço de venda ao público do transformador, [R]
C_1	Custo do enrolamento de BT, [R]
C_2	Custo do enrolamento de MT, [R]
C_3	Custo do material magnético, [R]
C_4	Custo dos materiais de isolamento, [R]
C_5	Custo dos ductos de refrigeração, [R]
C_6	Custo do óleo mineral, [R]
C_7	Custo dos painéis de aço de construção, [R]
C_8	Custo dos painéis corrugados, [R]

C_{apr}	Coeficiente de aproximação do algoritmo genético
$C_{comp\ gen}$	Coeficiente de compensação genética
$CL_{HV,1}$	Comprimento do enrolamento de MT de 20 kV, [m]
$CL_{HV,2}$	Comprimento do enrolamento de MT para a tensão mínima, [m]
CL_{LV}	Comprimento total dos enrolamentos de BT, [m]
CM	Custo total dos materiais de construção, [R\$]
CMM	Custo dos materiais de construção do transformador, [R\$]
$CMT1$	Linha média da janela mais pequena, [m]
$CMT2$	Linha média da janela maior, [m]
$CoilLoss_{HV}$	Perdas em cada enrolamento de MT, [W]
$CoilLoss_{LV}$	Perdas em cada enrolamento de BT, [W]
CPA	Área de painéis corrugados, [m ²]
CPC	Coeficiente de transferência de calor dos painéis corrugados, [W/m ²]
CPL	Transferência de calor devido aos painéis corrugados, [W]
CTM	Custo de construção do transformador, [R\$]
$D11$	Diâmetro equivalente considerando a espessura do enrolamento de MT, [m]
$D13$	Diâmetro equivalente para a área A13, [m]
$D3$	Diâmetro equivalente incluindo o papel de isolamento, [m]
$D5$	Diâmetro equivalente de BT excluindo os ductos de refrigeração, [m]
$D7$	Diâmetro equivalente do enrolamento BT com ductos, [m]
$D9$	Diâmetro equivalente considerando o isolamento entre o enrolamento de BT e MT, [m]
DMC	Diâmetro equivalente do enrolamento de BT, [m]
$DuctArea_{HV}$	Área dos ductos de arrefecimento de MT, [m ²]
$DuctArea_{LV}$	Área dos ductos de refrigeração, [m ²]
$dvar$	Conjunto de variáveis sujeitas a restrição
E_u	Espessura da perna do núcleo do transformador, [m]
$F1$	Largura da janela pequena do núcleo, [m]
$F2$	Largura da janela grande do núcleo, [m]
$GapDuctArea_{HV}$	Distanciamento entre ductos de refrigeração de MT, [m ²]
$GapDuctArea_{LV}$	Área da distância entre ductos de refrigeração, [m ²]
Ger_{max}	Número máximo de gerações do algoritmo genético
Gra_{HV}	Gradiente de temperatura para o enrolamento de MT, [K]
Gra_{LV}	Gradiente de temperatura para o enrolamento de BT, [K]

$HV_{p,min}$	Tensão mínima presente no enrolamento de MT, [V]
i	Número da corrida do algoritmo genético
I_{HVL}	Espessura de isolamento para o condutor de MT, [m]
I_{LVL}	Espessura de isolamento para o condutor de BT, [m]
$Impulse_{HV}$	Tensão de impulso de MT, [V]
$Impulse_{LV}$	Tensão de impulso de BT, [V]
$Induced_{HV}$	Tensão induzida de MT, [V]
$Induced_{LV}$	Tensão induzida no enrolamento de BT, [V]
$I_{p,HV,1}$	Corrente por fase do enrolamento de MT de 20 kV, [A]
$I_{p,HV,2}$	Corrente por fase para a tensão mínima, [A]
$I_{p,HV,2,subcoil}$	Corrente para a tensão mínima em cada enrolamento parcial, [A]
$I_{p,LV}$	Corrente por fase de BT, [A]
IR	Parte resistiva da tensão de curto-circuito
IX	Parte indutiva da tensão de curto-circuito
k	Parâmetro de forma da distribuição <i>gamma</i>
k_L	Fator k_L para cálculo de indutância dos enrolamentos
k_P	Fator k_P para cálculo de indutância dos enrolamentos
$L17$	Indutância L17 dos enrolamentos, [H]
$L21$	Indutância L21 dos enrolamentos, [H]
$L25$	Indutância L25 dos enrolamentos, [H]
$L26$	Indutância L26 dos enrolamentos, [H]
$L27$	Indutância L27 dos enrolamentos, [H]
$L28$	Indutância L28 dos enrolamentos, [H]
$L29$	Indutância L29 dos enrolamentos, [H]
$Layers_{HV}$	Número de camadas do enrolamento de MT de 20 kV
$Layers_{LV}$	Número de camadas do enrolamento de BT
LCW	Massa da janela grande do núcleo, [kg]
LG_{HV}	Dimensão dos ductos de refrigeração de MT, [m]
LG_{LV}	Dimensão dos ductos de refrigeração de BT, [m]
$LH23$	Indutância LH23 dos enrolamentos, [H]
LL_1	Perdas em carga para o nível de tensão principal (20 kV), [W]
LL_2	Perdas em carga para a tensão mínima, [W]
$LL_{HV,1}$	Perdas em carga para os enrolamentos de MT de 20 kV, [W]
$LL_{HV,2}$	Perdas em carga para a tensão de MT mínima, [W]

$LL_{HV,2,subcoil}$	Perdas em carga para a tensão de MT mínima do enrolamento parcial, [W]
LL_{LV}	Perdas em carga do enrolamento de BT, [W]
LPS_{HV}	Perdas por unidade de área para o enrolamento de MT, [W/m ²]
LPS_{LV}	Perdas do enrolamento de BT, [W/m ²]
L_{tot}	Indutância total do enrolamento, [H]
$MaxGra$	Gradiente de temperatura máximo, [K]
ML	Comprimento médio do enrolamento de BT, [m]
MS	Margem de lucro da venda do transformador, [%]
MT_{HV}	Perímetro médio do enrolamento de MT, [m]
MT_{LV}	Perímetro médio do enrolamento de BT, [m]
MW	Largura média do enrolamento de BT, [m]
N_1	Número de tiras de ductos de refrigeração de BT
N_2	Número de ductos de refrigeração perimétricos de BT
N_3	Número de tiras de ductos de refrigeração de MT
N_4	Número de ductos de refrigeração perimétricos de MT
NCP	Número total de painéis corrugados
$NCPTL$	Número de painéis corrugados ao longo do comprimento da cuba
$NCPTW$	Número de painéis corrugados ao longo da largura da cuba
NLL	Perdas em vazio, [W]
$NPEGI$	Número de papéis de isolamento com espessura de 0,28 mm entre os enrolamentos de MT
$NPGI$	Número de papéis de isolamento com espessura de 0,28 mm entre BT e MT
N_{var}	Número de variáveis de entrada do algoritmo genético
OH	Altura do óleo mineral dentro da cuba, [m]
OLI_{HV}	Isolamento de papel do enrolamento de MT, [m]
OLI_{LV}	Isolamento de papel do enrolamento de BT, [m]
$RAND$	Número real aleatório entre 0 e 1
$R_{HV,1}$	Resistência do enrolamento de MT de 20 kV, [Ω]
$R_{HV,2}$	Resistência do enrolamento de MT para a tensão mínima, [Ω]
R_{LV}	Resistência do enrolamento de BT, [Ω]
SCW	Massa da janela pequena do núcleo, [kg]
$S_{HV,EDI}$	Área do terminal dos ductos de isolamento com espessura de 0,15 mm de MT, [m ²]

$S_{HV,GI}$	Área de espaçamento de isolamento com espessura de 0,28 mm de MT, [m ²]
$S_{HV,IBP}$	Área de cartão de isolamento de MT de 1,5 mm, [m ²]
$S_{HV,LI}$	Área da camada de isolamento com espessura de 0,28 mm de MT, [m ²]
$S_{HV,PDI}$	Área de isolamento dos tubos perimétricos com espessura de 0,15 mm de MT, [m ²]
$S_{HV,Sub}$	Área de isolamento dos enrolamentos parciais de MT, [m ²]
$S_{LV,EDI}$	Área do terminal dos ductos de isolamento com espessura de 0,15 mm, [m ²]
$S_{LV,EPI}$	Área da extensão de isolamento de papel com espessura de 0,41 mm, [m ²]
$S_{LV,GI}$	Área do espaçamento de isolamento com espessura de 0,28 mm de BT, [m ²]
$S_{LV,LI}$	Área de isolamento com espessura de 0,28 mm de BT, [m ²]
$S_{LV,PDI}$	Área de isolamento dos tubos perimétricos com espessura de 0,15 mm, [m ²]
$S_{LV,TP}$	Área de tubo de papel de 1,5 mm de BT, [m ²]
$SNLL_{TF}$	Perdas em vazio específicas, [W/kg]
$SPLD_{HV}$	Espessura total do enrolamento de MT, [m]
$SPLD_{LV}$	Espessura total do enrolamento de BT, [m]
TCA	Área de convecção da cuba do transformador, [m ²]
TCC	Coefficiente de convecção da cuba do transformador, [W/m ²]
TCD	Espessura total dos ductos de arrefecimento, [m]
TCL	Transferência de calor devido à convecção, [W]
TD_{HV}	Largura do enrolamento de MT, [m]
TD_{LV}	Largura do enrolamento de BT, [m]
TH_{min}	Altura mínima da cuba, [m]
TL	Comprimento da cuba, [m]
TLC	Comprimento total da bobine, [m]
TLR_{TT}	Transferência de calor total, [W]
TOC	Custo total de posse do transformador, [€]
$TotalDuctArea_{LV}$	Área total dos ductos, [m ²]
$TotalDuctsArea_{HV}$	Área total dos ductos de refrigeração de MT, [m ²]
TRA	Área de radiação da cuba do transformador, [m ²]
TRC	Coefficiente de radiação da cuba do transformador, [W/m ²]
TRL	Transferência de calor devido à radiação, [W]

TTL_2	Perdas totais do transformador para o nível de tensão de 6 kV, [W]
$turns_{HV,max}$	Número máximo de espiras do enrolamento de MT de 20 kV
$Turns_{HV,min}$	Número de espiras mínimo para o nível de tensão mínima de MT
$TurnsMain_{HV}$	Número de espiras do enrolamento de MT de 20 kV
$TurnsMain_{LV}$	Número de espiras efetivo de BT
$TurnsPerLayer_{HV}$	Espiras por camada do enrolamento de MT de 20 kV
$TurnsPerLayer_{HV,subcoil}$	Espiras por camada do enrolamento de MT de 6,6 kV
$TurnWidth_{HV}$	Largura de cada volta do enrolamento de MT, [m]
TW	Largura da cuba, [m]
U_k	Tensão de curto-circuito
$U_{p,HV,maxtap}$	Tensão do enrolamento de MT de 20 kV com tomada de tensão no máximo, [V]
$U_{p,HV,mintap}$	Tensão de MT com a tomada de tensão na posição mínima, [V]
$U_{p,HV1}$	Tensão do enrolamento de MT de 20 kV, [V]
$U_{p,HV2}$	Tensão do enrolamento de MT de 6,6 kV, [V]
$U_{p,LV}$	Tensão entre fase e neutro do secundário do transformador, [V]
V_{CP}	Volume dos painéis corrugados, [m ³]
V_{MM}	Volume do material magnético (aço do núcleo), [m ³]
V_O	Volume de óleo mineral, [m ³]
VPT	Tensão por volta do enrolamento de BT, [V]
V_T	Volume da cuba, [m ³]
V_{Wd}	Volume dos enrolamentos de BT e MT, [m ³]
w_1	Massa do enrolamento de BT, [kg]
w_2	Massa do enrolamento de MT, [kg]
w_3	Massa do núcleo, [kg]
w_4	Massa total dos materiais de isolamento, [kg]
w_5	Massa total de ductos de refrigeração, [kg]
w_6	Massa do óleo mineral, [kg]
w_7	Massa de painel de aço, [kg]
w_8	Massa de painéis corrugados, [kg]
$WIM_{0,15}$	Massa do material de isolamento com espessura de 0,15 mm, [kg]
$WIM_{0,28}$	Massa do material de isolamento com espessura de 0,28 mm, [kg]
$WIM_{0,41}$	Massa do material de isolamento com espessura de 0,41 mm, [kg]
$WIM_{1,5}$	Massa do material de isolamento com espessura de 1,5 mm, [kg]
X_i	Valor dos limites do novo intervalo de procura do AG

$x_{i,melhor}$	Melhor valor da variável na corrida i
x_n	Valor do variável n
x_n^{melhor}	Melhor valor de determinada variável
$x_n^{mutante}$	Valor mutante de determinada variável
θ	Parâmetro de escala da distribuição <i>gamma</i>
μ	Valor médio
σ	Desvio padrão

CONVENÇÕES

1 – Bibliografia

Neste trabalho as referências bibliográficas são efetuadas de acordo com a norma portuguesa em vigor, NP 405-1:1994. Dentro desta norma, optou-se pela utilização de citações entre parênteses com o número que lhe está atribuído na bibliografia.

A bibliografia contém as referências realizadas ao longo do texto, listadas segundo a ordem da primeira invocação no texto.

É considerada a utilização de abreviaturas, nos seguintes casos: nomes próprios de autores e editores literários; títulos de publicação em série, de acordo com a NP 139:1964; palavras e termos utilizados nas referências bibliográficas de acordo com a NP 3680:1989.

2 – Sistema de unidades de medida

Neste texto é utilizado, salvo menção expressa em contrário, o Sistema Internacional (SI) de unidades de medida, bem como os símbolos e abreviaturas normalmente para os múltiplos e submúltiplos das diversas unidades. Por ser um sistema de unidades bem conhecido essas abreviaturas não são citadas na secção “Abreviaturas” contida neste documento.

3 – Utilização de estrangeirismos

Ao longo desta dissertação utilizam-se alguns estrangeirismos fundamentalmente por dois motivos. O primeiro refere-se a palavras que ainda não se encontrem definidas na língua portuguesa e o segundo refere-se a palavras em que a mera tradução linguística faça perder o significado técnico atribuído às mesmas no original.

Assim, todos os estrangeirismos são realçados ao longo do texto em *itálico*.

ÍNDICE

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 – Motivação do trabalho.....	2
1.2 – Objetivos	2
1.3 – Enquadramento do trabalho	3
1.4 – Estrutura da tese	3
Capítulo 2	5
Caracterização do transformador	5
2.1 – Características técnicas e variáveis de entrada.....	6
2.2 – Equações de dimensionamento do transformador.....	10
2.3 – Formulação do problema.....	38
Capítulo 3	43
Estado da arte.....	43
Capítulo 4	49
Algoritmo genético	49
4.1 – Introdução	49
4.2 – Seleção	52
4.3 – Crossover.....	55
4.4 – Mutação.....	56
4.5 – Mutação com efeito de compensação genética	57
4.6 – Elitismo	58
4.7 – Critérios de paragem	60
4.8 – Fluxogramas das versões do algoritmo genético	62
4.9 – Validação do algoritmo com recurso à função de Rastrigin	65
4.10 – Aplicação da versão base	66
4.11 – Aplicação da versão com compensação genética.....	67
4.12 – Aplicação da versão com inclusão de intervalo adaptativo	69
4.13 – Implementação do AG para dimensionamento do transformador	71
Capítulo 5	73
Aplicação do algoritmo genético ao dimensionamento do transformador	73

5.1 – Dimensionamento convencional.....	73
5.2 – Dimensionamento com algoritmo genético	77
5.3 – Análise do efeito da Compensação genética	89
5.4 – Intervalo adaptativo	95
Capítulo 6.....	101
Conclusões.....	101
6.1 – Considerações sobre a caracterização do transformador	101
6.2 – Algoritmos genéticos	102
6.3 – Aplicação do AG ao dimensionamento do transformador	103
6.4 – Limitações e desenvolvimentos futuros.....	108
Bibliografia	111
Anexo A.....	115
Código em <i>Matlab</i> ®.....	115
A.1 – Parâmetros do transformador.....	115
A.2 – Equações de dimensionamento do transformador	117
A.3 – <i>Script</i> Algoritmo genético base.....	129
A.4 – Função seleção por torneio	135
A.5 – Função <i>crossover</i>	137
A.6 – Função mutação	137
A.7 – Função elitismo.....	138
A.8 – Função melhor valor possível	140
A.9 – Função critério de paragem.....	142
A.10 – Função mutação com compensação genética	142
A.11 – <i>Script</i> AG com intervalo adaptativo	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação da formulação, entradas/saídas	6
Figura 2.2 - Exemplo de transformação de diagrama em função [Equação (2.122)].....	11
Figura 2.3 - Dimensões do núcleo do transformador (meia vista)	12
Figura 4.1 – Elementos construtivos da população de AG	49
Figura 4.2 – Função objetivo e valor de aptidão	50
Figura 4.3 - Fluxograma do algoritmo genético	51
Figura 4.4 - Fluxograma do algoritmo de seleção binária por torneio com restrições	53
Figura 4.5 - População para exemplo de seleção por torneio	54
Figura 4.6 - Exemplo de <i>crossover</i> simples, pais (P) e filhos (F)	55
Figura 4.7 – Exemplo de mutação binária, original (A) e mutado (A')	56
Figura 4.8 - Exemplo de mutação não-binária, original (C) e mutado (C').....	57
Figura 4.9 - Fluxograma da função elitismo com restrições	59
Figura 4.10 - Exemplo de elitismo, sem restrições, coeficiente 50%	60
Figura 4.11 - Esquema de funcionamento dos critérios de paragem.....	61
Figura 4.12 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético (versão base)	62
Figura 4.13 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo com intervalo adaptativo	64
Figura 4.14 – Resultados teste versão base, intervalo [-100; 100]	66
Figura 4.15 – Resultados teste versão base, intervalo [4,7; 204,7]	67
Figura 4.16 - Resultados teste compensação genética, intervalo [-100; 100]	68
Figura 4.17 - Resultados teste compensação genética, intervalo [4,7; 204,7].....	68
Figura 4.18 – Exemplo de convergência com intervalo adaptativo (inicial: [-100, 100])	69
Figura 4.19 – Resultados teste intervalo adaptativo, intervalo [-100; 100].....	70
Figura 4.20 – Resultados teste intervalo adaptativo, intervalo [4,7; 204,7]	70
Figura 5.1 – Diagrama do dimensionamento convencional	73
Figura 5.2 - Efeito do tamanho da população no custo e tempo	78
Figura 5.3 – Efeito do tamanho da população na solução e sucesso	79
Figura 5.4 – Efeito do coeficiente de <i>crossover</i> no custo de construção e no tempo de processamento	80
Figura 5.5 – Efeito do coeficiente de <i>crossover</i> na solução e sucesso	81
Figura 5.6 – Efeito do coeficiente de mutação no custo e tempo	82
Figura 5.7 - Efeito do coeficiente de mutação na solução e sucesso do AG	83
Figura 5.8 - Efeito do coeficiente de elitismo no custo e tempo	84

Figura 5.9 - Efeito do coeficiente de elitismo na solução e sucesso	84
Figura 5.10 - Efeito das gerações de <i>stall</i> no custo e tempo	85
Figura 5.11 - Efeito das gerações de <i>stall</i> na solução e sucesso	86
Figura 5.12 - Efeito do número de corridas no custo e tempo	87
Figura 5.13 - Efeito do número de corridas na solução e sucesso	88
Figura 5.14 – Corridas para diversos parâmetros de mutação e compensação genética de acordo com Tabela 5.14	90
Figura 5.15 – Custo mínimo para várias combinações de mutação e compensação genética .	92
Figura 5.16 – Sucesso do algoritmo para várias combinações de mutação e compensação genética	93
Figura 5.17 – Tempo de processamento para várias combinações de mutação e compensação genética	93
Figura 5.18 – Valor do coeficiente de aproximação em função da corrida (no eixo do lado direito para b=10).....	96
Figura 5.19 – Resultados de 43 iterações com intervalo adaptativo para cada valor de “b” e referência sem adaptação (43 corridas).....	97
Figura 5.20 – Custo mínimo do transformador com utilização de intervalo adaptativo.....	98
Figura 5.21 – Sucesso do algoritmo com utilização de intervalo adaptativo.....	98
Figura 5.22 – Tempo de processamento com utilização de intervalo adaptativo	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros característicos do transformador.....	6
Tabela 2.2 – Parâmetros intrínsecos do transformador	7
Tabela 2.3 – Parâmetros normativos do transformador.....	7
Tabela 2.4 – Parâmetros de custo do transformador	8
Tabela 2.5 – Parâmetros diversos do transformador	9
Tabela 2.6 – Parâmetros para cálculo de secção dos condutores do transformador.....	9
Tabela 2.7 – Variáveis de entrada	10
Tabela 4.1 – Parâmetros de entrada algoritmo genético (validação).....	65
Tabela 4.2 – Genes do AG aplicado ao dimensionamento do transformador	71
Tabela 4.3 – Restrições para o dimensionamento do transformador.....	72
Tabela 5.1 - Variáveis de entrada das várias corridas	75
Tabela 5.2 – Melhores resultados e tempo de processamento de cada corrida	75
Tabela 5.3 - Características do transformador (variáveis de entrada)	76
Tabela 5.4 - Restrições de dimensionamento	76
Tabela 5.5 – Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo da população.....	77
Tabela 5.6 - Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo do <i>crossover</i>	79
Tabela 5.7 - Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo da mutação.....	81
Tabela 5.8 - Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo do elitismo	83
Tabela 5.9 - Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo do <i>stall</i>	85
Tabela 5.10 - Parâmetro de entrada do algoritmo genético, estudo das corridas	87
Tabela 5.11 – Variáveis de entrada para o melhor caso com parâmetros ajustados do algoritmo na versão base.....	88
Tabela 5.12 – Variáveis sujeitas a restrição para o melhor caso com parâmetros ajustados na versão base.....	89
Tabela 5.13 – Parâmetros do AG para dimensionamento com compensação genética	90
Tabela 5.14 – Equivalências da Figura 5.14.....	91
Tabela 5.15 - Variáveis de entrada para o melhor caso com utilização de compensação genética.....	94
Tabela 5.16 - Variáveis sujeitas a restrição para o melhor caso com utilização de compensação genética.....	94
Tabela 5.17 – Parâmetros do algoritmo genético para a versão com utilização intervalo adaptativo	95

Tabela 5.18 - Variáveis de entrada para o melhor caso com utilização de intervalo adaptativo	99
Tabela 5.19 - Variáveis sujeitas a restrição para o melhor caso com utilização de intervalo adaptativo	100
Tabela 6.1 - Resultados e erros absolutos da validação com a função de Rastrigin.....	102
Tabela 6.2 - Resultados da aplicação do algoritmo genético ao dimensionamento do transformador	106

Capítulo 1

Introdução

Os transformadores de distribuição são máquinas elétricas fundamentais para a rede elétrica em tensão alternada, uma vez que permitem a transformação entre os diferentes níveis de tensão da rede elétrica [1]. No caso dos transformadores de distribuição permitem que a energia das linhas de alta tensão seja transformada para valores de tensão que podemos utilizar, com segurança, nas instalações de baixa tensão, para os mais diversos fins. O dimensionamento de transformadores é uma tarefa complexa, sujeita a muitas restrições, como por exemplo normas, e que requer conhecimentos profundos por parte do projetista. Ao mesmo tempo, a indústria requer cada vez mais que os produtos sejam otimizados, tanto do ponto de vista económico como do ponto de vista ambiental. Os transformadores não são alheios a essa tendência, portanto há a necessidade de otimizar o problema complexo do dimensionamento dum transformador. Para efetuar essa otimização, neste trabalho, foram utilizados os algoritmos genéticos.

Os algoritmos genéticos são um tipo de técnicas heurísticas (processos de procura) inspirados na teoria da seleção natural de Charles Darwin, que define a Seleção Natural como: “Nomeei este princípio, no qual a mais pequena variação, se é útil, é preservada, com o termo de Seleção Natural...” [2]. Um algoritmo genético resulta da aplicação dos conceitos da seleção natural na computação ou investigação operacional e tem demonstrado sucesso em encontrar soluções de qualidade para diversos tipos de problemas [3]¹.

Nesta dissertação os algoritmos genéticos são aplicados ao dimensionamento de um tipo de transformador de distribuição com o objetivo de minimizar o seu custo de fabrico.

¹ Por exemplo, na capa desta dissertação, o algoritmo genético desenvolvido nesta dissertação é utilizado para fazer uma reconstrução duma fotografia do primeiro transformador de distribuição, construído por William Stanley em 1886 na eletrificação de Great Barrington nos Estados Unidos Da América

1.1 – Motivação do trabalho

O tema da inteligência artificial é cada vez mais premente na solução de problemas em engenharia, sendo que a sua aplicação foi objeto de estudo unidade curricular de Sistemas Inteligentes do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Nesta dissertação o uso dos algoritmos genéticos não estava explícito, sendo que apenas estava definido que iriam utilizar-se meta-heurísticas para aplicar ao problema do dimensionamento do transformador. Essa incógnita, de não se saber ao certo o caminho a percorrer, tornou-se aliciante e a escolha dos algoritmos genéticos acabou por ser uma seleção natural dentro dos algoritmos encontrados na literatura. Além disso, nesta dissertação são aplicados conceitos multidisciplinares abordados em diferentes unidades curriculares do curso de mestrado em engenharia eletrotécnica.

A aplicação de técnicas de inteligência artificial no dimensionamento dos transformadores torna-se relevante na medida em que com a eletrificação da economia, a otimização do dimensionamento dos transformadores é mais um dos elementos-chave que contribuem para otimização do sistema elétrico a nível global.

1.2 – Objetivos

Esta dissertação tem essencialmente três objetivos:

1. Apresentar e estruturar um modelo matemático capaz de representar um transformador de distribuição;
2. Desenvolver e validar um algoritmo de otimização. Após revisão bibliográfica e verificação do estado da arte em relação à otimização, escolher o algoritmo. Depois de escolhido o algoritmo deve ser validado matematicamente, sujeitando-o a uma função com diversos mínimos locais conhecidos;
3. Aplicar o algoritmo validado ao modelo matemático que modela o transformador de distribuição. Comparar resultados com resultados de referência obtidos através de um caminho paralelo.

1.3 – Enquadramento do trabalho

Esta dissertação enquadra-se no seguimento da aplicação de algoritmos de otimização ao problema de dimensionamento de transformadores. Sendo um problema complexo, não diferenciável, com variáveis discretas, sujeito a muitas restrições, é passível de ser resolvido com algoritmos baseados em inteligência artificial. Várias técnicas têm sido utilizadas, tanto para resolução de parte ou da totalidade do problema, no Capítulo 3 uma visão geral das meta-heurísticas utilizadas é apresentada.

Esta dissertação apresenta uma abordagem inovadora na medida em que é desenvolvida uma alteração do algoritmo genético, introduzido o efeito de compensação genética, que visa melhorar os resultados apresentados pela aplicação dos algoritmos genéticos na resolução do problema de otimização do dimensionamento de transformadores.

1.4 – Estrutura da tese

Esta dissertação está dividida em seis capítulos:

No Capítulo 1 é feita uma síntese dos temas tratados na dissertação, é apresentada a motivação do trabalho, os objetivos a que se propõe, o enquadramento e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2 é desenvolvida a formulação matemática que define um transformador de distribuição de 630 kVA, 20/6,6/0,4 kV com núcleo de fluxos livres (tipo *shell*). São definidas as variáveis de entrada, restrições e função objetivo.

No Capítulo 3 é apresentado o estado da arte, um enquadramento da aplicação de algoritmos de otimização e inteligência artificial aplicados ao dimensionamento do transformador. Neste capítulo é revista a bibliografia sobre o tema, não só em relação ao transformador como um todo, mas também aplicações mais específicas.

No Capítulo 4 é descrito e validado o algoritmo genético. São apresentadas as funções que compõem o algoritmo e os diagramas de funcionamento do mesmo. No final do capítulo é feita uma validação do algoritmo desenvolvido através de testes com a função de Rastrigin.

No Capítulo 5 o algoritmo genético é aplicado ao dimensionamento do transformador. Com vista a ter valores de referência, começa-se por efetuar uma busca por força bruta (*brute force*); desta busca resultam os valores para comparação com o algoritmo genético. É apresentada uma

análise de sensibilidade aos parâmetros do algoritmo genético na versão base, i.e., sem a introdução do efeito da compensação genética. São aplicadas e comparadas três abordagens da aplicação de algoritmos genéticos (a versão base, a versão que inclui a compensação genética na mutação e a versão com intervalo adaptativo) na solução do problema de otimização.

No Capítulo 6 é feita uma análise aos resultados obtidos e são apresentadas as conclusões sobre o trabalho. Também são identificados possíveis caminhos a seguir com os resultados obtidos.

Capítulo 2

Caracterização do transformador

Existem na literatura várias fontes que abordam a caracterização do transformador de potência do princípio ao fim, algumas mais antigas outras mais recentes. A evolução tem ditado o uso cada vez maior de técnicas computacionais no design de transformadores, nas quais se destacam mais recentemente os elementos finitos e a inteligência artificial. Encontrar uma fonte que apresente, numa forma estruturada, o dimensionamento do transformador não é fácil, pois, por vezes, a informação encontra-se dispersa e dependente uma das outras. Da literatura destacam-se algumas fontes: em [1] é apresentado um guia passo-a-passo para o protocolo de dimensionamento do transformador, com referência a várias secções do livro ao longo do protocolo. Nesta referência já é feito uso de algum poder computacional. Em [4] a caracterização do transformador é feita tendo como base o circuito elétrico equivalente, partindo daí para as diversas especialidades (dimensionamento mecânico, térmico, etc.), sugerindo no final uma abordagem de otimização baseada na redução do custo de construção do transformador. Na referência [5] é descrita detalhadamente a modelação matemática para dimensionamento do transformador, com um exemplo de dimensionamento, e são abordadas novas técnicas de otimização, quer de elementos finitos quer de inteligência artificial. Neste capítulo apresenta-se o dimensionamento descrito em [5], recorrendo ao exemplo apresentado como base de trabalho para implementação do processo de otimização, cuja função objetivo irá retornar o custo de construção e de posse do transformador.

Na Figura 2.1 é apresentado o esquema que sintetiza o funcionamento da formulação apresentada neste capítulo. As variáveis de entrada e os parâmetros são apresentados no subcapítulo 2.1. Ao longo do subcapítulo 2.2 é apresentada a formulação que permite transformar as entradas em saídas. No subcapítulo 2.3 é definida a função objetivo e são apresentadas as restrições a que o problema está sujeito.

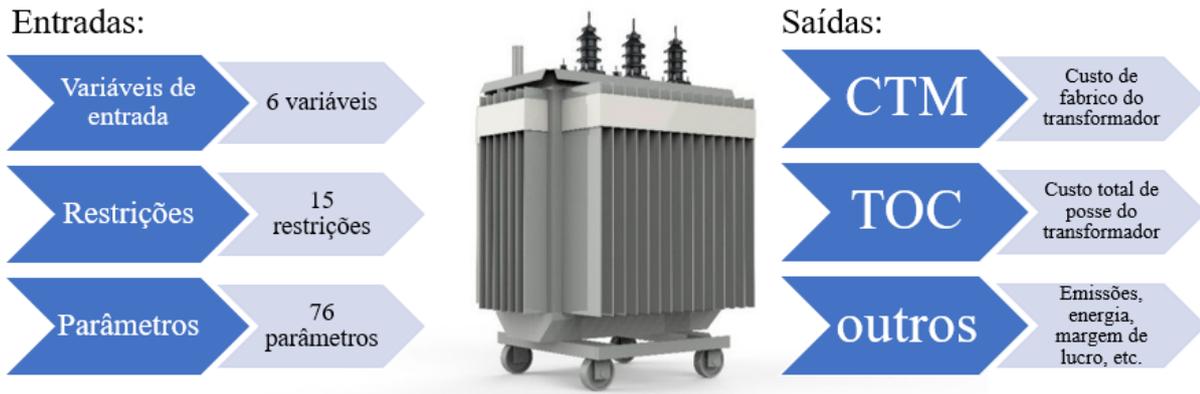


Figura 2.1 - Representação da formulação, entradas/saídas

2.1 – Características técnicas e variáveis de entrada

O exemplo de dimensionamento apresentado em [5] é relativo a um transformador de três enrolamentos do tipo *shell* com potência de 630 kVA com dois níveis de tensão no lado da média tensão. Os principais parâmetros do transformador constam na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Parâmetros característicos do transformador

Parâmetro	Valor	Descrição
f	50 [Hz]	Frequência
$HVCC$	Triângulo	Tipo de ligação lado MT
$LVCC$	Estrela	Tipo de ligação lado BT
S_n	630×10^3 [VA]	Potência do transformador
U_{HV1}	20000 [V]	Média tensão principal
U_{HV2}	6600 [V]	Média tensão secundária
U_{LV}	400 [V]	Baixa tensão

Na Tabela 2.2 são apresentados os parâmetros intrínsecos do transformador. Desde tensões de isolamento até massas específicas, passando pela saturação magnética. A saturação magnética adotada neste documento é a mesma que foi adotada na referência [6].

Tabela 2.2 – Parâmetros intrínsecos do transformador

Parâmetro	Valor	Descrição
BIL_{HV}	125×10^3 [V]	Tensão de isolamento base MT
BIL_{LV}	10×10^3 [V]	Tensão de isolamento base BT
$Induced_{max}$	6×10^3 [V]	Tensão máxima induzida para isolamento de 0,28 mm
$Impulse_{max}$	$23,5 \times 10^3$ [V]	Tensão máxima de impulso para isolamento de 0,28 mm
CSF	0,965	Fator de empilhamento do núcleo
g_{CP}	9,87 [kg/m ²]	Massa por unidade de área dos painéis corrugados
g_{DS}	1250 [kg/m ³]	Massa específica das fitas dos ductos
g_{HV}	8856 [kg/m ³]	Massa específica do enrolamento de MT
g_{LV}	8856 [kg/m ³]	Massa específica do enrolamento de BT
g_{MM}	7650 [kg/m ³]	Massa específica do aço magnético
g_o	870 [kg/m ³]	Massa específica do óleo mineral
$LDSP_{HV}$	1	Fator de direção espacial enrolamento MT
$LDSP_{LV}$	0,909	Fator de direção espacial enrolamento BT
$T_{a,max}$	45 [°C]	Temperatura ambiente máxima
$TDSP_{HV}$	0,98	Fator de direção de espiras enrolamento MT
$T_{w,max}$	100 [°C]	Temperatura máxima do enrolamento
ρ_{HV}	$2,0968 \times 10^{-8}$ [Ωm]	Resistividade enrolamento MT
ρ_{LV}	$2,0968 \times 10^{-8}$ [Ωm]	Resistividade enrolamento BT
FD_{sat}	1,7 [T]	Saturação magnética [6]

Na Tabela 2.3 constam os parâmetros normativos do transformador, alguns deles definidos na norma IEC 60076.

Tabela 2.3 – Parâmetros normativos do transformador

Parâmetro	Valor	Descrição
EdL_{HV}	266 [W]	Perdas por correntes de Foucault do enrolamento MT
EdL_{LV}	399 [W]	Perdas por correntes de Foucault do enrolamento BT
LL_g	8900 [W]	Perdas garantidas em carga
NLL_g	1100 [W]	Perdas garantidas em vazio
$Taps_{HV,max}$	5 [%]	Limite máximo tomada de tensão MT
$Taps_{HV,min}$	-5 [%]	Limite mínimo tomada de tensão MT
U_{kg}	6 [%]	Tensão de curto-circuito garantida
μ_0	$4\pi^{-7}$ [H/m]	Permeabilidade no vácuo
TH	1015×10^{-3} [m]	Altura máxima da cuba

Na Tabela 2.4 estão definidos os parâmetros de custo do transformador. Os valores monetários são apresentados em unidade monetária genérica em que 1 r equivale aproximadamente a 1 dólar americano de 2009. Para o âmbito deste trabalho os valores apresentados são suficientes.

Tabela 2.4 – Parâmetros de custo do transformador

Parâmetro	Valor	Descrição
<i>A</i>	13,99 [r/W]	Custo de perdas em vazio
<i>B</i>	2,09 [r/W]	Custo de perdas em carga
<i>C_{lab}</i>	4541 [r]	Custo mão-de-obra
<i>CRM</i>	1236 [r]	Custo dos restantes materiais
<i>SM</i>	35 [%]	Margem de lucro
<i>uc₁</i>	12,01 [r/kg]	Custo enrolamento BT
<i>uc₂</i>	12,01 [r/kg]	Custo enrolamento MT
<i>uc₃</i>	6,01 [r/kg]	Custo aço magnético
<i>uc₄</i>	7,72 [r/kg]	Custo papel isolante
<i>uc₅</i>	8,58 [r/kg]	Custo fitas dos ductos
<i>uc₆</i>	1,72 [r/kg]	Custo óleo mineral
<i>uc₇</i>	1,03 [r/kg]	Custo chapa de aço
<i>uc₈</i>	1,20 [r/kg]	Custo painéis corrugados

Na Tabela 2.5 apresentam-se os parâmetros diversos do transformador. São essencialmente parâmetros dimensionais cuja visualização pode ser facilitada pela análise das figuras apresentadas em [5].

Tabela 2.5 – Parâmetros diversos do transformador

Parâmetro	Valor	Descrição
<i>CCEE</i>	3×10^{-3} [m]	Distância entre núcleo e enrolamento
<i>D_{HVC}</i>	39×10^{-3} [m]	Distância entre enrolamento MT e núcleo
<i>D_{LVC}</i>	$6,5 \times 10^{-3}$ [m]	Distância entre enrolamento BT e núcleo
<i>D_{panel}</i>	220×10^{-3} [m]	Largura do painel corrugado
<i>Duct_{SHV}</i>	12	Número de ductos enrolamento MT
<i>Duct_{SLV}</i>	10	Número de ductos enrolamento BT
<i>FN_{ducts, LV}</i>	0,318	Fator para 10 ductos de BT
<i>FN_{ducts, HV}</i>	0,320	Fator para 12 ductos de MT
<i>D_w</i>	15×10^{-3} [m]	Largura dos ductos de arrefecimento
<i>DWPG_{HV}</i>	35×10^{-3} [m]	Largura das fitas dos ductos de MT (incluindo intervalo)
<i>DWPG_{LV}</i>	25×10^{-3} [m]	Largura das fitas dos ductos de BT (incluindo intervalo)
<i>HCP</i>	800×10^{-3} [m]	Altura do painel corrugado
<i>I_{HV, HV}</i>	$6,64 \times 10^{-3}$ [m]	Isolamento exterior do enrolamento de MT
<i>I_{HV, LV}</i>	$6,92 \times 10^{-3}$ [m]	Isolamento entre enrolamentos de MT e BT
<i>I_{LV, C}</i>	$1,5 \times 10^{-3}$ [m]	Isolamento entre o enrolamento de BT e o núcleo
<i>K</i>	9×10^{-3} [m]	Distância entre dois núcleos adjacentes
<i>Pitch</i>	44×10^{-3} [m]	Distância entre duas alhetas adjacentes
<i>T_{DS}</i>	3×10^{-3} [m]	Espessura das fitas dos ductos (sem isolamento)
<i>TE</i>	$38,1 \times 10^{-3}$ [m]	Tolerâncias e alongamento dos enrolamentos
<i>TI_{HV}</i>	$1,4 \times 10^{-3}$ [m]	Isolamento da tomada de MT
<i>TLT_{HV}</i>	$14,2 \times 10^{-3}$ [m]	Espessura total dos bornes de MT
<i>TLT_{LV}</i>	$12,48 \times 10^{-3}$ [m]	Espessura total dos bornes de BT
<i>V_{CT}</i>	25×10^{-3} [m ³]	Volume do reservatório de óleo

Na Tabela 2.6 apresentam-se as características dos enrolamentos, essenciais ao cálculo da secção dos condutores de média tensão (MT) e baixa tensão (BT).

Tabela 2.6 – Parâmetros para cálculo de secção dos condutores do transformador

Parâmetro	Valor	Descrição
<i>HVCM</i>	Cobre	Material do condutor de MT
<i>LVCM</i>	Cobre	Material do condutor de BT
<i>Type_{HV}</i>	Fio circular	Tipo de condutor de MT
<i>Type_{LV}</i>	Banda	Tipo de condutor de BT
<i>ΔD_{HV}</i>	$0,111 \times 10^{-3}$ [m]	Espessura do isolamento do condutor de MT

Por fim, na Tabela 2.7, são apresentadas as variáveis de entrada do problema de dimensionamento. Algumas das variáveis de entrada estão sujeitas a restrição. Por exemplo, FD_{max} , está compreendida entre 1,1 T e 1,7 T devido a limitações derivadas da saturação magnética. Também t_{LV} e d_{HV} estão compreendidos entre, entre 0,4 mm e 1 mm e entre 0 mm e 2 mm, respetivamente.

Tabela 2.7 – Variáveis de entrada

Variável	Unidade	Descrição
$turns_{LV}$	-	Número de espiras enrolamento de baixa tensão
D	m	Largura do núcleo
FD_{max}	T	Indução magnética máxima
G	m	Altura da janela do núcleo
t_{LV}	m	Espessura da fita condutora do enrolamento de baixa tensão
d_{HV}	m	Diâmetro do fio condutor do enrolamento de alta tensão

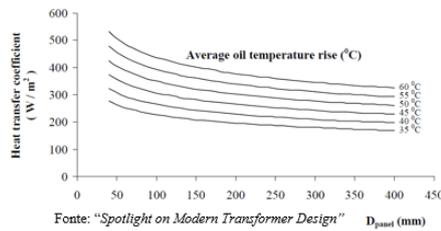
2.2 – Equações de dimensionamento do transformador

Ao longo das secções seguintes são apresentadas as equações que são, como um todo, a função objetivo para encontrar o custo de fabrico do transformador ou o custo total de posse do transformador.

Ao longo deste subcapítulo, por diversas vezes, é referido que a equação é adaptada de uma figura. Ao longo de [5] é frequente a utilização de valores obtidos de diagramas, muitos deles sem referência, por essa razão, nesta dissertação, todos os diagramas foram transformados em equações através de regressões. Para isso utilizou-se o processo representado com um exemplo na Figura 2.2, em que tenta manter-se o R^2 o mais elevado possível. Assim, consegue-se obter um valor exato evitando os erros associados à leitura do gráfico.

Exemplo:

1) Diagrama de transferência de calor em função da distância entre painéis e aumento de temperatura do óleo:



2) Transformar informação do diagrama em dados numéricos através do script *Grabit* para *Matlab*®



3) Transformar dados numéricos numa equação através do *cftool* do *Matlab*®

CPC

$$\begin{aligned}
 &= -5,488 - 0,4832 \times (D_{panel} \times 1000) + 8,496 \times AOR \\
 &+ 0,003297 \times (D_{panel} \times 1000)^2 - 0,02355 \\
 &\times (D_{panel} \times 1000) \times AOR + 0,01829 \times AOR^2 - 5,979 \\
 &\times 10^{-6} \times (D_{panel} \times 1000)^3 + 4,234 \times 10^{-5} \\
 &\times (D_{panel} \times 1000)^2 \times AOR - 2,562 \times 10^{-5} \\
 &\times (D_{panel} \times 1000) \times AOR^2
 \end{aligned}$$

Com R² de 0,990 e um REQM de 6,96 W/m²

Figura 2.2 - Exemplo de transformação de diagrama em função [Equação (2.122)]

2.2.1 – Cálculo da tensão por volta e espessura da perna do núcleo

A equação (2.1) indica o valor da tensão entre fase e neutro do secundário do transformador ($U_{p,LV}$) em que U_{LV} consta da Tabela 2.1.

$$U_{p,LV} = \frac{U_{LV}}{\sqrt{3}} \tag{2.1}$$

Na equação (2.2) é calculado o valor tensão por espira do enrolamento de BT, em que $U_{p,LV}$ tem origem na equação (2.1) e $turns_{LV}$ consta da Tabela 2.7.

$$VPT = \frac{U_{p,LV}}{turns_{LV}} \tag{2.2}$$

Na Figura 2.3 apresenta-se uma meia vista do núcleo do transformador, onde se podem ver as dimensões necessárias ao cálculo do dimensionamento do transformador, utilizadas nas equações subsequentes.

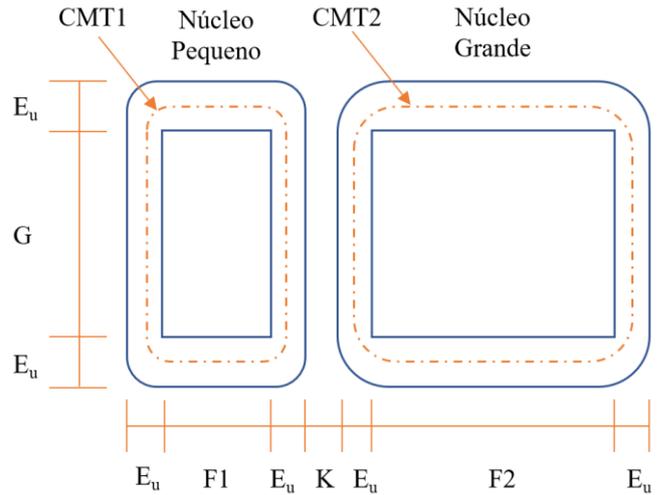


Figura 2.3 - Dimensões do núcleo do transformador (meia vista)

Na equação (2.3) é calculada a espessura da perna do núcleo do transformador, em que VPT resulta da equação (2.2), f consta da Tabela 2.1, FD_{max} e D constam da Tabela 2.7 e CSF consta da Tabela 2.2.

$$E_u = \frac{\sqrt{2} \times VPT}{4\pi \times f \times FD_{max} \times CSF \times D} \quad (2.3)$$

2.2.2 – Espessura do isolamento

As espessuras de isolamento são baseadas em regras empíricas apresentadas em [5]. A equação (2.4) define o valor da espessura de isolamento para o condutor de BT em que t_{LV} consta da Tabela 2.7.

$$I_{LVL} = 0,28 \times 10^{-3} \text{ com } 0,4 \times 10^{-3} < t_{LV} < 1,0 \times 10^{-3} \quad (2.4)$$

Na equação (2.5) define-se o valor de espessura de isolamento para o condutor de MT em que d_{HV} consta da Tabela 2.7.

$$I_{HVL} = 0,28 \times 10^{-3} \text{ com } 0 < d_{HV} < 2,0 \times 10^{-3} \quad (2.5)$$

2.2.3 – Cálculo das dimensões dos enrolamentos e núcleo

Uma vez que não existe tomada de tensão no secundário do transformador, o número de espiras é fixo como definido na equação (2.6), em que $turns_{LV}$ consta da Tabela 2.7.

$$TurnsMain_{LV} = turns_{LV} \quad (2.6)$$

Como o tipo de enrolamento de BT considerado é em banda, o número de camadas é simplesmente o número de espiras do enrolamento, como consta na equação (2.7), em que $TurnsMain_{LV}$ é definido na equação (2.6).

$$Layers_{LV} = TurnsMain_{LV} \quad (2.7)$$

Da equação (2.8) resulta a largura do enrolamento de BT, em que G consta da Tabela 2.7, $CCEE$ e D_{LVC} constam na Tabela 2.5.

$$TD_{LV} = G - 2 \times (CCEE + D_{LVC}) \quad (2.8)$$

A espessura do enrolamento de BT é dada pela equação (2.9), em que t_{LV} consta da Tabela 2.7, I_{LVL} resulta da equação (2.4), $Layers_{LV}$ resulta da equação (2.7) e $LDSP_{LV}$ consta da Tabela 2.2.

$$BLD_{LV} = (t_{LV} + I_{LVL}) \times \frac{Layers_{LV}}{LDSP_{LV}} \quad (2.9)$$

Assim, a espessura total do enrolamento de BT é dada pela equação (2.10), em que BLD_{LV} resulta da equação (2.9) e $I_{LV,C}$ e $I_{HV,HV}$ constam da Tabela 2.5.

$$SPLD_{LV} = BLD_{LV} + I_{LV,C} + I_{HV,HV} \quad (2.10)$$

Para o cálculo do enrolamento de MT, começa-se por calcular o valor da tensão consoante o tipo de ligação no primário. Caso o tipo de ligação seja em triângulo ($HVCC$, Tabela 2.1), o valor de tensão é dado pela equação (2.11), em que U_{HV1} e U_{HV2} constam da Tabela 2.1.

$$se \ HVCC = Triangulo \Rightarrow \begin{cases} U_{p,HV1} = U_{HV1} \\ U_{p,HV2} = U_{HV2} \end{cases} \quad (2.11)$$

Caso o tipo de ligação seja em estrela ($HVCC$, Tabela 2.1) o valor de tensão é dado pela equação (2.12) em que U_{HV1} e U_{HV2} constam da Tabela 2.1.

$$se \ HVCC = Estrela \Rightarrow \begin{cases} U_{p,HV1} = \frac{U_{HV1}}{\sqrt{3}} \\ U_{p,HV2} = \frac{U_{HV2}}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (2.12)$$

Calculado o valor de tensão na MT, calcula-se o valor máximo da tensão para a tomada de tensão regulada no máximo, de acordo com a equação (2.13), em que $U_{p,HV1}$ é dado pela equação (2.11) ou (2.12) e $Taps_{HVmax}$ consta da Tabela 2.3.

$$U_{p,HV,maxtap} = U_{p,HV1} \times \left(1 + \frac{Taps_{HVmax}}{100} \right) \quad (2.13)$$

Com o valor de $U_{p,HV,maxtap}$ da equação (2.13) e o valor de VPT da equação (2.2) calcula-se o número máximo de espiras do enrolamento de MT segundo a equação (2.14).

$$turns_{HV,max} = \frac{U_{p,HV,maxtap}}{VPT} \quad (2.14)$$

Assim é possível calcular o número de espiras do enrolamento principal de acordo com a equação (2.15) em que $turns_{HV,max}$ é dado pela equação (2.14), $U_{p,HV1}$ é dado pela equação (2.11) ou (2.12) e $U_{p,HV,maxtap}$ é dado pela equação (2.13).

$$TurnsMain_{HV} = turns_{HV,max} \times \frac{U_{p,HV1}}{U_{p,HV,maxtap}} \quad (2.15)$$

Na equação (2.16) calcula-se a largura do enrolamento de MT, em que G consta da Tabela 2.7 e, $CCEE$ e D_{HVC} constam da Tabela 2.5.

$$TD_{HV} = G - 2 \times (CCEE + D_{HVC}) \quad (2.16)$$

Na equação (2.17) calcula-se a largura de cada espira do enrolamento de MT, em que d_{HV} consta da Tabela 2.7 e ΔD_{HV} consta da Tabela 2.6.

$$TurnWidth_{HV} = d_{HV} + \Delta D_{HV} \quad (2.17)$$

Com os valores de TD_{HV} da equação (2.16), $TurnWidth_{HV}$ da equação (2.17) e $TDSP_{HV}$ da Tabela 2.2 pode calcular-se o valor de espiras por camada do enrolamento de MT segundo a equação (2.18).

$$TurnsPerLayer_{HV} = \left(\frac{TD_{HV}}{TurnWidth_{HV}} - 1 \right) \times TDSP_{HV} \quad (2.18)$$

Assim, obtém-se o valor de espiras por camada para o enrolamento secundário (6,6 kV) de MT através da equação (2.19) em que $floor$ é a função arredondamento para baixo e $TurnsPerLayer_{HV}$ é dado pela equação (2.18).

$$TurnsPerLayer_{HV,subcoil} = floor \left(\frac{TurnsPerLayer_{HV}}{3} \right) \quad (2.19)$$

E, pela equação (2.20), obtém-se o número de espiras por camada para o enrolamento principal (20 kV) de MT, em que $TurnsPerLayer_{HV,subcoil}$ é dado pela equação (2.19).

$$TurnsPerLayer_{HV} = 3 \times TurnsPerLayer_{HV,subcoil} \quad (2.20)$$

O número de camadas do enrolamento de MT pode então ser calculado pela equação (2.21) em que, $round$ é a função arredondamento para o inteiro mais próximo, $turns_{HV,max}$ é dado pela equação (2.14) e $TurnsPerLayer_{HV}$ é dado pela equação (2.20).

$$Layers_{HV} = round\left(\frac{turns_{HV,max}}{TurnsPerLayer_{HV}}\right) \quad (2.21)$$

Assim, é possível calcular-se a espessura do enrolamento de MT através da equação (2.22) em que $TurnWidth_{HV}$ é dado pela equação (2.17), I_{HVL} é dado pela equação (2.5), $Layers_{HV}$ é dado pela equação (2.21), $LDSP_{HV}$ consta da Tabela 2.2 e TI_{HV} consta da Tabela 2.5.

$$BLD_{HV} = (TurnWidth_{HV} + I_{HVL}) \times \frac{Layers_{HV}}{LDSP_{HV}} + TI_{HV} \quad (2.22)$$

A espessura total do enrolamento de MT é então dada pela equação (2.23) em que BLD_{HV} é dado pela equação (2.22) e $I_{HV,HV}$ consta da Tabela 2.5.

$$SPLD_{HV} = BLD_{HV} + I_{HV,HV} \quad (2.23)$$

Com a espessura total de ambos os enrolamentos, BT e MT, pode calcular-se a largura da janela pequena do núcleo de acordo com a equação (2.24), em que $SPLD_{LV}$ é dado pela equação (2.10) e $SPLD_{HV}$ é dado pela equação (2.23).

$$F1 = SPLD_{LV} + SPLD_{HV} \quad (2.24)$$

Da mesma forma, pode calcular-se a largura da janela grande do núcleo de acordo com a equação (2.25) em que $F2$ é calculado através da equação (2.24).

$$F2 = 2 \times F1 \quad (2.25)$$

De seguida verificam-se os isolamentos. Começando pela tensão induzida no enrolamento de BT, dada pela equação (2.26).

$$Induced_{LV} = 4 \times VPT \quad (2.26)$$

Na equação (2.27) pode calcular-se a tensão de impulso de BT em que BIL_{LV} consta na Tabela 2.2 e $turns_{LV}$ consta da Tabela 2.7.

$$Impulse_{LV} = \frac{2 \times BIL_{LV}}{turns_{LV}} \quad (2.27)$$

Na equação (2.28) pode calcular-se a tensão induzida de MT em que VPT é dado pela equação (2.2) e $TurnsPerLayer_{HV}$ é dado pela equação (2.20).

$$Induced_{HV} = 4 \times VPT \times TurnsPerLayer_{HV} \quad (2.28)$$

Para o cálculo da tensão de impulso de MT é necessário saber a tensão de MT com a tomada de tensão na posição mínima, valor dado pela equação (2.29) em que $U_{p,HV1}$ é dado pela equação (2.11) ou (2.12) e $Taps_{HVmin}$ consta da Tabela 2.3.

$$U_{p,HV,mintap} = U_{p,HV1} \times \left(1 - \frac{|Taps_{HVmin}|}{100}\right) \quad (2.29)$$

Assim, pode calcular-se a tensão de impulso de MT de acordo com a equação (2.30) em que BIL_{HV} consta da Tabela 2.2, $TurnsPerLayer_{HV}$ é dado pela equação (2.20), $TurnsMain_{HV}$ é dado pela equação (2.15), $U_{p,HV,mintap}$ é dado pela equação (2.29) e $U_{p,HV1}$ é dado pela equação (2.11) ou (2.12).

$$Impulse_{HV} = \frac{2 \times BIL_{HV} \times TurnsPerLayer_{HV}}{TurnsMain_{HV} \times \frac{U_{p,HV,mintap}}{U_{p,HV1}}} \quad (2.30)$$

2.2.4 – Cálculo da massa do núcleo e perdas em vazio

Os cálculos da massa do núcleo e das perdas em vazio foram baseados em [7], em que é estimada a linha média de cada tipo de janela do núcleo, é calculada a massa de cada janela, a massa total do núcleo e, por fim, as perdas em vazio. Na equação (2.31) calcula-se a linha média da janela mais pequena, em que $F1$ é calculado na equação (2.24), G consta da Tabela 2.7 e E_u é calculado na equação (2.3).

$$CMT1 = 2 \times (F1 + G) + 2 \times \pi \times \left(\frac{E_u}{2} + 3,5 \times 10^{-3}\right) - 8 \times 3,5 \times 10^{-3} \quad (2.31)$$

Na equação (2.32) calcula-se a massa da janela pequena do núcleo, em que $CMT1$ é dado pela equação (2.31), D consta da Tabela 2.7, E_u é calculado na equação (2.3) e CSF e g_{MM} constam da Tabela 2.2.

$$SCW = CMT1 \times D \times E_u \times CSF \times g_{MM} \quad (2.32)$$

Na equação (2.33) calcula-se a linha média da janela maior, em que $F2$ é calculado na equação (2.25), G consta da Tabela 2.7 e E_u é calculado na equação (2.3).

$$CMT2 = 2 \times (F2 + G) + 2 \times \pi \times \left(\frac{E_u}{2} + 3,5 \times 10^{-3} \right) - 8 \times 3,5 \times 10^{-3} \quad (2.33)$$

Na equação (2.34) calcula-se a massa da janela grande do núcleo, em que $CMT2$ é dado pela equação (2.33), D consta da Tabela 2.7, E_u é calculado na equação (2.3) e CSF e g_{MM} constam da Tabela 2.2.

$$LCW = CMT2 \times D \times E_u \times CSF \times g_{MM} \quad (2.34)$$

Assim, com a massa da janela pequena, SCW , e da janela grande, LCW , é possível calcular-se a massa do núcleo de acordo com a equação (2.35).

$$w_3 = 2 \times (SCW + LCW) \quad (2.35)$$

Em [7], o valor das perdas em vazio específica é obtido a partir de um gráfico. Para agilizar o processo de cálculo, transformou-se esse gráfico na função apresentada na equação (2.36), em que FD_{max} consta da Tabela 2.7. A função apresentada tem um R^2 de 0,9997 e uma raiz do erro quadrático médio (REQM) de 0,01063 W/kg.

$$SNLL_{TF} = 0,08829 \times \exp(1,7 \times FD_{max}) + 5,906 \times 10^{-10} \times \exp(11,24 \times FD_{max}) \quad (2.36)$$

Por fim, com os valores de massa do núcleo (w_3) e de perdas em vazio específicas ($SNLL_{TF}$), calculam-se as perdas em vazio de acordo com a equação (2.37).

$$NLL = w_3 \times SNLL_{TF} \quad (2.37)$$

2.2.5 – Cálculo da parte indutiva da tensão de curto-circuito

O comprimento médio do enrolamento de BT é dado pela equação (2.38), em que D consta da Tabela 2.7 e $CCEE$ consta da Tabela 2.5.

$$ML = D \times 2 \times CCEE \quad (2.38)$$

A largura média do enrolamento de BT é dada pela equação (2.39), em que E_u é dado pela equação (2.3) e K consta da Tabela 2.5.

$$MW = 2 \times E_u \times K \quad (2.39)$$

Com os valores de ML , equação (2.38), e MW , equação (2.39), pode calcular-se o diâmetro equivalente do enrolamento de BT pela equação (2.40).

$$DMC = \frac{2 \times (ML + MW) - 10,992 \times 10^{-3}}{\pi} \quad (2.40)$$

Na equação (2.41) calcula-se o diâmetro equivalente incluindo o papel de isolamento, em que DMC resulta da equação (2.40) e $I_{LV,C}$ consta na Tabela 2.5.

$$D3 = DMC + 2 \times I_{LV,C} \quad (2.41)$$

Com o valor do diâmetro equivalente $D3$ da equação (2.41) pode calcular-se a área equivalente respetiva pela equação (2.42).

$$A3 = \frac{\pi \times D3^2}{4} \quad (2.42)$$

Na equação (2.43) calcula-se o diâmetro equivalente do enrolamento de BT excluindo os ductos de refrigeração, em que BLD_{LV} resulta da equação (2.9).

$$D5 = D3 \times 2 \times BLD_{LV} \quad (2.43)$$

Com o valor do diâmetro equivalente $D5$ da equação (2.43) pode calcular-se a área equivalente respetiva pela equação (2.44)

$$A5 = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (2.44)$$

Na equação (2.45) é definida dimensão dos ductos de refrigeração de BT em que MW é dado pela equação (2.39).

$$LG_{LV} = MW \quad (2.45)$$

Assim, pode calcular-se a área dos ductos de refrigeração pela equação (2.46), em que $Duct_{LV}$ consta da Tabela 2.5 e LG_{LV} resulta da equação (2.45).

$$A6 = Duct_{LV} \times 3,33 \times 10^{-3} \times LG_{LV} \times 2 \quad (2.46)$$

Com a área equivalente $A5$ da equação (2.44), e com a área $A6$ da equação (2.46) tem-se a área do enrolamento de BT com os ductos dada pela equação (2.47).

$$A7 = A5 + A6 \quad (2.47)$$

Tendo a área $A7$ dada pela equação (2.47) pode calcular-se o diâmetro equivalente do enrolamento BT com ductos pela equação (2.48).

$$D7 = \frac{\sqrt{4 \times A7}}{\pi} \quad (2.48)$$

Na equação (2.49) calcula-se o diâmetro equivalente considerando também o isolamento entre o enrolamento de BT e MT, em que $D7$ resulta da (2.48) e $I_{HV,LV}$ consta da Tabela 2.5.

$$D9 = D7 \times 2 \times I_{HV,LV} \quad (2.49)$$

Com o valor de $D9$ da equação (2.49) é então possível calcular a respetiva área equivalente pela equação (2.50).

$$A9 = \frac{\pi \times D9^2}{4} \quad (2.50)$$

Na equação (2.51) calcula-se o diâmetro equivalente considerando a espessura do enrolamento de MT em que BLD_{HV} resulta da equação (2.22).

$$D11 = D9 + 2 \times BLD_{HV} \quad (2.51)$$

Assim, com o valor de $D11$ da equação (2.51) é possível calcular a respetiva área equivalente pela equação (2.52).

$$A11 = \frac{\pi \times D11^2}{4} \quad (2.52)$$

Com a equação (2.53) pode calcular-se a dimensão dos ductos de refrigeração de MT, em que LG_{LV} é dado pela equação (2.45), BLD_{LV} resulta da equação (2.9) e $I_{HV,LV}$ consta na Tabela 2.5.

$$LG_{HV} = LG_{LV} + 2 \times BLD_{LV} + 2 \times I_{HV,LV} \quad (2.53)$$

A área dos ductos de refrigeração de MT pode calcular-se pela equação (2.54), em que $Ducts_{HV}$ consta da Tabela 2.5 e LG_{HV} resulta da equação (2.53).

$$A12 = Ducts_{HV} \times 3,33 \times 10^{-3} \times LG_{HV} \times 2 \quad (2.54)$$

Na equação (2.55) calcula-se a área equivalente adicionando os ductos de refrigeração de MT, em que $A11$ resulta da equação (2.52) e $A12$ da equação (2.54).

$$A13 = A11 + A12 \quad (2.55)$$

Assim, pode calcular-se o diâmetro equivalente para a área $A13$ através da equação (2.56).

$$D13 = \frac{\sqrt{4 \times A13}}{\pi} \quad (2.56)$$

Seguindo o protocolo apresentado em [5] para o cálculo das indutâncias dos enrolamentos, calcula-se na equação (2.57) o fator k_L em que $A3$, $A7$, $A9$ e TD_{LV} resultam, respetivamente, das equações (2.42), (2.47), (2.50) e (2.8).

$$k_L = \frac{-2 \times \sqrt{A3} + \sqrt{A7} + \sqrt{A9}}{3,54 \times TD_{LV}} \quad (2.57)$$

Com o fator k_L obtido na equação (2.57) pode calcular-se a indutância $L17$ através da equação (2.58) em que TD_{LV} é obtido pela equação (2.8).

$$L17 = (k_L^2 + k_L + 1) \times TD_{LV} \quad (2.58)$$

Na equação (2.59) é calculado o fator k_P em que $A13$, $A7$, $A9$ e TD_{HV} resultam, respetivamente, da equação (2.55), (2.47), (2.50) e (2.16).

$$k_P = \frac{2 \times \sqrt{A13} - \sqrt{A7} - \sqrt{A9}}{3,54 \times TD_{HV}} \quad (2.59)$$

Com o fator k_P obtido na equação (2.59) pode calcular-se a indutância $L21$ através da equação (2.60) em que TD_{HV} é obtido pela equação (2.16).

$$L21 = (k_P^2 + k_P + 1) \times TD_{HV} \quad (2.60)$$

Na equação (2.61) é calculada a indutância $LH23$ em que $L17$ é calculado na equação (2.58) e $L21$ é calculado na equação (2.60).

$$LH23 = L17 + L21 \quad (2.61)$$

Na equação (2.62) calcula-se a indutância $L25$ em que $A5$, $A3$ e $L17$ resultam, respetivamente, da equação (2.44), (2.42) e (2.58), e μ_0 consta da Tabela 2.3.

$$L25 = \frac{(A5 - A3) \times 0,396 \times \mu_0}{L17} \quad (2.62)$$

Na equação (2.63) calcula-se a indutância $L26$ em que $A11$, $A9$ e $L21$ resultam, respetivamente, da equação (2.52), (2.50) e (2.60), e μ_0 consta da Tabela 2.3.

$$L26 = \frac{(A11 - A9) \times 0,396 \times \mu_0}{L21} \quad (2.63)$$

Na equação (2.64) calcula-se a indutância $L27$ em que $A9$, $A7$ e $LH23$ resultam, respetivamente, da equação (2.50), (2.47) e (2.61), e μ_0 consta da Tabela 2.3.

$$L27 = \frac{(A9 - A7) \times 2 \times \mu_0}{LH23} \quad (2.64)$$

Na equação (2.65) calcula-se a indutância $L28$ em que $A6$ e $L17$ resultam, respetivamente, da equação (2.46) e (2.58), e $FN_{ducts,LV}$ e μ_0 constam, respetivamente, da Tabela 2.5 e Tabela 2.3.

$$L28 = \frac{A6 \times FN_{ducts,LV} \times \mu_0}{L17} \quad (2.65)$$

Na equação (2.66) calcula-se a indutância $L29$ em que $A12$ e $L21$ resultam, respetivamente, da equação (2.54) e (2.60), e $FN_{ducts,HV}$ e μ_0 constam da Tabela 2.5 e Tabela 2.3.

$$L29 = \frac{A12 \times FN_{ducts,HV} \times \mu_0}{L21} \quad (2.66)$$

Assim, com todas as componentes da indutância pode calcular-se a indutância total através da equação (2.67) em que $L25$, $L26$, $L27$, $L28$ e $L29$ resultam, respetivamente, das equações (2.62), (2.63), (2.64), (2.65) e (2.66).

$$L_{tot} = L25 + L26 + L27 + L28 + L29 \quad (2.67)$$

Com o valor de indutância total pode calcular-se a corrente por fase de BT através da equação (2.68) em que S_n consta da Tabela 2.1 e $U_{p,LV}$ resulta da equação (2.1). Válida para o tipo de ligação em estrela, LVCC, apresentado na Tabela 2.1.

$$I_{p,LV} = \frac{S_n}{3 \times U_{p,LV}} \quad (2.68)$$

Assim, obtém-se a parte indutiva da tensão de curto-circuito através da equação (2.69) em que $I_{p,LV}$ obtém-se da equação (2.68), f consta da Tabela 2.1, $turns_{LV}$ consta da Tabela 2.7, L_{tot} obtém-se pela equação (2.67) e $U_{p,LV}$ obtém-se através da equação (2.1).

$$IX = \frac{I_{p,LV} \times 2 \times \pi \times f \times turns_{LV} \times L_{tot}}{U_{p,LV}} \quad (2.69)$$

2.2.6 – Cálculo das perdas em carga

O cálculo das perdas em carga implica o cálculo das resistências dos enrolamentos. Na equação (2.70) calcula-se o perímetro médio do enrolamento de BT em que $D3$ e $D7$ resultam, respetivamente, das equações (2.41) e (2.48).

$$MT_{LV} = \frac{D3 + D7}{2} \times \pi \quad (2.70)$$

Assim, pode calcular-se o comprimento total dos enrolamentos de BT através da equação (2.71), em que MT_{LV} é dado pela equação (2.70) e $Layers_{LV}$ é dado pela equação (2.7).

$$CL_{LV} = MT_{LV} \times Layers_{LV} \times 3 \quad (2.71)$$

A área da secção do enrolamento de BT é dada pela equação (2.72) em que TD_{LV} é dado pela equação (2.8) e t_{LV} consta da Tabela 2.7.

$$area_{LV} = TD_{LV} \times t_{LV} \quad (2.72)$$

Assim, pode calcular-se a resistência do enrolamento de BT de acordo com a equação (2.73), em que ρ_{LV} consta da Tabela 2.2, CL_{LV} resulta da equação (2.71) e $area_{LV}$ resulta da equação (2.72).

$$R_{LV} = \frac{\rho_{LV} \times \frac{CL_{LV}}{3}}{area_{LV}} \quad (2.73)$$

As perdas em carga do enrolamento de BT são então dadas pela equação (2.74) em que R_{LV} resulta da equação (2.73) e $I_{p,LV}$ resulta da equação (2.68).

$$LL_{LV} = 3 \times R_{LV} \times I_{p,LV}^2 \times 1,04 \quad (2.74)$$

O perímetro médio do enrolamento de MT é dado pela equação (2.75) em que $D9$ é dado pela equação (2.49) e $D13$ é dado pela equação (2.56).

$$MT_{HV} = \frac{D9 + D13}{2} \times \pi \quad (2.75)$$

O comprimento do enrolamento de MT principal é dado pela equação (2.76) em que MT_{HV} é dado pela equação (2.75) e $TurnsMain_{HV}$ é dado pela equação (2.15).

$$CL_{HV,1} = MT_{HV} \times TurnsMain_{HV} \times 3 \quad (2.76)$$

A área do condutor do enrolamento de MT é dada pela equação (2.77) em que d_{HV} consta da Tabela 2.7.

$$area_{HV} = \frac{\pi \times d_{HV}^2}{4} \quad (2.77)$$

A corrente por fase do enrolamento principal de MT é dada pela equação (2.78) em que S_n consta da Tabela 2.1 e $U_{p,HV1}$ resulta da equação (2.11).

$$I_{p,HV,1} = \frac{S_n}{3 \times U_{p,HV1}} \quad (2.78)$$

A resistência do enrolamento principal de MT é dada pela equação (2.79) em que ρ_{HV} consta da Tabela 2.2, $CL_{HV,1}$ resulta da equação (2.79) e $area_{HV}$ resulta da equação (2.77).

$$R_{HV,1} = \frac{\rho_{HV} \times \frac{CL_{HV,1}}{3}}{area_{HV}} \quad (2.79)$$

Assim, podem calcular-se as perdas em carga para os enrolamentos principais de MT de acordo com a equação (2.80) em que $R_{HV,1}$ é dado pela equação (2.79) e $I_{p,HV,1}$ é dado pela equação (2.78).

$$LL_{HV,1} = 3 \times R_{HV,1} \times I_{p,HV,1}^2 \times 1,06 \quad (2.80)$$

Tendo as perdas em carga de ambos os enrolamentos, podem calcular-se as perdas em carga para o nível de tensão principal (20 kV), através da equação (2.81) em que LL_{LV} é dado pela equação (2.74), $LL_{HV,1}$ é dado pela equação (2.80), EdL_{LV} e EdL_{HV} constam da Tabela 2.3.

$$LL_1 = LL_{LV} + LL_{HV,1} + EdL_{LV} + EdL_{HV} \quad (2.81)$$

A tensão mínima presente no enrolamento de MT é dada pela equação (2.82) em que $U_{p,HV,2}$ resulta da equação (2.11) e $Tap_{SHV,min}$ consta da Tabela 2.3.

$$HV_{p,min} = U_{p,HV,2} \times \left(1 - \frac{|Tap_{SHV,min}|}{100} \right) \quad (2.82)$$

O número de espiras mínimo para o nível de tensão mínima de MT é dado pela equação (2.83) em que, $round$ é a função arredondamento para o inteiro mais próximo, $TurnsMain_{HV}$ é dado pela equação (2.15), $HV_{p,min}$ é dado pela equação (2.82) e $U_{p,HV1}$ é dado pela equação (2.11) ou (2.12).

$$Turns_{HV,min} = round \left(TurnsMain_{HV} \times \frac{HV_{p,min}}{U_{p,HV1}} \right) \quad (2.83)$$

O comprimento do enrolamento de MT para a tensão mínima é dado pela equação (2.84) em que MT_{HV} é dado pela equação (2.75) e $Turns_{HV,min}$ é dado pela equação (2.83).

$$CL_{HV,2} = MT_{HV} \times Turns_{HV,min} \times 3 \quad (2.84)$$

A corrente por fase para a tensão mínima é dada pela equação (2.85) em que S_n consta da Tabela 2.1 e $HV_{p,min}$ é dado pela equação (2.82).

$$I_{p,HV,2} = \frac{S_n}{3 \times HV_{p,min}} \quad (2.85)$$

A corrente para a tensão mínima em cada enrolamento parcial é dada pela equação (2.86) em que $I_{p,HV,2}$ é dado pela equação (2.85).

$$I_{p,HV,2,subcoil} = \frac{I_{p,HV,2}}{3} \quad (2.86)$$

A resistência do enrolamento de MT para a tensão mínima é dada pela equação (2.87) em que ρ_{HV} consta da Tabela 2.2, $CL_{HV,2}$ é dado pela equação (2.84) e $area_{HV}$ é dado pela equação (2.77).

$$R_{HV,2} = \frac{\rho_{HV} \times \frac{CL_{HV,2}}{3}}{area_{HV}} \quad (2.87)$$

As perdas em carga para a tensão de MT mínima do enrolamento parcial são dadas pela equação (2.88) em que $R_{HV,2}$ é dado pela equação (2.87) e $I_{p,HV,2,subcoil}$ é dado pela equação (2.86).

$$LL_{HV,2,subcoil} = 3 \times R_{HV,2} \times I_{p,HV,2,subcoil}^2 \times 1,06 \quad (2.88)$$

As perdas em carga para a tensão de MT mínima são dadas pela equação (2.89) em que $LL_{HV,2,subcoil}$ é dado pela equação (2.88).

$$LL_{HV,2} = 3 \times LL_{HV,2,subcoil} \quad (2.89)$$

As perdas em carga para a tensão mínima podem então calcular-se através da equação (2.90) em que LL_{LV} é dado pela equação (2.74), $LL_{HV,2}$ é dado pela equação (2.89) e, Ed_{LV} e Ed_{HV} constam da Tabela 2.3.

$$LL_2 = LL_{LV} + LL_{HV,2} + Ed_{LV} + Ed_{HV} \quad (2.90)$$

A massa do enrolamento de BT pode calcular-se através da equação (2.91) em que CL_{LV} é dado pela equação (2.71), $area_{LV}$ é dado pela equação (2.72) e g_{LV} consta da Tabela 2.2.

$$w_1 = CL_{LV} \times area_{LV} \times g_{LV} \times 1,05 \quad (2.91)$$

A massa do enrolamento de MT pode calcular-se através da equação (2.92) em que $CL_{HV,1}$ é dado pela equação (2.76), $Taps_{HV,max}$ consta da Tabela 2.3, $area_{HV}$ é dado pela equação (2.77) e g_{HV} consta da Tabela 2.2.

$$w_2 = CL_{HV,1} \times \frac{1 + Taps_{HV,max}}{100} \times area_{HV} \times g_{HV} \times 1,08 \quad (2.92)$$

2.2.7 – Tensão de curto-circuito

Para o cálculo da tensão de curto-circuito são necessárias duas componentes, a indutiva e a resistiva. A parte indutiva da tensão de curto-circuito foi calculada na equação (2.69). A parte resistiva é dada pela equação (2.93), em que LL_1 é dado pela equação (2.81) e S_n consta da Tabela 2.1.

$$IR = \frac{LL_1}{S_n} \quad (2.93)$$

Assim, pode calcular-se a tensão de curto-circuito através da equação (2.94) em que IR é dado pela equação (2.93) e IX é dado pela equação (2.69).

$$U_k = \sqrt{(IR)^2 + (IX)^2} \quad (2.94)$$

2.2.8 – Comprimento da bobine

A espessura total dos ductos de arrefecimento é dada pela equação (2.95) em que $Ducts_{LV}$ e $Ducts_{HV}$ constam da Tabela 2.5.

$$TCD = 2 \times (Ducts_{LV} + Ducts_{HV}) \times 3,33 \times 10^{-3} \quad (2.95)$$

O isolamento de papel do enrolamento de BT é dado pela equação (2.96) em que I_{LVL} é dado pela equação (2.4).

$$OLI_{LV} = 1,5 \times 10^{-3} + I_{LVL} \quad (2.96)$$

O isolamento de papel do enrolamento de MT é dado pela equação (2.97) em que $Layers_{HV}$ é dado pela equação (2.21) e I_{HVL} é dado pela equação (2.5).

$$OLI_{HV} = Layers_{HV} + I_{HVL} \quad (2.97)$$

Assim, o comprimento total da bobine é dado pela equação (2.98) em que ML é dado pela equação (2.38), $F1$ é dado pela equação (2.24), TCD é dado pela equação (2.95), TLT_{LV} , TLT_{HV} e TE constam da Tabela 2.5, OLI_{LV} é dado pela equação (2.96) e OLI_{HV} é dado pela equação (2.97).

$$TLC = ML + 2 \times F1 + TCD + TLT_{LV} + TLT_{HV} + OLI_{LV} + OLI_{HV} + TE \quad (2.98)$$

2.2.9 – Cálculo do tamanho da cuba

O comprimento da cuba é dado pela equação (2.99) em que E_u é dado pela equação (2.3), $F1$ é dado pela equação (2.24) e K consta da Tabela 2.5.

$$TL = 2 \times (4 \times E_u + 3 \times F1 + K) + K + 108 \times 10^{-3} \quad (2.99)$$

A largura da cuba é dada pela equação (2.100) em que TLC é dado pela equação (2.98).

$$TW = TLC + 38 \times 10^{-3} \quad (2.100)$$

A altura mínima da cuba do transformador é dada pela equação (2.101) em que G consta da Tabela 2.7 e E_u é dado pela equação (2.3).

$$TH_{min} = G + 2 \times E_u + 350 \times 10^{-3} \quad (2.101)$$

A altura do óleo mineral dentro da cuba é dada pela equação (2.102) em que TH consta da Tabela 2.3.

$$OH = TH \quad (2.102)$$

2.2.10 – Cálculo do gradiente de temperatura no enrolamento e no óleo

A área dos ductos de refrigeração é dada pela equação (2.103) em que $Ducts_{LV}$ consta da Tabela 2.5, MW é dado pela equação (2.39) e TD_{LV} é dado pela equação (2.8).

$$DuctArea_{LV} = Ducts_{LV} \times 2 \times 2 \times MW \times TD_{LV} \quad (2.103)$$

A área da distância entre ductos de refrigeração é dada pela equação (2.104) em que $D7$ é dado pela equação (2.48) e TD_{LV} é dado pela equação (2.8).

$$GapDuctArea_{LV} = D7 \times \pi \times TD_{LV} \quad (2.104)$$

A área total dos ductos é então dada pela equação (2.105) em que $DuctArea_{LV}$ é dado pela equação (2.103) e $GapDuctArea_{LV}$ é dado pela equação (2.104).

$$TotalDuctArea_{LV} = DuctArea_{LV} + GapDuctArea_{LV} \quad (2.105)$$

As perdas em cada enrolamento de BT são dadas pela equação (2.106) em que LL_{LV} é dado pela equação (2.74) e Ed_{LV} consta da Tabela 2.3.

$$CoilLoss_{LV} = \frac{LL_{LV} + Ed_{LV}}{3} \quad (2.106)$$

Assim, as perdas do enrolamento de BT por unidade de área são dadas pela equação (2.107) em que $CoilLoss_{LV}$ é dado pela equação (2.106) e $TotalDuctsArea_{LV}$ é dado pela equação (2.105).

$$LPS_{LV} = \frac{CoilLoss_{LV}}{TotalDuctsArea_{LV}} \quad (2.107)$$

O aumento médio de temperatura do cobre é dado pela equação (2.108) em que tw_{max} e ta_{max} constam da Tabela 2.2.

$$ACR = tw_{max} - ta_{max} \quad (2.108)$$

O gradiente de temperatura para o enrolamento de BT é dado pela equação (2.109) para um valor de ACR , dado pela equação (2.108), de 60°C , e em que LPS_{LV} é dado pela equação (2.107). A equação (2.109) é adaptada de uma figura de [5].

$$Gra_{LV}(ACR = 60^{\circ}\text{C}) = 0,0069 \times LPS_{LV} + 0,5474 \quad (2.109)$$

Assim, o gradiente médio de temperatura entre o óleo e o enrolamento de BT é dado pela equação (2.110) em que Gra_{LV} é dado pela equação (2.109).

$$AvGra_{LV} = 2,09 \times Gra_{LV} \quad (2.110)$$

A área dos ductos de arrefecimento de MT é dada pela equação (2.111) em que $Ducts_{HV}$ consta da Tabela 2.5, LG_{HV} é dado pela equação (2.53) e TD_{HV} é dado pela equação (2.16).

$$DuctArea_{HV} = Ducts_{HV} \times 2 \times 2 \times LG_{HV} \times TD_{HV} \quad (2.111)$$

O distanciamento entre ductos de refrigeração de MT é dado pela equação (2.112) em que $D7$ é dado pela equação (2.48) e TD_{HV} é dado pela equação (2.16).

$$GapDuctArea_{HV} = D7 \times \pi \times TD_{HV} \quad (2.112)$$

Assim, a área total dos ductos de refrigeração de MT é dada pela equação (2.113) em que $DuctsArea_{HV}$ é dado pela equação (2.111) e $GapDuctArea_{HV}$ é dado pela equação (2.112).

$$TotalDuctsArea_{HV} = DuctsArea_{HV} + GapDuctArea_{HV} \quad (2.113)$$

As perdas em cada enrolamento de MT são dadas pela equação (2.114) em que $LL_{HV,2}$ é dado pela equação (2.89) e EdL_{HV} consta da Tabela 2.3.

$$CoilLoss_{HV} = \frac{LL_{HV,2} + EdL_{HV}}{3} \quad (2.114)$$

Assim, as perdas por unidade de área para o enrolamento de MT são dadas pela equação (2.115) em que $CoilLoss_{HV}$ é dado pela equação (2.114) e $TotalDuctArea_{HV}$ é dado pela equação (2.113).

$$LPS_{HV} = \frac{CoilLoss_{HV}}{TotalDuctArea_{HV}} \quad (2.115)$$

O gradiente de temperatura para o enrolamento de MT é dado pela equação (2.116) para um valor de ACR , dado pela equação (2.108), de 60°C e em que LPS_{HV} é dado pela equação (2.115). A equação (2.116) é, tal como a equação (2.109) adaptada duma figura de [5].

$$Gra_{HV}(ACR = 60^{\circ}\text{C}) = 0,0069 \times LPS_{HV} + 0,5474 \quad (2.116)$$

O gradiente de temperatura médio entre o óleo e o enrolamento de MT é dado pela equação (2.117) em que Gra_{HV} é dado pela equação (2.116).

$$AvGra_{HV} = 2,09 \times Gra_{HV} \quad (2.117)$$

O gradiente máximo é dado pela equação (2.118), em que é escolhido o valor máximo entre $AvGra_{LV}$, dado pela equação (2.110) e $AvGra_{HV}$, dado pela equação (2.117).

$$MaxGra = \max(AvGra_{LV}, AvGra_{HV}) \quad (2.118)$$

Assim, o aumento médio da temperatura do óleo é dado pela equação (2.119) em que ACR é dado pela equação (2.108) e $MaxGra$ é dado pela equação (2.118).

$$AOR = ACR - MaxGra \quad (2.119)$$

2.2.11 – Cálculo da transferência de calor

O coeficiente de convecção da cuba do transformador é dado pela equação (2.120) em função do aumento de temperatura do óleo, AOR , dado pela equação (2.119). A equação (2.120) é adaptada de uma figura de [5] com um R^2 de 0,998 e um REQM de 2,35 W/m².

$$TCC = 6,254 \times AOR - 51,57 \quad (2.120)$$

O coeficiente de radiação da cuba do transformador é dado pela equação (2.121) em função do aumento de temperatura do óleo, AOR , dado pela equação (2.119). A equação (2.121) é adaptada de uma figura de [5] com um R^2 de 0,999 e um REQM de 2,78 W/m².

$$TRC = 9,343 \times AOR - 69,29 \quad (2.121)$$

O coeficiente de transferência de calor dos painéis corrugados é dado pela equação (2.122) em função do aumento de temperatura do óleo, AOR , dado pela equação (2.119), e da largura dos painéis corrugados, D_{Panel} , que consta da Tabela 2.5. A equação (2.122) é adaptada de uma figura de [5] com um R^2 de 0,990 e um REQM de 6,96 W/m².

$$\begin{aligned} CPC = & -5,488 - 0,4832 \times (D_{Panel} \times 1000) + 8,496 \times AOR \\ & + 0,003297 \times (D_{Panel} \times 1000)^2 \\ & - 0,02355 \times (D_{Panel} \times 1000) \times AOR + 0,01829 \times AOR^2 \\ & - 5,979 \times 10^{-6} \times (D_{Panel} \times 1000)^3 \\ & + 4,234 \times 10^{-5} \times (D_{Panel} \times 1000)^2 \times AOR \\ & - 2,562 \times 10^{-5} \times (D_{Panel} \times 1000) \times AOR^2 \end{aligned} \quad (2.122)$$

A área de convecção da cuba do transformador é dada pela equação (2.123) em que TL é dado pela equação (2.99), TW é dado pela equação (2.100) e TH consta da Tabela 2.3.

$$TCA = 2 \times (TL + TW) \times TH + 2 \times TL \times TW \quad (2.123)$$

A transferência de calor devido à convecção na cuba é dada pela equação (2.124) em que TCA é dado pela equação (2.123) e TCC é dado pela equação (2.120).

$$TCL = TCA \times TCC \quad (2.124)$$

A área de radiação da cuba do transformador é dada pela equação (2.125) em que TL é dado pela equação (2.99), TW é dado pela equação (2.100), D_{Panel} consta da Tabela 2.5 e OH é dado pela equação (2.102).

$$TRA = [2 \times (TL + TW) + 4 \times D_{Panel} \times \sqrt{2}] \times OH \quad (2.125)$$

A transferência de calor devido à radiação na cuba é dada pela equação (2.126) em que TRA é dado pela equação (2.125) e TRC é dado pela equação (2.121).

$$TRL = TRA \times TRC \quad (2.126)$$

O número de painéis corrugados ao longo do comprimento da cuba é dado pela equação (2.127) em que $floor$ é a função arredondamento para baixo, TL é dado pela equação (2.99) e $Pitch$ consta da Tabela 2.5.

$$NCPTL = floor\left(\frac{TL - 60 \times 10^{-3}}{Pitch}\right) + 1 \quad (2.127)$$

O número de painéis corrugados ao longo da largura da cuba é dado pela equação (2.128) em que $floor$ é a função arredondamento para baixo, TW é dado pela equação (2.100) e $Pitch$ consta da Tabela 2.5.

$$NCPTW = floor\left(\frac{TW - 60 \times 10^{-3}}{Pitch}\right) + 1 \quad (2.128)$$

Assim, o número total de painéis corrugados é dado pela equação (2.129) em que $NCPTL$ é dado pela equação (2.127) e $NCPTW$ é dado pela equação (2.128).

$$NCP = 2 \times (NCPTL + NCPTW) \quad (2.129)$$

A área de painéis corrugados é dada pela equação (2.130) em que D_{Panel} e HCP constam da Tabela 2.5 e NCP é dado pela equação (2.129).

$$CPA = 2 \times D_{Panel} \times HCP \times NCP \quad (2.130)$$

A transferência de calor devido aos painéis corrugados é dada pela equação (2.131) em que CPA é dado pela equação (2.130) e CPC é dado pela equação (2.122).

$$CPL = CPA \times CPC \quad (2.131)$$

Assim, a transferência de calor total é dada pela equação (2.132) em que TCL é dado pela equação (2.124), TRL é dado pela equação (2.126) e CPL é dado pela equação (2.131).

$$TLRRT = TCL + TRL + CPL \quad (2.132)$$

As perdas totais do transformador para o nível de tensão de 6 kV são dadas pela equação (2.133) em que NLL é dado pela equação (2.37) e LL_2 é dado pela equação (2.90). O valor resultante deve ser inferior ao valor da transferência de calor.

$$TTL_2 = NLL + LL_2 \quad (2.133)$$

2.2.12 – Cálculo da massa dos materiais de isolamento

A área de tubo de papel de 1,5 mm de BT é dada pela equação (2.134) em que MW é dado pela equação (2.39), G consta da Tabela 2.7, $CCEE$ consta da Tabela 2.5 e $D3$ é dado pela equação (2.41).

$$S_{LV,TP} = MW \times (G - 2 \times CCEE) + D3 \times \pi \times (G - 2 \times CCEE) \quad (2.134)$$

A área de isolamento com espessura de 0,28 mm de BT é dada pela equação (2.135) em que MT_{LV} é dado pela equação (2.70), G consta da Tabela 2.7, $CCEE$ consta da Tabela 2.5 e $Layers_{LV}$ é dado pela equação (2.7).

$$S_{LV,LI} = MT_{LV} \times (G - 2 \times CCEE) \times Layers_{LV} \quad (2.135)$$

A área do terminal dos ductos de isolamento com espessura de 0,15 mm de BT é dada pela equação (2.136) em que MW é dado pela equação (2.39), G consta da Tabela 2.7, $CCEE$ consta da Tabela 2.5 e $Ducts_{LV}$ consta da Tabela 2.5.

$$S_{LV,EDI} = MW \times (G - 2 \times CCEE) \times Ducts_{LV} \times 2 \quad (2.136)$$

A área de isolamento dos tubos perimétricos com espessura de 0,15 mm de BT é dada pela equação (2.137) em que $D7$ é dado pela equação (2.48), G consta da Tabela 2.7 e $CCEE$ consta da Tabela 2.5.

$$S_{LV,PDI} = D7 \times \pi \times (G - 2 \times CCEE) \quad (2.137)$$

A área da extensão de isolamento de papel com espessura de 0,41 mm de BT é dada pela equação (2.138) em que $D13$ é dado pela equação (2.56), G consta da Tabela 2.7, $CCEE$ consta da Tabela 2.5 e BLD_{HV} é dado pela equação (2.22).

$$S_{LV,EPI} = 2 \times 2 \times \pi \times D13 \times [(G - 2 \times CCEE) + 1,8 \times BLD_{HV}] \quad (2.138)$$

O número de papéis de isolamento com espessura de 0,28 mm entre BT e MT é dado pela equação (2.139) em que *round* é a função arredondamento, $I_{HV,LV}$ consta da Tabela 2.5 e I_{HVL} é dado pela equação (2.5).

$$NPGI = \text{round} \left(\frac{I_{HV,LV} - 3,3 \times 10^{-3} - 2 \times 0,41 \times 10^{-3}}{I_{HVL}} \right) \quad (2.139)$$

A área do espaçamento de isolamento com espessura de 0,28 mm de BT é dada pela equação (2.140) em que $D7$ é dado pela equação (2.48), G consta da Tabela 2.7, $CCEE$ consta da Tabela 2.5 e $NPGI$ é dado pela equação (2.139).

$$S_{LV,GI} = D7 \times \pi \times (G - 2 \times CCEE) \times NPGI \quad (2.140)$$

A área da camada de isolamento com espessura de 0,28 mm de MT é dada pela equação (2.141) em que MT_{HV} é dado pela equação (2.75), G consta da Tabela 2.7, $CCEE$ consta da Tabela 2.5 e $Layers_{HV}$ é dado pela equação (2.21).

$$S_{HV,LI} = MT_{HV} \times [(G - 2 \times CCEE) + 4 \times 19 \times 10^{-3}] \times Layers_{HV} \times 1,25 \quad (2.141)$$

A área do terminal dos ductos de isolamento com espessura de 0,15 mm de MT é dada pela equação (2.142) em que LG_{HV} é dado pela equação (2.53), G consta da Tabela 2.7, $CCEE$ e $Ducts_{HV}$ constam da Tabela 2.5.

$$S_{HV,EDI} = LG_{HV} \times (G - 2 \times CCEE) \times Ducts_{HV} \times 2 \quad (2.142)$$

A área de isolamento dos tubos perimétricos com espessura de 0,15 mm de MT é dada pela equação (2.143) em que $D13$ é dado pela equação (2.56), G consta da Tabela 2.7 e $CCEE$ consta da Tabela 2.5.

$$S_{HV,PDI} = D13 \times \pi \times (G - 2 \times CCEE) \quad (2.143)$$

A área de isolamento dos enrolamentos parciais de MT é dada pela equação (2.144) em que MT_{HV} é dado pela equação (2.75), G consta da Tabela 2.7 e $CCEE$ consta da Tabela 2.5.

$$S_{HV,Sub} = MT_{HV} \times (G - 2 \times CCEE) \times 5 \quad (2.144)$$

O número de papéis de isolamento com espessura de 0,28 mm entre os enrolamentos de MT é dado pela equação (2.145) em que *round* é a função arredondamento, $I_{HV,HV}$ consta da Tabela 2.5 e I_{HVL} é dado pela equação (2.5).

$$NPEGI = \text{round} \left(\frac{I_{HV,HV} - 3,3 \times 10^{-3} - 2 \times 0,41 \times 10^{-3}}{I_{HVL}} \right) \quad (2.145)$$

A área de espaçamento de isolamento com espessura de 0,28 mm de MT é dada pela equação (2.146) em que $D13$ é dado pela equação (2.56), G consta da Tabela 2.7, $CCEE$ consta da Tabela 2.5 e $NPEGI$ é dado pela equação (2.145).

$$S_{HV,GI} = D13 \times \pi \times (G - 2 \times CCEE) \times NPEGI \quad (2.146)$$

A área de cartão de isolamento de MT de 1,5 mm é dada pela equação (2.147) em que MT_{HV} é dado pela equação (2.75) e $Layers_{HV}$ é dado pela equação (2.21).

$$S_{HV,IBP} = MT_{HV} \times 40 \times 10^{-3} \times Layers_{HV} \quad (2.147)$$

A massa do material de isolamento com espessura de 1,5 mm é dada pela equação (2.148) em que $S_{LV,TP}$ é dado pela equação (2.75) e $S_{HV,IBP}$ é dado pela equação (2.147).

$$WIM_{1,5} = 3 \times 1,1 \times 1,95 \times (S_{LV,TP} + S_{HV,IBP}) \quad (2.148)$$

A massa do material de isolamento com espessura de 0,41 mm é dada pela equação (2.149) em que $S_{LV,EPI}$ é dado pela equação (2.138).

$$WIM_{0,41} = 3 \times 1,1 \times 0,37 \times S_{LV,EPI} \quad (2.149)$$

A massa do material de isolamento com espessura de 0,28 mm é dada pela equação (2.150) em que $S_{LV,LI}$, $S_{LV,GI}$, $S_{HV,LI}$, $S_{HV,Sub}$ e $S_{HV,GI}$ são dados, respetivamente, pelas equações (2.135), (2.140), (2.141), (2.144) e (2.146).

$$WIM_{0,28} = 3 \times 1,1 \times 0,26 \times (S_{LV,LI} + S_{LV,GI} + S_{HV,LI} + S_{HV,Sub} + S_{HV,GI}) \quad (2.150)$$

A massa do material de isolamento com espessura de 0,15 mm é dada pela equação (2.151) em que $S_{LV,EDI}$, $S_{LV,PDI}$, $S_{HV,EDI}$ e $S_{HV,PDI}$ são dados, respetivamente, pelas equações (2.136), (2.137), (2.142) e (2.143).

$$WIM_{0,15} = 3 \times 1,1 \times 0,13 \times (S_{LV,EDI} + S_{LV,PDI} + S_{HV,EDI} + S_{HV,PDI}) \quad (2.151)$$

Assim, a massa total dos materiais de isolamento é dada pela equação (2.152) em que $WIM_{1,5}$, $WIM_{0,41}$, $WIM_{0,28}$ e $WIM_{0,15}$ são dados, respetivamente, pelas equações (2.148), (2.149), (2.150) e (2.151).

$$w_4 = WIM_{1,5} + WIM_{0,41} + WIM_{0,28} + WIM_{0,15} \quad (2.152)$$

2.2.13 – Cálculo da massa dos ductos de refrigeração

O número de tiras de ductos de refrigeração de BT é dado pela equação (2.153) em que *round* é a função arredondamento, *MW* é dado pela equação (2.39), *DWPG_{LV}* e *Ducts_{LV}* constam da Tabela 2.5.

$$N_1 = \text{round} \left(\frac{MW}{DWPG_{LV}} \times Ducts_{LV} \times 2 \right) \quad (2.153)$$

O número de ductos de refrigeração perimétricos de BT é dado pela equação (2.154) em que *round* é a função arredondamento, *D7* é dado pela equação (2.48) e *DWPG_{LV}* consta da Tabela 2.5.

$$N_2 = \text{round} \left(\frac{\pi \times D7}{DWPG_{LV}} \right) \quad (2.154)$$

O número de tiras de ductos de refrigeração de MT é dado pela equação (2.155) em que *round* é a função arredondamento, *MW* é dado pela equação (2.39), *BLD_{HV}* é dado pela equação (2.22), *DWPG_{HV}* e *Ducts_{HV}* constam da Tabela 2.5.

$$N_3 = \text{round} \left(\frac{MW + 2 \times BLD_{LV}}{DWPG_{HV}} \times Ducts_{HV} \times 2 \right) \quad (2.155)$$

O número de ductos de refrigeração perimétricos de MT é dado pela equação (2.156) em que *D13* é dado pela equação (2.56) e *DWPG_{HV}* consta da Tabela 2.5.

$$N_4 = \text{round} \left(\frac{\pi \times D13}{DWPG_{HV}} \right) \quad (2.156)$$

Assim, pode calcular-se a massa total de ductos de refrigeração de acordo com a equação (2.157) em que, *g_{DS}* consta da Tabela 2.2, *N₁*, *N₂*, *N₃* e *N₄* são dados, respetivamente, pelas equações (2.153), (2.154), (2.155) e (2.156), *G* consta da Tabela 2.7 e *CCEE*, *Dw* e *T_{DS}* constam da Tabela 2.5.

$$w_5 = 3 \times 1,1 \times g_{DS} \times [(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \times (G - 2 \times CCEE) \times Dw \times T_{DS}] \quad (2.157)$$

2.2.14 – Cálculo da massa de óleo

O volume dos painéis corrugados é dado pela equação (2.158) em que HCP e D_{Panel} constam da Tabela 2.5 e NCP resulta da equação (2.129).

$$V_{CP} = 8 \times 10^{-3} \times HCP \times D_{Panel} \times NCP \quad (2.158)$$

O volume dos enrolamentos de BT e MT são dados pela equação (2.159) em que w_1 é dado pela equação (2.91), w_2 é dado pela equação (2.92) e g_{LV} consta da Tabela 2.2.

$$V_{Wd} = \frac{w_1 + w_2}{g_{LV}} \quad (2.159)$$

O volume do material magnético (aço do núcleo) é dado pela equação (2.160) em que w_3 é dado pela equação (2.35) e g_{MM} consta da Tabela 2.2.

$$V_{MM} = \frac{w_3}{g_{MM}} \quad (2.160)$$

O volume da cuba é dado pela equação (2.161) em que TL , TW e OH são dados, respetivamente, pelas equações (2.99), (2.100) e (2.102).

$$V_T = TL \times TW \times OH \quad (2.161)$$

Assim, o volume de óleo mineral do transformador é dado pela equação (2.162) em que V_T , V_{CP} , V_{Wd} e V_{MM} são dados, respetivamente, pelas equações (2.161), (2.158), (2.159) e (2.160), e V_{CT} consta da Tabela 2.5.

$$V_O = V_T + V_{CT} + V_{CP} - V_{Wd} - V_{MM} \quad (2.162)$$

Consequentemente a massa do óleo mineral é dada pela equação (2.163) em que g_O consta da Tabela 2.2 e V_O é dado pela (2.162).

$$w_6 = 0,95 \times g_O \times V_O \quad (2.163)$$

2.2.15 – Cálculo da massa de painel de aço

A área ótima do reservatório de óleo é dada pela equação (2.164) em que V_{CT} consta da Tabela 2.5.

$$A_{CT} = 2 \times \pi \times \left(\frac{V_{CT}}{2 \times \pi}\right)^{1/3} \times 2 \times \left(\frac{V_{CT}}{2 \times \pi}\right)^{1/3} + 2 \times \pi \times \left[\left(\frac{V_{CT}}{2 \times \pi}\right)^{1/3}\right]^2 \quad (2.164)$$

A área total de painéis de aço é dada pela equação (2.165) em que TCA é dado pela equação (2.123) e A_{CT} é dado pela equação (2.164).

$$A_7 = TCA + A_{CT} \quad (2.165)$$

Pode então calcular-se a massa de painel de aço através da equação (2.166) em que A_7 é dado pela equação (2.165).

$$w_7 = \frac{217,2}{6,0419} \times A_7 \quad (2.166)$$

2.2.16 – Cálculo da massa dos painéis corrugados

A massa de painéis corrugados é dada pela equação (2.167) em que g_{CP} consta da Tabela 2.2 e CPA é dado pela equação (2.130).

$$w_8 = g_{CP} \times CPA \quad (2.167)$$

2.2.17 – Cálculo do custo dos materiais

O custo do enrolamento de BT é dado pela equação (2.168) em que uc_1 consta da Tabela 2.4 e w_1 é dado pela equação (2.91).

$$C_1 = uc_1 \times w_1 \quad (2.168)$$

O custo do enrolamento de MT é dado pela equação (2.169) em que uc_2 consta da Tabela 2.4 e w_2 é dado pela equação (2.92).

$$C_2 = uc_2 \times w_2 \quad (2.169)$$

O custo do material magnético é dado pela equação (2.170) em que uc_3 consta da Tabela 2.4 e w_3 é dado pela equação (2.35).

$$C_3 = uc_3 \times w_3 \quad (2.170)$$

O custo dos materiais de isolamento é dado pela equação (2.171) em que uc_4 consta da Tabela 2.4 e w_4 é dado pela equação (2.152).

$$C_4 = uc_4 \times w_4 \quad (2.171)$$

O custo dos ductos de refrigeração é dado pela equação (2.172) em que uc_5 consta da Tabela 2.4 e w_5 é dado pela equação (2.157).

$$C_5 = uc_5 \times w_5 \quad (2.172)$$

O custo do óleo mineral é dado pela equação (2.173) em que uc_6 consta da Tabela 2.4 e w_6 é dado pela equação (2.163).

$$C_6 = uc_6 \times w_6 \quad (2.173)$$

O custo dos painéis de aço de construção é dado pela equação (2.174) em que uc_7 consta da Tabela 2.4 e w_7 é dado pela equação (2.166).

$$C_7 = uc_7 \times w_7 \quad (2.174)$$

O custo dos painéis corrugados é dado pela equação (2.177) em que uc_8 consta da Tabela 2.4 e w_8 é dado pela equação (2.175).

$$C_8 = uc_8 \times w_8 \quad (2.175)$$

Assim, pela equação (2.176) pode calcular-se o custo dos materiais de construção do transformador em que C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_6 , C_7 e C_8 são dados, respetivamente pelas equações (2.168), (2.169), (2.170), (2.171), (2.172), (2.173), (2.174) e (2.175).

$$CMM = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8 \quad (2.176)$$

2.2.18 – Cálculo do custo de fabrico do transformador

O custo total dos materiais de construção é dado pela equação (2.177) em que CMM é dado pela equação (2.176) e CRM consta da Tabela 2.4.

$$CM = CMM + CRM \quad (2.177)$$

O custo de construção do transformador é dado pela equação (2.178) em que CM é dado pela equação (2.177) e C_{Lab} consta da Tabela 2.4.

$$CTM = CM + C_{Lab} \quad (2.178)$$

O preço de venda ao público do transformador é dado pela equação (2.179) em que CTM é dado pela equação (2.178) e SM consta da Tabela 2.4.

$$BP = \frac{CTM}{1 - \frac{SM}{100}} \quad (2.179)$$

A margem de lucro da venda do transformador é dada pela equação (2.180) em que BP e CTM são dados, respetivamente, pelas equações (2.179) e (2.178).

$$MS = BP - CTM \quad (2.180)$$

O custo total de posse do transformador é dado pela equação (2.181) em que BP é dado pela equação (2.179), NLL é dado pela equação (2.37), LL_1 é dado pela equação (2.81), A e B constam da Tabela 2.4.

$$TOC = BP + A \times NLL + B \times LL_1 \quad (2.181)$$

2.3 – Formulação do problema

Com as equações de dimensionamento do transformador desenvolvidas pode proceder-se à formulação do problema.

2.3.1 – Função objetivo

São apresentadas várias possibilidades para a função objetivo do problema de dimensionamento do transformador: o custo dos materiais dado pela equação (2.177), o custo de fabrico do transformador dado pela equação (2.178) ou o custo total de posse dado pela equação (2.181). Partindo desta formulação pode ainda chegar-se a outras possíveis funções objetivo, por exemplo, consumo energético ou emissões de CO_2 , tanto relativas à produção como ao tempo de vida do transformador.

Neste caso optou-se pela escolha do custo de fabrico, sendo a função objetivo dada pela equação (2.182) em que CTM é dado pela equação (2.178), CM é dado pela equação (2.177) e C_{Lab} consta da Tabela 2.4.

$$\min CTM = \min[CM + C_{Lab}] \quad (2.182)$$

2.3.2 – Restrições

O problema de minimização do custo está sujeito a restrições, as quais são enumeradas seguidamente:

1. Condição de igualdade da tensão induzida

$$U_{p,LV} = 4,44 \times f \times TurnsMain_{LV} \times FD_{max} \times CSF \times D \times 2 \times E_u \quad (2.183)$$

A condição de igualdade da tensão induzida é dada pela equação (2.183) em que $U_{p,LV}$ é dado pela equação (2.1), f consta da Tabela 2.1, $TurnsMain_{LV}$ é dado pela equação (2.6), FD_{max} e D constam da Tabela 2.7, CSF consta da Tabela 2.2 e E_u é dado pela equação (2.3).

2. Condição de igualdade de rácio de espiras

$$\frac{U_{p,HV1}}{U_{p,LV}} = \frac{TurnsMain_{HV}}{TurnsMain_{LV}} \quad (2.184)$$

A condição de igualdade de rácio de espiras é dada pela equação (2.184) em que $U_{p,HV1}$ é dado pela equação (2.11) ou (2.12), $U_{p,LV}$ é dado pela equação (2.1), $TurnsMain_{HV}$ é dado pela equação (2.15) e $TurnsMain_{LV}$ é dado pela equação (2.6).

3. Perdas em vazio

$$NLL < 1,15 \times NLL_g \quad (2.185)$$

A condição de desigualdade de perdas em vazio é dada pela equação (2.185) em que NLL é dado pela equação (2.37) e NLL_g consta da Tabela 2.3. Esta condição está definida pela norma IEC 60076-1.

4. Perdas em carga para o nível de tensão de 20 kV

$$LL_1 < 1,15 \times LL_g \quad (2.186)$$

A condição de desigualdade de perdas em carga para o nível de tensão de 20 kV é dada pela equação (2.186) em que LL_1 é dado pela equação (2.81) e LL_g consta da Tabela 2.3. Esta condição está definida pela norma IEC 60076-1.

5. Perdas em carga para o nível de tensão de 6,6 kV

$$LL_2 < 1,15 \times LL_g \quad (2.187)$$

A condição de desigualdade de perdas em carga para o nível de tensão de 6,6 kV é dada pela equação (2.187) em que LL_2 é dado pela equação (2.90) e LL_g consta da Tabela 2.3. Esta condição está definida pela norma IEC 60076-1.

6. Perdas totais para o nível de tensão de 20 kV

$$NLL + LL_1 < 1,1 \times (NLL_g + LL_g) \quad (2.188)$$

A condição de desigualdade de perdas totais para o nível de tensão de 20 kV é dada pela equação (2.188) em que NLL é dado pela equação (2.37), LL_1 é dado pela equação (2.81), NLL e LL_g constam da Tabela 2.3. Esta condição está definida pela norma IEC 60076-1.

7. Perdas totais para o nível de tensão de 6,6 kV

$$NLL + LL_2 < 1,1 \times (NLL_g + LL_g) \quad (2.189)$$

A condição de desigualdade de perdas totais para o nível de tensão de 6,6 kV é dada pela equação (2.189) em que NLL é dado pela equação (2.37), LL_2 é dado pela equação (2.90), NLL e LL_g constam da Tabela 2.3. Esta condição está definida pela norma IEC 60076-1.

8. Impedância de curto-circuito

$$0,9 \times \frac{U_{kg}}{100} < U_k < 1,1 \times \frac{U_{kg}}{100} \quad (2.190)$$

A condição de desigualdade de impedância de curto-circuito é dada pela equação (2.190) em que U_k é dado pela equação (2.94) e U_{kg} consta da Tabela 2.3. Esta condição está definida pela norma IEC 60076-1.

9. Transferência de calor

$$TLRTT - TTL_2 > 0 \quad (2.191)$$

A condição de desigualdade para a transferência de calor é dada pela equação (2.191) em que $TLRTT$ é dado pela equação (2.132) e TTL_2 é dado pela equação (2.133). A capacidade de transferência de calor do transformador deve ser maior que as perdas do transformador no pior cenário de uso.

10. Aumento de temperatura do óleo

$$AOR < 60 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.192)$$

A condição de desigualdade para aumento da temperatura do óleo é dada pela equação (2.192) em que AOR é dado pela equação (2.119). Esta condição está definida pela norma IEC 60076-2.

11. Tensão induzida na BT

$$Induced_{LV} < 6 \text{ kV} \quad (2.193)$$

A condição de desigualdade de tensão induzida para o enrolamento de BT é dada pela equação (2.193) em que $Induced_{LV}$ é dado pela equação (2.26). O valor de tensão de 6 kV é relativo ao isolamento de 0,28 mm [5].

12. Tensão induzida na MT

$$Induced_{HV} < 6 \text{ kV} \quad (2.194)$$

A condição de desigualdade de tensão induzida para o enrolamento de MT é dada pela equação (2.194) em que $Induced_{HV}$ é dado pela equação (2.28). O valor de tensão de 6 kV é relativo ao isolamento de 0,28 mm [5].

13. Tensão de impulso na BT

$$Impulse_{LV} < 23,5 \text{ kV} \quad (2.195)$$

A condição de desigualdade de tensão de impulso para o enrolamento de BT é dada pela equação (2.195) em que $Impulse_{LV}$ é dado pela equação (2.27). O valor de tensão de 23,5 kV é relativo ao isolamento de 0,28 mm [5].

14. Tensão de impulso na MT

$$Impulse_{HV} < 23,5 \text{ kV} \quad (2.196)$$

A condição de desigualdade de tensão de impulso para o enrolamento de MT é dada pela equação (2.196) em que $Impulse_{HV}$ é dado pela equação (2.30). O valor de tensão de 23,5 kV é relativo ao isolamento de 0,28 mm [5].

15. Altura da cuba

$$TH_{min} < TH \quad (2.197)$$

A condição de desigualdade para a altura da cuba é dada pela equação (2.197) em que TH_{min} é dado pela equação (2.101) e TH consta da Tabela 2.3.

Assim, o problema de minimização está completamente formulado, onde são claramente definidas as variáveis, a função a minimizar e as restrições.

Capítulo 3

Estado da arte

O dimensionamento de um transformador é uma tarefa complexa que exige do projetista um constante compromisso entre condicionantes impostas (standards e especificações), mantendo ao mesmo tempo o custo de construção do transformador o mais baixo possível, ou seja, o problema do dimensionamento de um transformador é um problema de minimização sujeito a diversas restrições.

Ao longo do tempo têm sido feitos vários desenvolvimentos no design e construção de transformadores aumentando a eficiência e diminuindo o custo, por exemplo, a alteração do tipo de aço de convencional para aço amorfo laminado levou a uma diminuição das perdas em vazio de 70% [8].

Com o aumento da capacidade de processamento e o desenvolvimento de novos algoritmos de otimização surgem oportunidades para mais melhoramentos no design de transformadores.

Os métodos para o desenvolvimento do dimensionamento de transformadores podem dividir-se genericamente em quatro tipos [9]:

- Métodos experimentais – combinação de por exemplo, modelos analíticos com medições experimentais de forma a ter um modelo preciso da realidade;
- Circuito equivalente – modelo simples que recorre a um modelo semi-empírico para caracterizar o núcleo, pode afetar a precisão dos cálculos. Ainda muito usado na indústria;
- Métodos numéricos – a ferramenta mais utilizada para a simulação do funcionamento dos transformadores, sendo Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*) o mais usado.
- Métodos estocásticos – métodos que incluem inteligência artificial (*Artificial Intelligence - AI*) como por exemplo os algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms - GA*), que estão em crescente utilização.

Sendo a inteligência artificial um dos desenvolvimentos técnicos com maior crescimento na atualidade [10], com o aumento da sua utilização em diversos ramos, desde a saúde até à economia, a tomada de decisão é cada vez mais baseada na evidência. O estudo dos transformadores não é alheio a essa tendência [11].

Ao longo do tempo, vários métodos estocásticos têm vindo a ser utilizados para o estudo dos transformadores.

Em [12] é utilizada a simulação de Monte Carlo para simulação de efeitos térmicos no envelhecimento do isolamento do transformador. Neste artigo faz-se uma análise de sensibilidade das equações de cálculo de pontos quentes nos transformadores recorrendo à simulação de Monte Carlo. Com estas simulações foi possível identificar os parâmetros mais importantes em cada cenário simulado. A simulação de Monte Carlo consiste na simulação probabilística de vários cenários e, após inúmeras simulações, análise das mesmas.

Também as redes neuronais têm sido aplicadas à conceção de transformadores. Uma rede neuronal artificial consiste na mimetização duma rede neuronal biológica, sendo que as redes neuronais têm especial interesse para previsão ou controlo adaptativo. As redes neuronais precisam de dados para treino, validação e teste. Em [13] as redes neuronais são utilizadas com sucesso para prever as perdas em vazio, ainda que com algumas limitações, como por exemplo os parâmetros de entrada deverão ser no máximo quatro. Em [14] é feito o estudo, com sucesso, da relação entre corrente de arranque e as forças resultantes nos enrolamentos. É feita igualmente uma comparação com as correntes de curto-circuito. A técnica utilizada foi minimização da energia com rede neuronal. No artigo da referência [15] as redes neuronais são utilizadas com o objetivo de criar relações que permitam simplificar a complexidade do processo de design dum transformador. A rede neuronal é aplicada aos dados duma base de dados de testes de transformadores. Os resultados obtidos revelam resultados próximos dos ideais, quer em performance quer em custo. Em [16] é utilizada uma rede neuronal com o objetivo de melhorar a resposta térmica dum tipo específico de transformadores secos. A rede neuronal modelada consegue encontrar com grande precisão a relação dos diversos parâmetros com as perdas e temperatura interna.

As redes neuronais podem ser utilizadas em combinação com outras técnicas ou algoritmos. Na referência [17] uma rede neuronal é usada em conjunto com árvores de decisão bem como com elementos finitos, para escolha do material dos enrolamentos. Esta combinação revela uma precisão de 96% na escolha do material. Já na referência [18] as redes neuronais são utilizadas em combinação com o método do enxame de partículas. O enxame de partículas consiste na

mimetização dos bandos ou dos cardumes, e para isso, é criada uma população de indivíduos com uma determinada posição e velocidade no domínio do problema, que comunicam entre si. Cada individuo terá sempre como objetivo a busca de valores ótimos. O enxame de partículas tem tido implementações com sucesso em diversos ramos. Na referência [18] o enxame de partículas foi utilizado com sucesso para treinar uma rede neuronal para distinguir entre corrente de magnetização e curto-circuito.

Também na referência [19] é utilizado um enxame de partículas, neste caso para modelação térmica demonstrando desempenho semelhante a outras técnicas (algoritmos genéticos e redes neuronais). Em [20] é aplicado o enxame de partículas na otimização de um transformador retificador e são aplicadas técnicas adicionais para evitar ótimos locais. A alteração introduzida consiste na utilização de populações distintas num determinado número de iterações e de seguida compará-las, sendo que a melhor população segue para as próximas iterações. Em [21] o enxame de partículas é utilizado para dimensionar os enrolamentos do transformador recorrendo a variáveis geométricas. Os resultados, apesar de satisfatórios, carecem de mais desenvolvimento.

Outro método que se destaca é o algoritmo de otimização com colónias de formigas. As formigas quando se movimentam libertam feromonas, essas feromonas guiam as outras formigas. Portanto, um caminho com muitas feromonas é um bom caminho, um caminho com poucas feromonas é um mau caminho. Neste modelo, as feromonas vão evaporando, assim, quando não há passagem de formigas, a quantidade de feromonas vai-se extinguindo, tornando o caminho pouco atrativo. Um exemplo da aplicação do algoritmo da colónia de formigas encontra-se em [22] em que este algoritmo é utilizado para escolher o transformador apropriado para um determinado local tendo em conta as previsões de demanda da rede local. A utilização do algoritmo representa uma poupança de 3,21% no custo, comparando com uma escolha convencional. Em [23] a otimização por colónia de formigas é utilizada para minimizar o custo do transformador, considerando três variáveis de entrada (número de espiras do primário, fluxo e densidade de corrente). A implementação da otimização é feita com sucesso abrindo portas ao uso mais generalizado do algoritmo no ramo das máquinas elétricas. Na referência [24], tal como em [22], também é utilizada a otimização por colónia de formigas para encontrar a potência ótima para um transformador num determinado local, minimizando o custo total de posse e respeitando as condições de carga máxima.

Em [25] é estudada a minimização das perdas em vazio utilizando evolução diferencial. O objetivo é encontrar o melhor compromisso nos valores de correntes de magnetização entre o

modelo experimental e o modelo calculado. Para o modelo calculado os valores de correntes são obtidos utilizando a evolução diferencial, mostrando-se haver uma relação bastante apreciável com os valores experimentais. O algoritmo de evolução diferencial, na sua versão base, consiste na existência de uma população de soluções candidatas que é sujeita a duas funções que cruzam (*crossover*) e diferenciam (*differential weight*) os candidatos. Se a nova posição criada for uma melhoria, então essa posição é aceite e adicionada à população de soluções.

Com algumas semelhanças com a evolução diferencial, os algoritmos genéticos aparecem muitas vezes associados à inteligência artificial aplicada aos transformadores. Um algoritmo genético consiste na mimetização da evolução natural (biológica) na qual o ADN (Ácido desoxirribonucleico) dos indivíduos mais adaptados passa às gerações seguintes. Num algoritmo genético, uma população de indivíduos é criada e essa população vai criar uma nova população de descendentes através da aplicação de várias funções que imitam a evolução natural. A função cruzamento (ou comumente conhecida por *crossover*), que tal como o nome indica faz o cruzamento entre indivíduos dando origem aos descendentes; a função mutação que cria alterações não previstas nos indivíduos da população; a função elitismo que garante que os melhores indivíduos da nova ou velha geração estão presentes. Em [26] o algoritmo genético é utilizado para estimar os parâmetros dum transformador trifásico através da resolução das equações do circuito equivalente. Esta aplicação mostra-se versátil e superior às técnicas convencionais. Na referência [27] os algoritmos genéticos são utilizados para estudar o design de transformadores de distribuição do tipo secos. Neste estudo conclui-se que o algoritmo genético implementado encontra facilmente o ótimo com o preço computacional baixo. Numa escala mais pequena, em [28] é feita a otimização de transformadores toroidais de pequena dimensão recorrendo a algoritmos genéticos. A otimização efetuada mostra resultados muito bons relativamente a métodos de dimensionamento convencionais, em que, por exemplo, as perdas magnéticas são reduzidas em 32%. Em [29] é efetuada a minimização do custo total de posse dum transformador recorrendo aos algoritmos genéticos. Neste estudo é usada uma forma de restrição do problema baseada numa função penalização para tornar o algoritmo adaptativo. Esta alteração ao algoritmo melhora a capacidade de busca global considerando a minimização do custo total de posse. Em [30] o algoritmo genético também é modificado com o objetivo de otimizar transformadores de potência considerando: duplo objetivo, *crossover* estocástico e mutação adaptativa. Verificou-se que o algoritmo obtém bons resultados, ótimos ou quasi-ótimos, considerando-se uma boa estratégia de design de transformadores de potência.

Na referência [31] a função *crossover* do algoritmo genético é sujeita à implementação da teoria do caos, verifica-se que essa alteração promove a convergência do algoritmo e dá boas indicações quanto à utilidade do algoritmo genético para o design de transformadores.

Ainda em relação aos algoritmos genéticos, existem algumas referências que fazem a comparação entre algoritmos genéticos e outros algoritmos ou variantes.

Um exemplo de comparação está presente em [32], em que é feita a comparação entre o algoritmo genético simples, a evolução diferencial e um algoritmo genético modificado, que consiste numa alteração na função elitismo para evitar o domínio de determinados indivíduos na população e aumentar a diversidade (NSGA-II). A função objetivo é minimizar as perdas e o custo total de posse. O algoritmo incorporando o NSGA-II teve os melhores resultados dos três, e tanto a evolução diferencial como o NSGA-II obtiveram melhores resultados do que o protótipo dimensionado da forma clássica. Outra comparação apresentada em [33], são comparadas três técnicas aplicadas ao dimensionamento do transformador: convencional, algoritmos genéticos e enxame de partículas. O objetivo da otimização é minimizar o custo total de posse do transformador. Conclui-se que ambas as técnicas funcionam bem quando aplicadas ao dimensionamento do transformador, sendo que o enxame de partículas supera o algoritmo genético, obtendo melhores resultados.

Em suma, várias técnicas têm sido utilizadas para dimensionar vários tipos de transformadores ao longo do tempo. Parece haver evidência da utilidade da inteligência artificial para o dimensionamento de transformadores dada a complexidade do problema. Das técnicas mais utilizadas destacam-se as redes neuronais e os algoritmos genéticos, apresentando bastante sucesso na resolução dos problemas a que se propõem. As redes neuronais parecem mais indicadas para resolução de problemas onde existem dados e pode haver interesse em usar esses dados para encontrar relações que permitam otimizar o problema, ou para fazer previsões. Já os algoritmos genéticos, por outro lado parecem mais vocacionados para problemas de otimização de transformadores visto tratar-se de um problema de elevada complexidade e com descontinuidades no domínio. Parece igualmente existir margem de manobra para a melhoria da performance dos algoritmos genéticos, através da introdução de novos conceitos ou modificações a funções existentes. Também, tanto a otimização por colónia de formigas como a otimização por enxame de partículas, parecem apresentar resultados interessantes. Tendo em conta a bibliografia consultada, optou-se pela utilização dos algoritmos genéticos como ferramenta a estudar e aplicar no dimensionamento do transformador de distribuição descrito no Capítulo 2 desta dissertação.

Capítulo 4

Algoritmo genético

4.1 – Introdução

O algoritmo genético (AG) é um método estocástico de procura do ótimo que imita a seleção natural biológica. Para o processo de procura do ótimo, o algoritmo genético utiliza uma população de potenciais soluções e aplica o princípio da sobrevivência do indivíduo mais apto. A cada geração são selecionados os indivíduos mais aptos (que possuem o melhor *fitness*, ou valor de aptidão), gerados através de um conjunto de operações, também elas baseadas na genética natural. Este processo leva à evolução da população de indivíduos, tornando-os cada vez mais adaptados ao ambiente, comparativamente com a geração anterior.

Os indivíduos de uma população são chamados de cromossomas, que por sua vez são constituídos por genes, cujo valor de cada gene é chamado de alelo, como pode observar-se na Figura 4.1 (sendo que neste caso, para ilustração, são representados apenas zeros e uns).

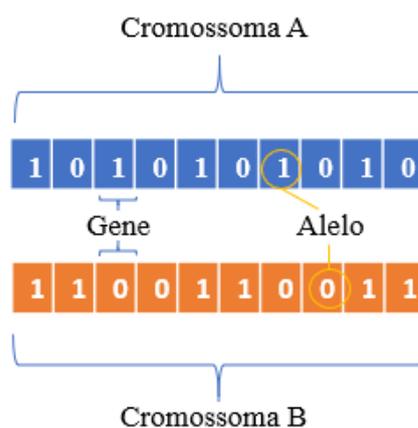


Figura 4.1 – Elementos construtivos da população de AG

Cada gene num cromossoma pode ser considerado uma variável e o alelo o valor de cada variável. Essas variáveis são as entradas na função objetivo que resultam num valor de aptidão

para cada elemento da população. Conhecido o valor de aptidão, torna-se possível comparar os indivíduos duma população.

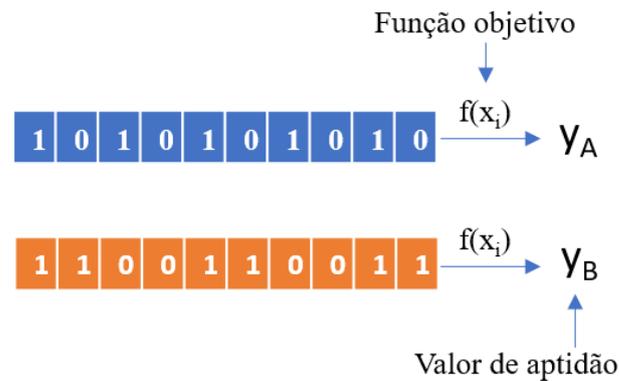


Figura 4.2 – Função objetivo e valor de aptidão

Com os valores de aptidão de todos os elementos da população determinados, é então possível fazer-se a seleção dos melhores indivíduos da população. Existem vários métodos para efetuar a seleção dos indivíduos de uma população, o método escolhido nesta dissertação foi o torneio, e é desenvolvido no subcapítulo 4.2.

Feita a seleção dos indivíduos da população, segue-se o cruzamento dos indivíduos escolhidos pelo método de seleção, o chamado *crossover*, que será desenvolvido no subcapítulo 4.3.

Após o *crossover* segue-se a mutação, que consiste na mutação de um cromossoma aleatório, num gene aleatório, para um alelo aleatório, que é desenvolvida no subcapítulo 4.4.

Após a seleção, *crossover* e mutação calculam-se novamente os valores de aptidão para a nova população.

Tendo as populações das velha e nova gerações e os respetivos valores de aptidão, é possível aplicar o elitismo no algoritmo, que consiste na passagem de uma fração dos indivíduos mais aptos da geração velha para a geração nova. O elitismo será desenvolvido no subcapítulo 4.6.

Com isto chega-se então à versão final da nova geração, com os valores dos alelos e os valores de aptidão para cada cromossoma, faz-se a seleção do melhor valor possível (cromossomas cujos valores dos alelos verificam restrições), e são verificados os critérios de paragem antes de seguir para a próxima geração.

Os critérios de paragem adotados são o *stall* e número máximo de gerações, desenvolvidos no subcapítulo 4.7.

Caso algum dos critérios de paragem seja verificado, o algoritmo termina, caso contrário, volta-se novamente à etapa de seleção, e por aí em diante, aplicando os operadores *crossover*, mutação e elitismo.

Na Figura 4.3 representa-se esquematicamente através dum fluxograma a cadeia de funcionamento do algoritmo genético.

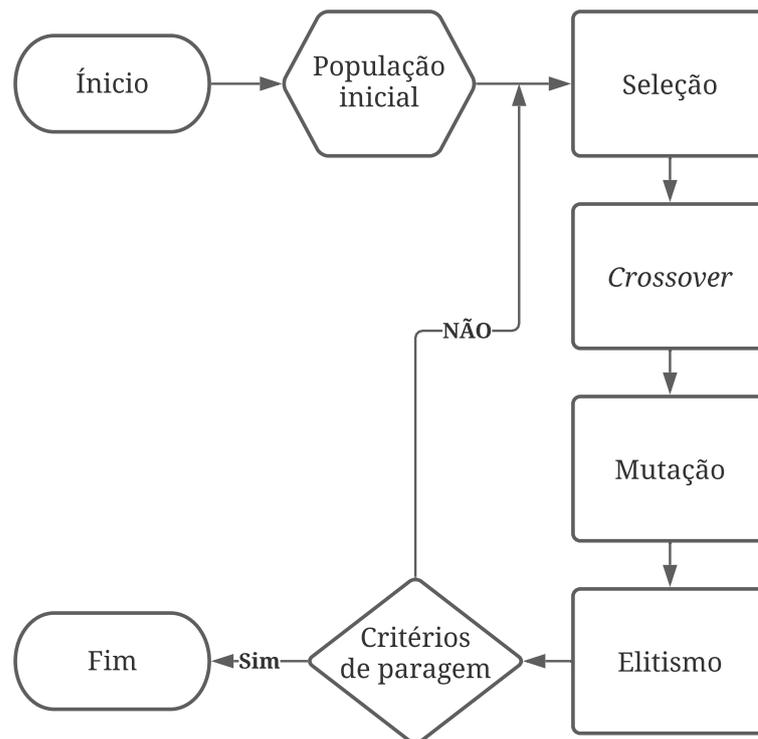


Figura 4.3 - Fluxograma do algoritmo genético

Nos próximos subcapítulos percorrem-se em detalhe os vários processos do algoritmo genético.

4.2 – Seleção

A seleção consiste na determinação dos indivíduos de uma população que irão ser escolhidos para se reproduzirem. Os métodos mais comuns de seleção são baseados na reprodução proporcional, como por exemplo a roda da sorte ou a amostragem estocástica universal [34].

Os métodos de seleção podem agrupar-se, genericamente, em quatro variantes: reprodução proporcional, seleção por *ranking*, seleção por torneio e seleção em regime estacionário [35].

O exemplo mais comum de reprodução proporcional é a seleção por roda da sorte. Neste tipo de seleção a área da roda da sorte é o somatório dos valores de aptidão dos indivíduos da população, assim, para o caso de uma maximização, o indivíduo mais adaptado irá ocupar uma percentagem da área da roda da sorte maior que um indivíduo menos adaptado. Quando a roda da sorte é girada, irá parar num ponto aleatório e a probabilidade de acertar num indivíduo será tanto maior quanto for a área que ocupa. A roda da sorte é girada o mesmo número de vezes correspondente ao valor do tamanho da população.

Na seleção por *ranking* os indivíduos são colocados por ordem decrescente de valor de aptidão (no caso de uma maximização) e por essa ordem são atribuídos um decrescente número de cópias de cada indivíduo, em que o somatório do número de cópias é igual ao tamanho da população. Assim, numa nova população o indivíduo mais adaptado terá mais cópias que o segundo indivíduo mais adaptado, e este, mais cópias que o terceiro e assim sucessivamente.

Na seleção por torneio ocorre uma comparação entre indivíduos aleatórios duma população. No caso de um torneio binário, são escolhidos dois indivíduos aleatórios e só um deles é escolhido para passar para o conjunto de escolhidos para reprodução. Esse torneio é efetuado um número de vezes igual ao tamanho da população.

Na seleção por regime estacionário, da qual é exemplo o algoritmo GENITOR (*GENetic ImplemenTOR*) [35], a abordagem adotada é baseada na seleção por *ranking*. No entanto, o cruzamento dos indivíduos é efetuado um de cada vez, e isto significa que numa população coexistem várias gerações em simultâneo [36].

Dos quatro tipos de métodos de seleção apresentados, os métodos proporcionais são os mais lentos e a seleção por *ranking* e o torneio binário tem prestações semelhantes [35].

Para o caso particular do dimensionamento de um transformador de distribuição, um problema de minimização sujeito a várias restrições, é essencial que o sistema de seleção contemple o uso de restrições. Existe a possibilidade do uso de penalização do valor de aptidão para os casos

dos métodos proporcional e *ranking*. No entanto, essa implementação é complexa, implicando uma análise exaustiva dos valores de aptidão.

Para implementação de restrições, destaca-se o método de seleção por torneio. Com este método, para além da comparação de indivíduos em relação ao valor de aptidão, é possível também fazê-lo em relação ao cumprimento ou não cumprimento de restrições. O método de seleção por torneio com restrições foi implementado em [37] com bons resultados.

Assim, nesta dissertação será utilizado o método de seleção por torneio binário com restrições, respeitando o algoritmo da Figura 4.4, baseado em [37].

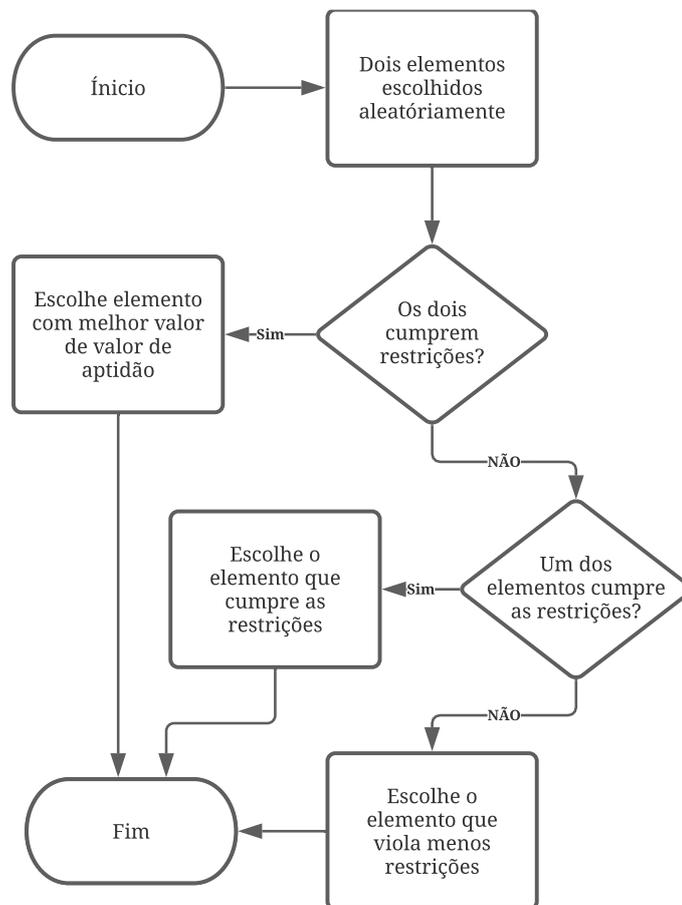


Figura 4.4 - Fluxograma do algoritmo de seleção binária por torneio com restrições

Para ilustração do funcionamento do método descrito, tome-se como exemplo a população da Figura 4.5, constituída por quatro elementos, e considere-se um problema de maximização sujeito a restrição nos genes 1 e 5, sendo que nesses alelos o valor deve ser sempre 1.

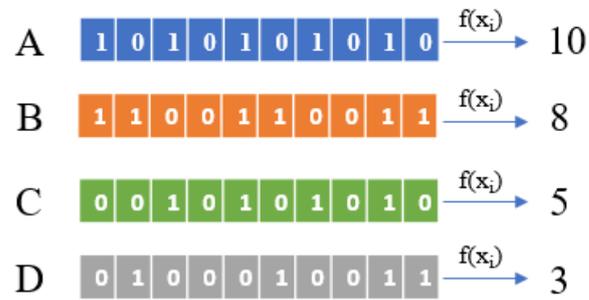


Figura 4.5 - População para exemplo de seleção por torneio

Com a população da Figura 4.5 constituída pelos indivíduos A, B, C e D, podem verificar-se os seguintes cenários:

1. São escolhidos aleatoriamente os elementos A e B da população; neste caso o elemento escolhido é o elemento A, pois ambos os elementos cumprem as restrições, mas o elemento A tem melhor valor de aptidão;
2. São escolhidos aleatoriamente os elementos B e C da população; neste caso o elemento escolhido é o elemento B, pois é o único que cumpre integralmente as restrições;
3. São escolhidos aleatoriamente os elementos C e D da população; neste caso o elemento escolhido é o elemento C, pois viola menos restrições (C viola restrição no gene 1 e D viola restrições nos genes 1 e 5);

4.3 – Crossover

A operação de *crossover* é a operação base dos algoritmos genéticos para a produção de novos cromossomas. A forma elementar de *crossover* é o *crossover* simples (ponto único), isto é, os cromossomas, aos pares, são divididos apenas uma vez e recombinaados. Existem mais formas de *crossover*, entre elas destacam-se o *crossover* multiponto e o *crossover* uniforme.

No *crossover* multiponto, um par de cromossomas (pais) é dividido em vários segmentos, e estes são recombinaados aleatoriamente em dois novos cromossomas (filhos). O *crossover* multiponto tem a vantagem de favorecer a procura num domínio mais alargado em vez da convergência para um valor singular [38].

No *crossover* uniforme é criada, de forma aleatória uma máscara (do mesmo tamanho dos cromossomas) que define se o gene numa determinada posição troca, ou não troca (1 ou 0). O *crossover* uniforme pode conciliar as vantagens do *crossover* ponto único e do *crossover* multiponto, tudo depende da capacidade da máscara. Uma máscara com ordens de troca em muitos genes comporta-se como o *crossover* multiponto, permitindo uma procura mais alargada. Uma máscara com apenas uma ordem de troca comporta-se como *crossover* ponto único, promovendo a convergência [39].

Nesta dissertação optou-se pela utilização do *crossover* de ponto único. Na Figura 4.6 pode ver-se um exemplo esquemático do *crossover* simples.

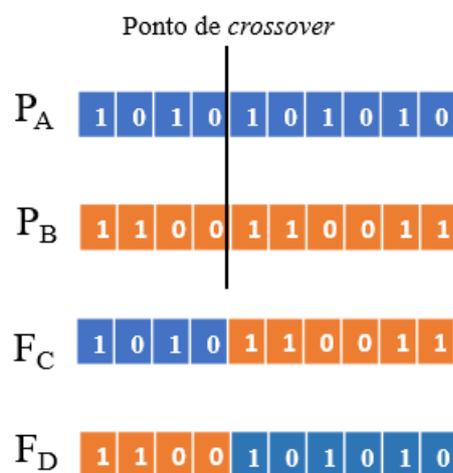


Figura 4.6 - Exemplo de *crossover* simples, pais (P) e filhos (F)

No exemplo da Figura 4.6 representam-se dois cromossomas “pais”, os cromossomas P_A e P_B . Estes cromossomas foram escolhidos aleatoriamente do conjunto de cromossomas selecionados (no caso desta dissertação, pelo método do torneio) para se cruzarem. O ponto de *crossover* é escolhido aleatoriamente e neste caso ocorre entre os genes 4 e 5. O resultado do *crossover* são os “filhos” representados pelos cromossomas F_C e F_D .

No algoritmo é definido um coeficiente de *crossover*. Este coeficiente define a percentagem de cromossomas sujeitos a *crossover* (i.e., a percentagem dos cromossomas selecionados).

4.4 – Mutação

A mutação é alteração aleatória de um alelo por outro alterando a estrutura genética do cromossoma. Nos algoritmos genéticos a mutação é a garantia que o algoritmo efetua a procura em todo o domínio das variáveis.

Na Figura 4.7 pode ver-se a representação da mutação num cromossoma binário.

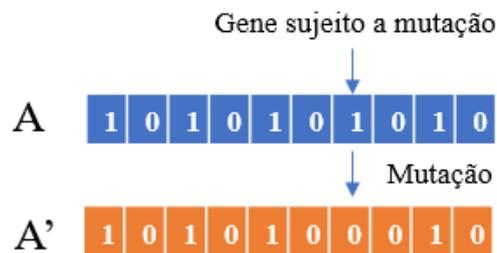


Figura 4.7 – Exemplo de mutação binária, original (A) e mutado (A')

Da população é escolhido aleatoriamente um cromossoma e desse cromossoma é escolhido aleatoriamente um gene. No caso do exemplo da Figura 4.7, tratando-se dum cromossoma binário, a mutação é apenas a alteração de 1 para 0, no entanto, quando se trata de variáveis não binárias a mutação pode ocorrer para todo o domínio da variável. Na Figura 4.8 pode ver-se um exemplo de mutação não binária.



Figura 4.8 - Exemplo de mutação não-binária, original (C) e mutado (C')

No exemplo da Figura 4.8, supondo que o gene escolhido aleatoriamente é o gene n.º 1, e que esse gene tem um domínio possível entre 1 e 100, o valor que esse gene toma devido à mutação pode ser qualquer valor dentro desse intervalo (neste caso 53, por exemplo), com uma distribuição de probabilidade uniforme no intervalo.

Para problemas mais complexos, é referido na literatura, que pode ser necessário aplicar um coeficiente de mutação mais elevado, para ter melhores soluções, tal como é demonstrado em [40].

4.5 – Mutação com efeito de compensação genética

Quando ocorre uma mutação na seleção natural, na maioria das vezes, a mutação faz com que o valor de aptidão do indivíduo mutado diminua. A seleção natural terá então a tendência a restaurar o fenótipo dos indivíduos ancestrais, anulando essa mutação. No entanto, tem-se observado um fenómeno na natureza que, quando existe uma mutação, por vezes o efeito dessa mutação é suavizado, não se expressando como seria esperado. Esse fenómeno foi batizado de compensação genética [41]. A compensação genética tem vindo a ser observada em vários estudos, Por exemplo, em peixes-zebra mutantes [42], uma mutação extrema num alelo dum gene não resulta numa diferença significativa da aptidão do indivíduo mutado.

No algoritmo genético a mutação é aleatória, com probabilidade igual em todo o domínio da variável mutada, o que torna a probabilidade de a mutação melhorar o valor de aptidão, baixa.

Algumas variações têm vindo a ser apresentadas com vista a melhorar o efeito da mutação, como por exemplo: direcionar mutação a indivíduos com valor de aptidão mais baixo [34]; diminuição da taxa de mutação com a convergência da população [34]; alteração do domínio

de mutação de forma não linear à medida que o problema vai convergindo em conjugação com a recombinação [43].

Assim, com vista a ter uma mutação mais eficaz e que seja inspirada no fenómeno natural conhecido como compensação genética, será implementada, testada e descrita a opção de mutação com efeito de compensação genética.

A partir do momento em que existe uma solução viável, o domínio onde pode ocorrer mutação torna-se limitado a uma gama em torno das características do indivíduo com o maior valor de aptidão conhecido. Por exemplo, numa variável cujo domínio possível pelas restrições é de 0 a 100, e a dado momento existe um indivíduo que tem o melhor valor de aptidão da população, sendo 15 o valor para essa variável, então, a partir desse momento a mutação passará a ser apenas possível dentro de uma gama de valores em torno de 15. Se for escolhida uma taxa de compensação genética de 10%, a mutação poderá ocorrer entre os valores de 13 e 17 em vez de ocorrer entre 0 e 100, com uma distribuição de probabilidade uniforme.

No entanto, esta variante da mutação, tem um custo: deixa de ser possível garantir que a solução não caia num mínimo/máximo local. E esse custo deve estar sempre presente no uso desta variante. Tal como referido anteriormente, esta opção será testada e comparada com outras opções de mutação.

4.6 – Elitismo

O elitismo nos algoritmos genéticos é uma forma de reinserção da geração anterior (ou geração dos “pais”) na geração atual (ou geração dos “filhos”). A utilização da operação de elitismo garante sempre que o valor de aptidão nunca piora a cada geração e melhora a rapidez de convergência do algoritmo [44].

Para que a função de elitismo funcione devidamente no caso de um problema com restrições, a simples troca dos indivíduos menos adaptados da geração dos “filhos” pelos indivíduos mais adaptados da geração dos “pais” não é possível. Assim foi necessário adotar-se o algoritmo representado no fluxograma da Figura 4.9.

Com o algoritmo da Figura 4.9 só são escolhidos os melhores dos “pais” que cumpram as restrições e só são substituídos os “filhos” que não cumpram as restrições ou apresentem piores valores de aptidão, relativamente aos “pais”.

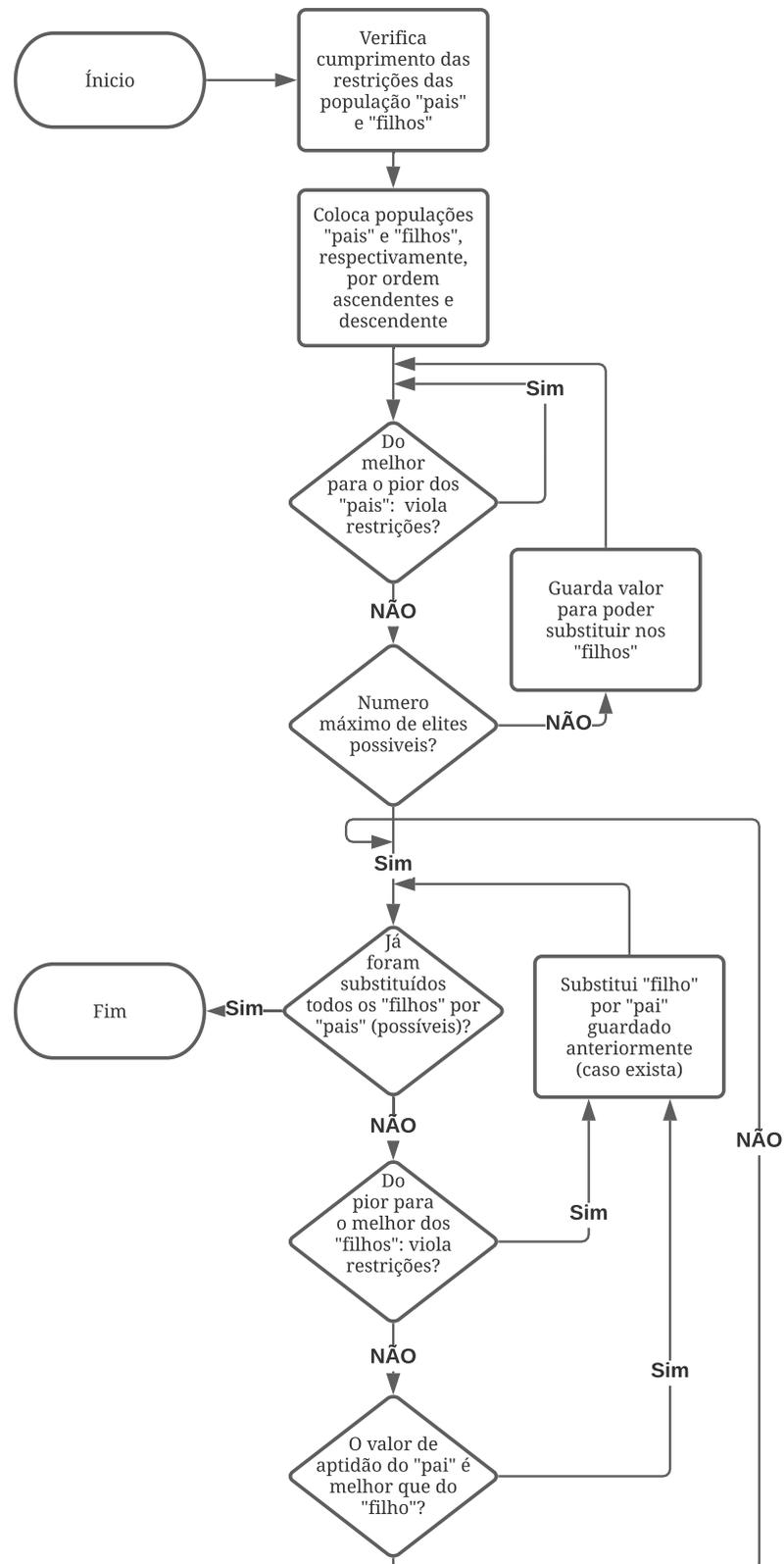


Figura 4.9 - Fluxograma da função elitismo com restrições

Na Figura 4.10 apresenta-se um exemplo do funcionamento do algoritmo da função elitismo, neste caso sem restrições, por simplicidade, com uma taxa de elitismo a 50%. Ao colocar-se a população dos “filhos” com os valores de variável de aptidão ordenados do melhor para o pior, os dois últimos valores seriam 6 e 4. E ao colocar-se a população dos “pais” do pior para o melhor, e comparando dois últimos cromossomas de cada: entre 10 e 4 e entre 8 e 6, os indivíduos pertencentes aos “pais” apresentam maior valor de aptidão que os “filhos”, sendo, portanto, estes últimos substituídos.

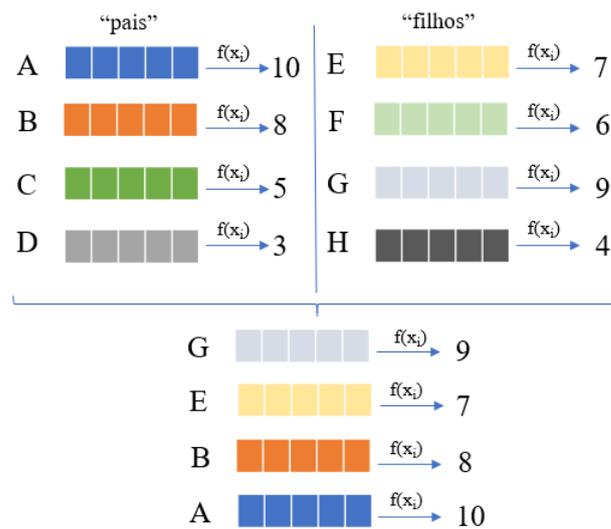


Figura 4.10 - Exemplo de elitismo, sem restrições, coeficiente 50%

4.7 – Critérios de paragem

Tratando-se o algoritmo genético um processo estocástico, é difícil definir um critério de convergência. A prática habitual é parar o algoritmo após algumas gerações sem que haja alteração do valor de aptidão do melhor indivíduo, a chamada paragem por *stall* (do inglês: paragem ou causa para não haver progresso).

Nesta dissertação consideram-se dois critérios de paragem, o critério de paragem por *stall* e o critério de paragem por limite de gerações (limite máximo para que algoritmo não corra eternamente). Note-se que quando se diz que apenas será utilizado o *stall* e o limite de gerações, isso refere-se apenas à parte “genética”, ou seja, na progressão genética da população. Adiante, numa versão do algoritmo genético, será apresentada uma condição de paragem por variação do melhor valor entre corridas. Essa condição será utilizada no caso do algoritmo genético com intervalo adaptativo, pois havendo alteração do intervalo do domínio de procura entre corridas,

a forma de definir quando o algoritmo pára, é quando deixa de haver melhoria do valor de aptidão.

Na Figura 4.11 pode ver-se o comportamento de duas corridas de um algoritmo genético que minimiza uma determinada função objetivo.

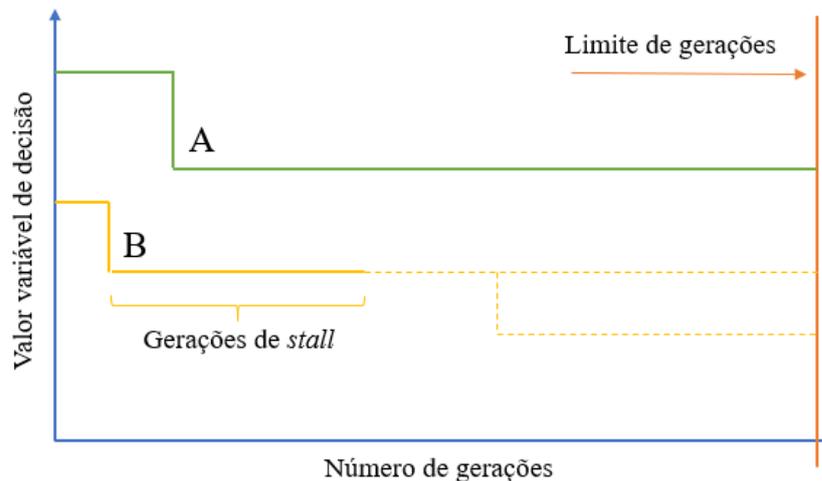


Figura 4.11 - Esquema de funcionamento dos critérios de paragem

Como pode ver-se na Figura 4.11 representam-se duas corridas, a corrida A e corrida B. Na corrida A apenas é imposto o critério de paragem do limite máximo de gerações, ou seja, atingido número máximo de gerações o algoritmo termina e dá por concluída a corrida, quer haja alterações no valor de aptidão ou outros critérios de paragem. Nesta dissertação aplica-se a regra empírica para o número máximo de gerações da equação (4.1), em que N_{var} é o número de variáveis de entrada.

$$Ger_{max} = 100 \times N_{var} \quad (4.1)$$

Na corrida B é aplicado o critério de paragem por *stall*, ou seja, depois de um determinado número de gerações sem alterações no valor de aptidão do individuo mais apto, o algoritmo termina. Dada a incerteza devido à aleatoriedade do algoritmo genético, ao parar-se o algoritmo por *stall* deixa de saber-se o que poderia ocorrer nas gerações seguintes. Por um lado, o valor de aptidão podia melhorar imediatamente após a paragem, ou podia continuar até ao limite máximo de gerações.

A aplicação do critério de paragem por *stall* acaba por ser um compromisso entre esperar por evolução do valor de aptidão e o tempo de processamento.

4.8 – Fluxogramas das versões do algoritmo genético

Neste subcapítulo são apresentados, em cada secção, o fluxograma de funcionamento para cada variante testada do algoritmo genético, nomeadamente, a versão base, a versão que inclui a compensação genética na mutação e a versão com intervalo adaptativo.

4.8.1 – Versão base

Na Figura 4.12 pode ver-se o fluxograma de funcionamento do algoritmo genético na sua versão base. De realçar que quando é escolhido o melhor valor de aptidão, esse valor escolhido é o melhor possível, isto é: é o melhor valor que cumpre todas as restrições impostas.

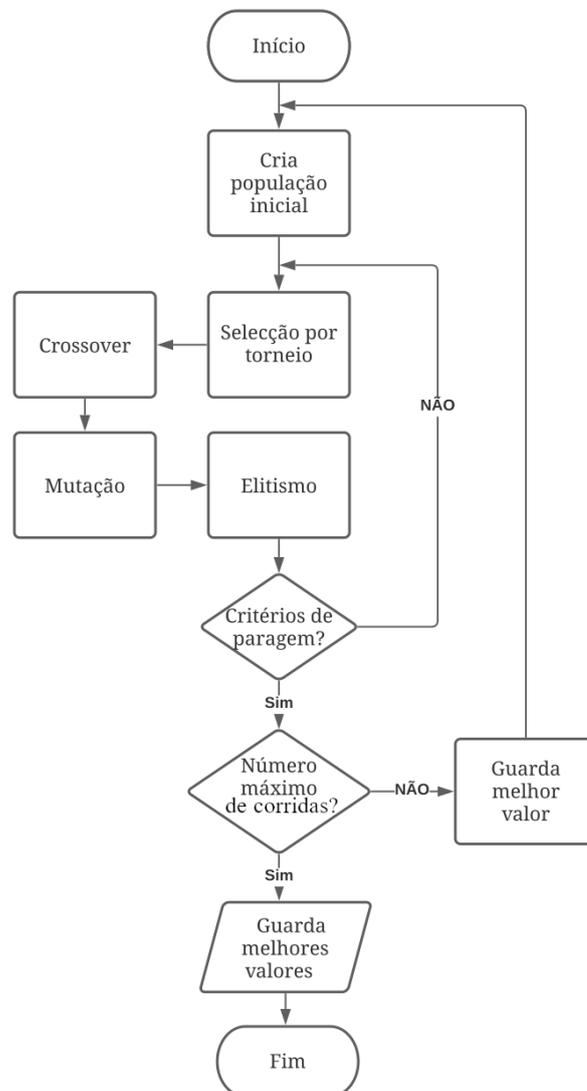


Figura 4.12 - Fluxograma de funcionamento do algoritmo genético (versão base)

4.8.2 – Versão mutação com compensação genética

Na versão que incorpora a função de compensação genética, o modo de funcionamento é idêntico à versão base representada na Figura 4.12 em que a única alteração ocorre na função mutação.

A função mutação recebe um novo coeficiente, denominado de coeficiente de compensação genética, que assume um valor entre 0 e 1, criando um alelo com fenótipo mutante de acordo com a equação (4.2), em que x_n^{melhor} é o melhor valor do alelo n , $C_{compgen}$ é o coeficiente de compensação genética e $RAND$ um valor aleatório entre 0 e 1.

$$x_n^{mutante} = x_n^{melhor} \times [1 + C_{compgen} \times (2 \times RAND - 1)] \quad (4.2)$$

4.8.3 – Versão com intervalo adaptativo

Na versão com intervalo adaptativo, o domínio dos indivíduos da população (i.e., o limite mínimo e máximo que cada variável) é ajustado de corrida em corrida, e o modo de funcionamento encontra-se representado na Figura 4.13.

Nesta versão incorporam-se dois valores, um chamado de coeficiente de aproximação, que toma um valor entre 0 e 1 e um valor para a condição de paragem entre corridas, este último pode tomar qualquer valor positivo, dependendo muito do objeto da minimização.

O valor do coeficiente de aproximação pode ser dado pela equação (4.3) em que a é qualquer valor entre 0 e 1, i é o número da corrida e b qualquer número real positivo. Assim é possível ir ajustando o valor do coeficiente de aproximação à medida que o número de corridas vai crescendo. No caso particular de se querer um valor constante, o parâmetro b é simplesmente zero.

$$c_{apr} = a \times i^{-b} \quad (4.3)$$

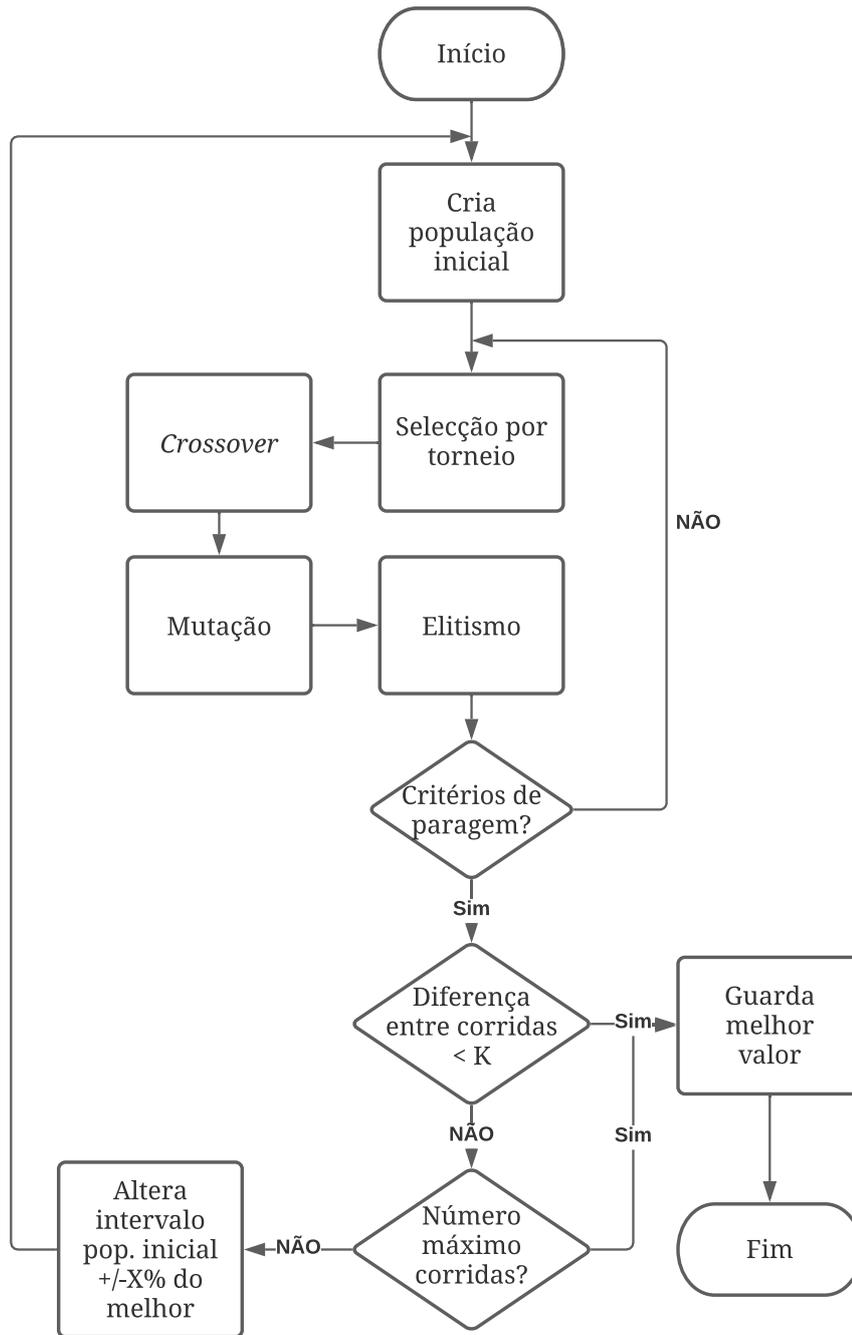


Figura 4.13 – Fluxograma de funcionamento do algoritmo com intervalo adaptativo

O valor dos limites do novo intervalo de procura é então dado pela equação (4.4) em que c_{apr} é o coeficiente de aproximação e $x_{i,melhor}$ é o melhor valor da corrida i .

$$X_i = (1 \pm c_{apr}) \times x_{i,melhor} \quad (4.4)$$

4.9 – Validação do algoritmo com recurso à função de Rastrigin

Para validar o algoritmo nas suas três versões descritas nos subcapítulos 4.10-4.12, optou-se pela utilização da função de Rastrigin. Esta função foi inicialmente proposta em 1974 por Rastrigin, é uma função não-convexa muito utilizada como teste de performance em algoritmos de otimização [45]. Encontrar o mínimo desta função é bastante difícil devido à existência de um elevado número de mínimos locais. A função de Rastrigin pode escrever-se de acordo com a equação (4.5) em que, para o caso testado, o A tem o valor de 10 e n o valor de 2.

$$f(x) = An + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - A \cos(2\pi x_i)] \quad (4.5)$$

As três versões do algoritmo serão testadas em dois intervalos distintos com parâmetros de entrada do algoritmo genético típicos, e iguais em todos os testes. Os intervalos de teste serão $x_i \in [-100; 100]$ e $x_i \in [4,7; 204,7]$ com, respetivamente, valor mínimo analítico de $f(x)=0$ com $x_i=0$ e valor mínimo analítico de $f(x)=49,75$ com $x_i=4,975$.

Os vários coeficientes dos parâmetros de entrada do algoritmo genético apresentam-se na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros de entrada algoritmo genético (validação)

Parâmetro	Valor
População	50
Elitismo	5%
Crossover	80%
Mutação	50%
Critério de paragem	Stall (50 gerações)
Número de corridas	113

Optou-se pelo uso de um coeficiente de mutação alto como proposto em [40].

Sendo os algoritmos genéticos um método estocástico, uma forma de avaliar os resultados obtidos é através da distribuição de probabilidades. Nesta dissertação optou-se pela avaliação dos resultados através da distribuição normal (ou distribuição de Gauss) e da distribuição *gamma*. A distribuição normal pode definir-se por dois parâmetros, o valor médio, μ , e o desvio padrão, σ . O desvio padrão indica a percentagem de valores que estão dentro do valor do desvio ou múltiplos do desvio, por exemplo, em $\pm\sigma$ estão 68,3% dos valores e em $\pm 2\sigma$ estão 95,4%

dos valores. A distribuição normal é utilizada quando a probabilidade é simétrica em relação a um valor. Quando o valor expectável é um mínimo, utiliza-se a distribuição *gamma*. A distribuição *gamma* é uma distribuição de dois parâmetros, um parâmetro de forma, k , e um parâmetro de escala, θ . A distribuição *gamma* é utilizada para modelar valores positivos e assimétricos, algo que ocorre para os valores de aptidão no caso duma minimização (para valores positivos).

4.10 – Aplicação da versão base

Na Figura 4.14 estão representados os resultados da versão base do algoritmo genético no intervalo $[-100; 100]$ para 113 corridas. A coordenada x_1 tem um valor médio de 0,062 e um desvio padrão de 1,008 e a coordenada x_2 tem um valor médio de -0,121 e um desvio padrão de 1,050. O valor de $f(x)$ tem um valor médio de 4,254 e um desvio padrão de 3,557 com parâmetros de distribuição *gamma* de 1,430 e 2,975, respetivamente, k e θ .

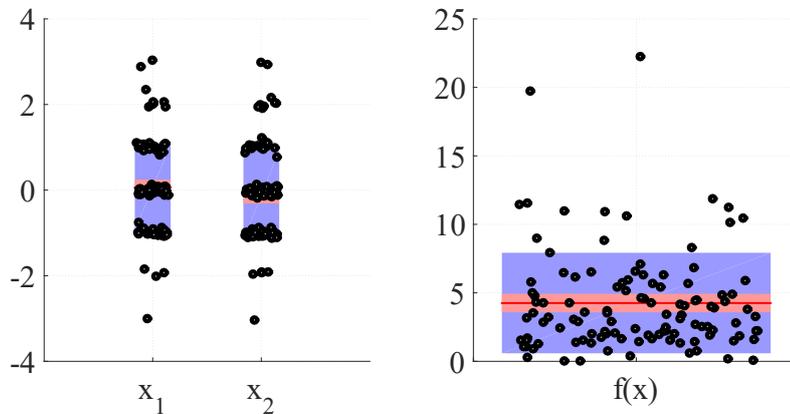


Figura 4.14 – Resultados teste versão base, intervalo $[-100; 100]$

Na Figura 4.15 estão representados os resultados da versão base do algoritmo genético no intervalo $[4,7; 204,7]$ para 113 corridas. A coordenada x_1 tem um valor médio de 5,231 e um desvio padrão de 0,534 e a coordenada x_2 tem um valor médio de 5,325 e um desvio padrão de 0,657. O valor de $f(x)$ tem um valor médio de 65,177 com um desvio padrão de 12,655 com parâmetros de distribuição *gamma* de 26,526 e 2,457, respetivamente, k e θ .

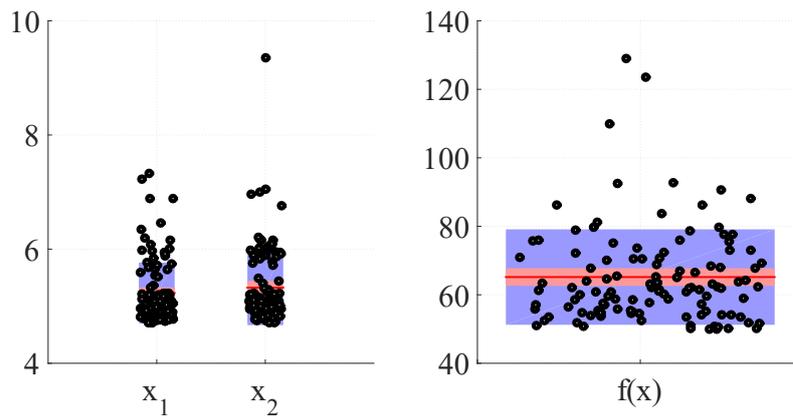


Figura 4.15 – Resultados teste versão base, intervalo [4,7; 204,7]

No teste efetuado, em ambos os intervalos, parece existir convergência. Os valores teóricos das variáveis x_1 e x_2 estão dentro do desvio padrão. Já o caso do valor de aptidão, apesar de existir uma aproximação ao valor teórico, a diferença entre valor teórico e valor obtido com recurso ao algoritmo genético é relativamente maior. No entanto, dado que não foi efetuada nenhuma afinação de parâmetros, os resultados indicam uma convergência do algoritmo, ainda que com sucesso relativo devido à queda em mínimos locais, mais visível na Figura 4.14 para x_1 e x_2 .

4.11 – Aplicação da versão com compensação genética

Para o teste de validação do algoritmo na versão com compensação genética, optou-se pela utilização de um coeficiente de compensação genética de 1.

Na Figura 4.16 estão representados os resultados da versão do algoritmo incorporando a função mutação com a variante de compensação genética no intervalo $[-100; 100]$. A coordenada x_1 tem um valor médio de $-2,734 \times 10^{-12}$ e um desvio padrão de $2,148 \times 10^{-10}$ e a coordenada x_2 tem um valor médio de $-2,896 \times 10^{-12}$ e um desvio padrão de $7,024 \times 10^{-11}$. O valor de $f(x)$ tem um valor médio de $5,021 \times 10^{-14}$ e um desvio padrão de $7,937 \times 10^{-14}$ com parâmetros de distribuição *gamma* de 0,400 e $1,255 \times 10^{-13}$, respetivamente, k e θ .

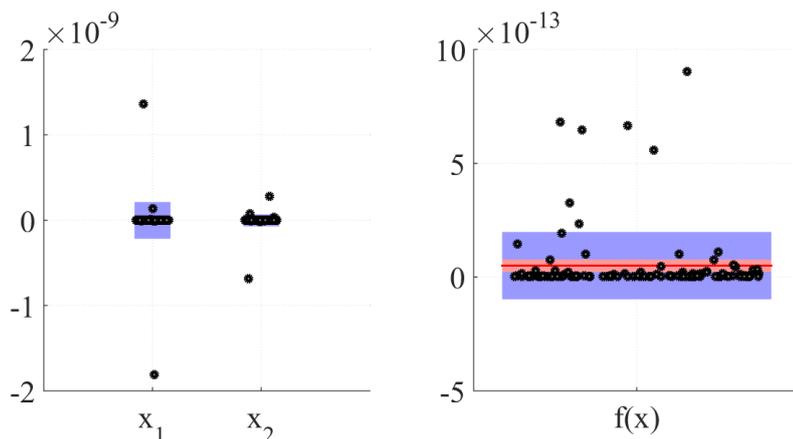


Figura 4.16 - Resultados teste compensação genética, intervalo [-100; 100]

Na Figura 4.17 estão representados os resultados da versão do algoritmo incorporando a função mutação com a variante de compensação genética no intervalo $[4,7; 204,7]$. A coordenada x_1 tem um valor médio de 4,977 e um desvio padrão de 0,015 e a coordenada x_2 tem um valor médio de 4,975 e um desvio padrão de 0,019. O valor de $f(x)$ tem um valor médio de 49,867 com um desvio padrão de 0,187 com parâmetros de distribuição *gamma* de 71293,1 e $6,995 \times 10^{-4}$, respectivamente, k e θ .

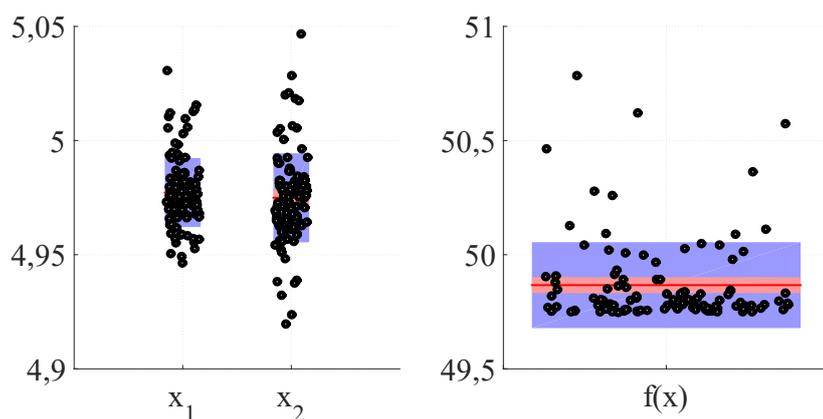


Figura 4.17 - Resultados teste compensação genética, intervalo $[4,7; 204,7]$

No teste efetuado existe convergência em ambos os intervalos. Os valores teóricos das variáveis x_1 e x_2 estão dentro do desvio padrão. Também nos valores de aptidão existe convergência com

os valores teóricos. Observa-se uma melhor convergência com a utilização da função da mutação com compensação genética, para os mesmos parâmetros de teste. Das 113 corridas efetuadas para cada intervalo, em nenhum caso encontrou um mínimo local em vez do mínimo global do intervalo considerado.

4.12 – Aplicação da versão com inclusão de intervalo adaptativo

Para o teste do algoritmo incorporando o intervalo adaptativo, considerou-se um coeficiente de aproximação dado pela equação (4.3) com valores de a e b , respetivamente, 0,5 e 1 e uma condição de paragem entre iterações de 1×10^{-5} .

No algoritmo genético com intervalo adaptativo o processo é diferente. Ao invés do algoritmo percorrer cegamente as 113 corridas, todas com os mesmos intervalos iniciais, o algoritmo vai adaptando o intervalo consoante o melhor valor possível e pára quando a diferença entre corridas é menor que um determinado valor, como pode ver-se no exemplo da Figura 4.18.

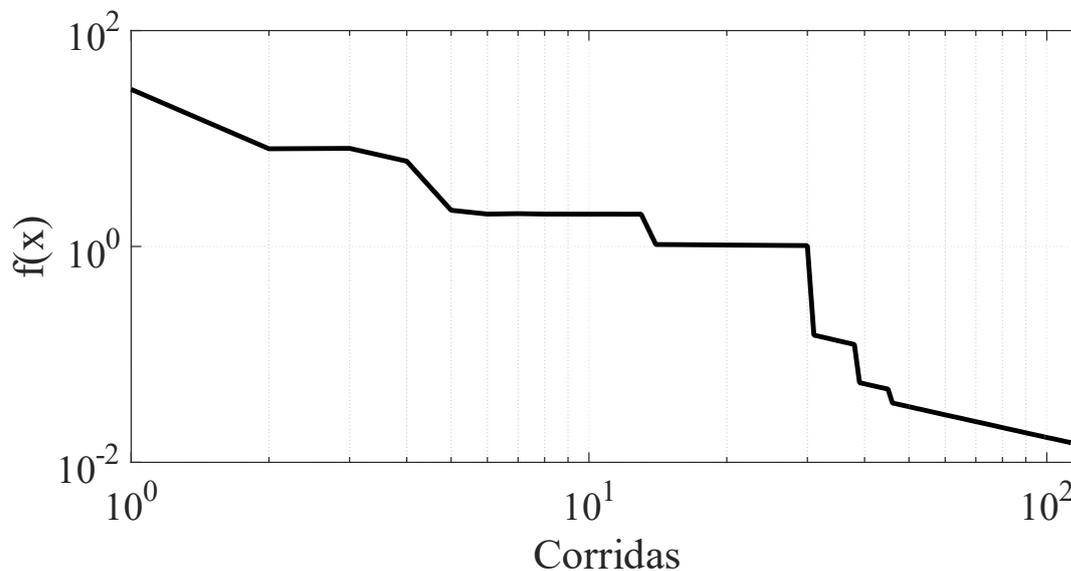


Figura 4.18 – Exemplo de convergência com intervalo adaptativo (inicial: $[-100, 100]$)

Na Figura 4.19 estão representados os resultados da versão do algoritmo incorporando intervalo adaptativo no intervalo $[-100; 100]$. A coordenada x_1 tem um valor médio de 0,009 e um desvio padrão de 0,282 e a coordenada x_2 tem um valor médio de 0,026 e um desvio padrão de 0,248.

O valor de $f(x)$ tem um valor médio de 0,167 e um desvio padrão de 0,303 com parâmetros de distribuição *gamma* de 0,301 e 0,554, respectivamente, k e θ .

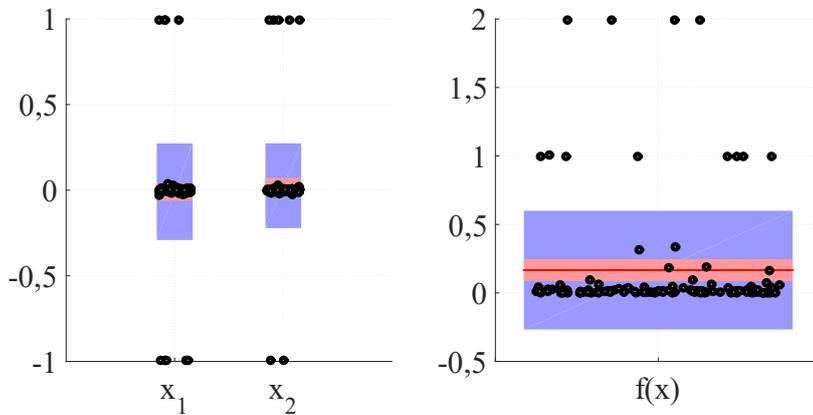


Figura 4.19 – Resultados teste intervalo adaptativo, intervalo [-100; 100]

Na Figura 4.20 estão representados os resultados da versão do algoritmo incorporando intervalo adaptativo no intervalo $[4,7; 204,7]$. A coordenada x_1 tem um valor médio de 4,974 e um desvio padrão de 0,001 e a coordenada x_2 tem um valor médio de 4,975 e um desvio padrão de 0,001. O valor de $f(x)$ tem um valor médio de 49,748 e um desvio padrão de $6,877 \times 10^{-4}$ com parâmetros de distribuição *gamma* de $5,233 \times 10^9$ e $9,507 \times 10^{-9}$, respectivamente, k e θ .

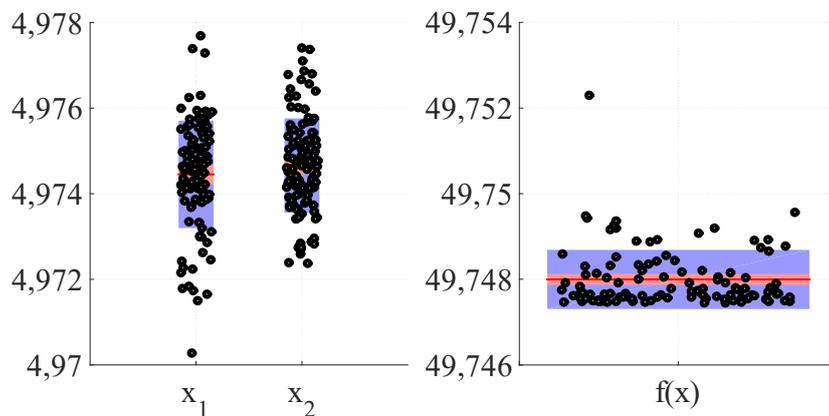


Figura 4.20 – Resultados teste intervalo adaptativo, intervalo [4,7; 204,7]

No teste efetuado, em ambos os intervalos, existe convergência. Os valores teóricos das variáveis x_1 e x_2 estão dentro do desvio padrão. Também nos valores de aptidão existe convergência com os valores teóricos. Observa-se que o resultado da utilização do intervalo adaptativo, com as mesmas condições de entrada, não é tão bom quanto a compensação genética, mas é melhor que a versão base para o intervalo $[-100; 100]$. Neste intervalo, existem resultados que encontraram um mínimo local em vez do mínimo global, convergindo para um mínimo adjacente ao mínimo global, como pode ver-se na Figura 4.19 para x_1 e x_2 .

Já no intervalo $[4,7; 204,7]$ a versão adaptativa tem os melhores resultados.

Apesar dos diversos resultados, existe uma certa convergência em todas as versões, podendo, o sucesso da convergência para os valores teóricos, ser apenas uma questão de afinação dos parâmetros de entrada do algoritmo.

4.13 – Implementação do AG para dimensionamento do transformador

Para aplicar o algoritmo genético ao dimensionamento do transformador é necessário definir os parâmetros que o compõem. Na Tabela 4.2 apresenta-se a atribuição dos genes do algoritmo genético às variáveis de dimensionamento do transformador, sendo de realçar que estas variáveis serão elas também sujeitas a restrição.

Tabela 4.2 – Genes do AG aplicado ao dimensionamento do transformador

Variável (Tabela 2.7)	$turns_{LV}$	D	FD_{max}	G	t_{LV}	d_{HV}
Gene	1	2	3	4	5	6

As variáveis de entrada são introduzidas na função objetivo. No caso do problema de dimensionamento de um transformador de distribuição, a função objetivo é todo o conjunto de equações apresentadas no Capítulo 2 .

$$[CTM, TOC, dvar] = f(x_n) \quad (4.6)$$

A equação (4.6) é representativa da aplicação da função objetivo. Da implementação efetuada, resultam três parâmetros: o primeiro, CTM , é o custo de construção do transformador, o valor de aptidão, da equação (2.178). Também pode ser considerado um valor de aptidão alternativo,

o *TOC*, que é o custo total de posse do transformador, da equação (2.181). O parâmetro de saída *dvar* é o conjunto de restrições do problema. Essas restrições estão enumeradas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Restrições para o dimensionamento do transformador

Restrição	Equação	Descrição
1	(2.183)	Igualdade, tensão induzida
2	(2.184)	Igualdade, rácio de espiras
3	(2.185)	Perdas em vazio [W]
4	(2.186)	Perdas em carga, 20 kV [W]
5	(2.187)	Perdas em carga, 6,6 kV [W]
6	(2.188)	Perdas totais, 20 kV [W]
7	(2.189)	Perdas totais, 6,6 kV [W]
8	(2.190)	Transferência de calor (diferença) [W]
9	(2.191)	Impedância de CC
10	(2.192)	Aumento de temperatura [°C]
11	(2.193)	Tensão induzida BT [V]
12	(2.194)	Tensão induzida MT [V]
13	(2.195)	Tensão de impulso BT [V]
14	(2.196)	Tensão de impulso MT [V]
15	(2.197)	Altura mínima da cuba [m]

Para implementação das restrições, as mesmas foram colocadas num cromossoma dedicado às restrições, cada um associado ao cromossoma das variáveis de entrada e igualmente ao respetivo valor de aptidão. Para restrições condicionais, a implementação das restrições é direta, como por exemplo, no caso da restrição número 3, as perdas em vazio, estas terão que ter um valor inferior a um valor pré-estabelecido. O mesmo se aplica no caso de restrições por imposição de mínimo. Já no caso das restrições de igualdade, optou-se por subtrair o valor dum lado da igualdade pelo valor do outro lado da igualdade e arredondar. Caso o valor seja zero a restrição é cumprida, caso contrário, a restrição não é cumprida. São restrições de igualdade as restrições 1 e 2.

Uma vez apresentado e validado o processo meta-heurístico que se pretende utilizar e apresentada a forma como se pretende aplicar ao dimensionamento do transformador, pode implementar-se o dimensionamento via algoritmo genético.

Capítulo 5

Aplicação do algoritmo genético ao dimensionamento do transformador

5.1 – Dimensionamento convencional

Para verificar-se o comportamento de técnicas meta-heurísticas é essencial ter-se uma técnica que sirva de elemento de comparação, comprovada, que ofereça resultados fiáveis. Em [5], para além das equações do dimensionamento apresentadas no Capítulo 2, é também apresentada a técnica convencional utilizada para este tipo de problemas. Trata-se de uma técnica de força bruta (*brute-force search*) que consiste numa procura minuciosa de todos os candidatos possíveis e verificação se cumprem os requisitos construtivos impostos. Na Figura 5.1 pode ver-se o diagrama de funcionamento do dimensionamento convencional.

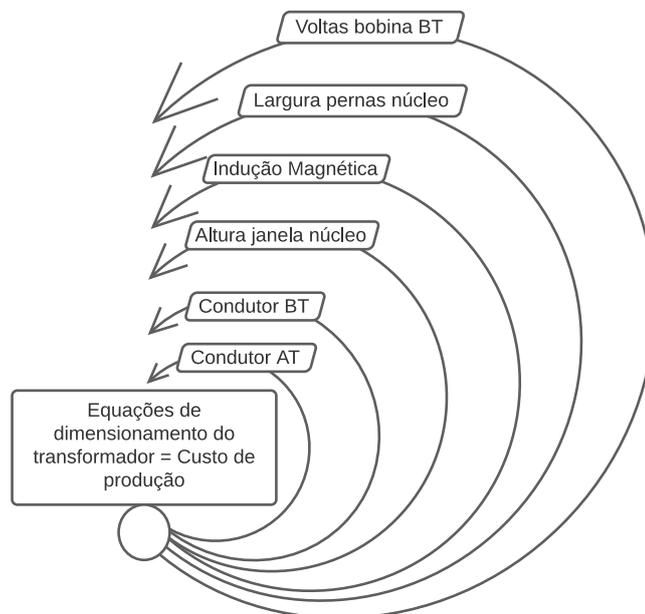


Figura 5.1 – Diagrama do dimensionamento convencional

A implementação dum algoritmo de dimensionamento tradicional consiste em implementar seis ciclos imbricados com as seis variáveis de entrada: número de espiras do enrolamento de BT, largura das pernas do núcleo, indução magnética, altura janela do núcleo, espessura da fita condutora do enrolamento de BT e diâmetro do fio condutor do enrolamento de MT. Calculado o resultado do valor do custo de construção, é feita uma verificação das restrições impostas na construção do transformador, sendo neste caso, quinze restrições. Dado que se trata de ciclos imbricados, facilmente o número de cálculos a fazer sobe a valores de milhares ou milhões. Por exemplo, considerando 6 valores de espiras da bobina de BT, 20 valores de largura de pernas do núcleo, 20 valores de indução magnética, 20 valores de altura da janela do núcleo, 10 valores de secção de BT e 10 valores de secção de MT, resultam num total de 4 milhões e 800 mil cálculos. Assim, com este método é necessário limitar o número de valores para cada variável, bem como o alcance do domínio de cada variável. À medida que se vão fazendo corridas, é alterado o número de valores para cada variável bem como o domínio.

Uma vez que não existia este tipo de dimensionamento para o exemplo apresentado em [5], será feito o dimensionamento recorrendo a esta técnica de força bruta.

Numa primeira corrida, optou-se por começar com um espectro relativamente largo das variáveis de entrada e com um intervalo de discretização relativamente grande, de maneira a identificar e depois estreitar a zona da procura. Sucessivamente, nas corridas seguintes, o intervalo vai ficando mais estreito e o intervalo de discretização mais pequeno, como pode ver-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Variáveis de entrada das várias corridas

Corrida	Intervalo	Variável de entrada					
		Espiras BT	Largura núcleo [m]	Indução magnética [T]	Altura janela núcleo [m]	Espessura condutor BT [m]	Diâmetro condutor MT [m]
1	Mínimo	1	0	1,1	0	$4,00 \times 10^{-4}$	0
	Máximo	30	0,5	1,7	0,5	$1,00 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$
	Passo	1	0,1	0,3	0,1	$3,00 \times 10^{-4}$	$5,00 \times 10^{-4}$
2	Mínimo	14	0,15	1,5	0,25	$4,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-3}$
	Máximo	18	0,35	1,7	0,35	$8,00 \times 10^{-9}$	$2,00 \times 10^{-3}$
	Passo	1	0,01	0,1	0,01	$5,00 \times 10^{-5}$	$5,00 \times 10^{-4}$
3	Mínimo	14	0,245	1,6	0,26	$6,00 \times 10^{-4}$	$1,50 \times 10^{-3}$
	Máximo	16	0,27	1,7	0,28	$1,00 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$
	Passo	1	0,005	0,01	0,005	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-4}$
4	Mínimo	14	0,244	1,69	0,26	$7,00 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-3}$
	Máximo	16	0,25	1,7	0,268	$8,50 \times 10^{-4}$	$1,85 \times 10^{-3}$
	Passo	1	0,001	0,01	0,001	$1,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-5}$

Com as variáveis de entrada da Tabela 5.1 tem-se, para cada corrida, o melhor resultado para o custo de construção do transformador e respetivo tempo de processamento, como pode ver-se na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Melhores resultados e tempo de processamento de cada corrida

Corrida	1	2	3	4
Valor [€]	14.672	14.275	14.026	13.945
Tempo processamento [s]	114	236	47	149

Na Tabela 5.3 tem-se, para cada iteração, as variáveis de entrada do dimensionamento do transformador, para o melhor resultado de cada corrida. É clara a convergência dos valores para cada variável mantendo-se sempre dentro do intervalo das restrições mínimas e máxima.

Tabela 5.3 - Características do transformador (variáveis de entrada)

Corrida	Espiras BT	Largura núcleo [m]	Indução magnética [T]	Altura janela núcleo [m]	Espessura condutor BT [m]	Diâmetro condutor MT [m]
1	17	0,2	1,7	0,3	$7,00 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-3}$
2	15	0,26	1,7	0,27	$6,50 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-3}$
3	15	0,25	1,7	0,265	$8,00 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-3}$
4	15	0,248	1,7	0,264	$7,30 \times 10^{-4}$	$1,80 \times 10^{-3}$
Mínimo	1	>0	1,1	>0	$4,00 \times 10^{-4}$	>0
Máximo	$+\infty$	$+\infty$	1,7	$+\infty$	$1,00 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$

Assim, tal como as variáveis de entrada, também as restantes restrições de dimensionamento são verificadas na totalidade, como pode ver-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Restrições de dimensionamento

Restrição	i	Corrida				Mínimo	Máximo
		1	2	3	4		
Igualdade, tensão induzida	1	0	0	0	0	0	
Igualdade, rácio de espiras	2	0	0	0	0	0	
Perdas em vazio [W]	3	1038	1064	1054	1052	0	1265
Perdas em carga 1 [W]	4	9067	9222	9292	9543	0	10235
Perdas em carga 2 [W]	5	9337	9460	9585	9828	0	10235
Perdas totais 1 [W]	6	10106	10286	10346	10595	0	11000
Perdas totais 2 [W]	7	10375	10523	10639	10880	0	11000
Impedância CC	8	0,065	0,056	0,056	0,056	0,054	0,066
Transf. de calor (diferença) [W]	9	1482	86	199	1	0	$+\infty$
Aumento temperatura [°C]	10	50	46	47	47	0	60
Tensão induzida BT [V]	11	54	62	62	62	0	6000
Tensão induzida MT [V]	12	5380	5173	5543	5543	0	6000
Tensão impulso BT [V]	13	1176	1333	1333	1333	0	23500
Tensão impulso MT [V]	14	17696	17017	18232	18232	0	23500
Altura da cuba [m]	15	0,836	0,782	0,784	0,784	0	1

Neste subcapítulo, é apresentado o melhor valor encontrado para o custo de construção do transformador e os valores das variáveis que resultam nesse design, utilizando um método que verifica todas as possíveis soluções. Este método requer alguma sensibilidade e bastante tentativa e erro, pois facilmente o número de cálculos ronda os milhões. Os valores obtidos servem como base de comparação para os valores resultantes do dimensionamento, que se

apresentam nos subcapítulos seguintes recorrendo a algoritmos genéticos. Sendo estes valores utilizados apenas como referência, optou-se por não efetuar uma quinta corrida.

5.2 – Dimensionamento com algoritmo genético

Neste subcapítulo apresenta-se o dimensionamento recorrendo ao algoritmo genético. Nos próximos subcapítulos apresenta-se uma análise à alteração dos diversos parâmetros do algoritmo genético. Começa-se pelo estudo do efeito do tamanho da população na performance do algoritmo para encontrar uma solução.

De seguida faz-se o estudo do efeito dos parâmetros de *crossover*, mutação, elitismo e do critério de paragem por *stall*. Para finalizar a análise de sensibilidade, faz-se o estudo ao número de corridas já com os parâmetros de população, mutação, *crossover*, elitismo e *stall* ajustados. A análise de sensibilidade dos parâmetros do algoritmo é realizada para a versão base do algoritmo genético. Depois da análise de sensibilidade, são aplicadas as restantes versões do algoritmo, nomeadamente a compensação genética e o intervalo adaptativo, cujos resultados são comparados considerando os mesmos parâmetros de entrada.

5.2.1 – População

Para o estudo do efeito da população na performance do algoritmo genético no processo de otimização do dimensionamento do transformador, foram efetuados testes com os dados de entrada para os parâmetros do algoritmo genético apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo da população

Parâmetro	Valor
População	10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000
Elitismo	5%
Crossover	80%
Mutação	0,5%
Critério de paragem	Stall (50 gerações)
Número de corridas	113

Na Figura 5.2 pode ver-se a relação entre o número de indivíduos na população inicial e o custo mínimo e médio de construção do transformador, bem como a relação entre o número de indivíduos e o tempo de processamento.

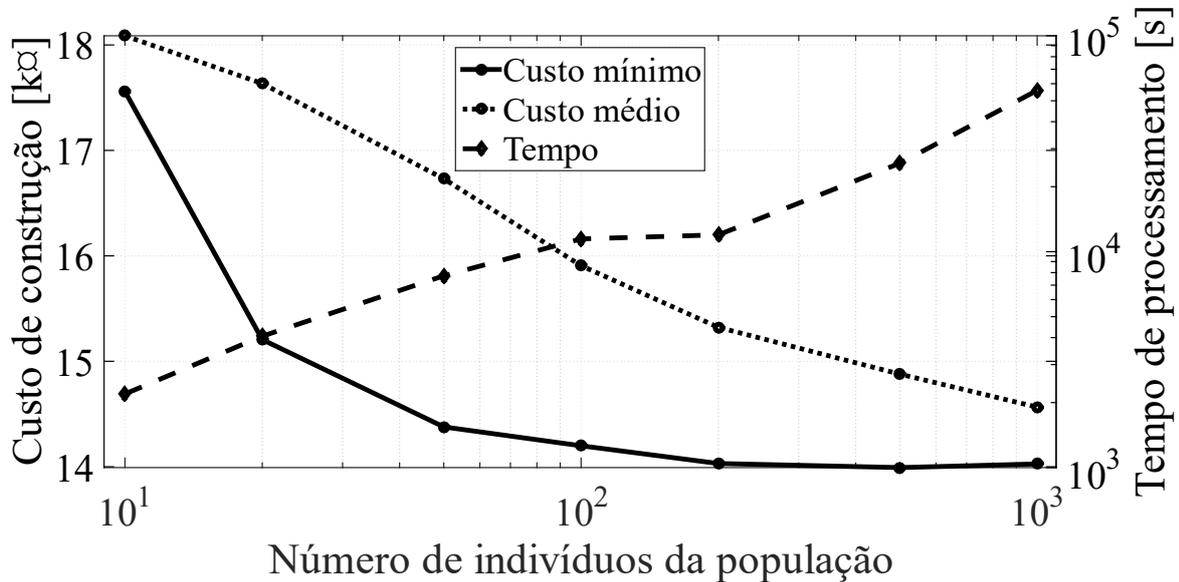


Figura 5.2 - Efeito do tamanho da população no custo e tempo

Da Figura 5.2 conclui-se que, em relação ao custo mínimo do transformador, o valor estagna perto dos 14 k€ quando é utilizada uma população de 200 indivíduos, não havendo vantagem no aumento de população. No que toca ao custo médio, parece haver um ponto de inflexão entre os 100 e os 200 indivíduos. Em relação ao tempo de processamento (para todos os ensaios foi utilizado o mesmo computador com processador Intel i7 com 2.2 GHz de velocidade), parece haver um aumento praticamente linear com o aumento da população, nota-se também ainda que o tempo de processamento entre os 100 e 200 indivíduos é idêntico.

Na Figura 5.3 pode ver-se o efeito do tamanho da população no início de solução admissível, isto é, em que geração aparece o primeiro indivíduo da população cujos parâmetros estão dentro das restrições, e o efeito da população no sucesso do algoritmo, ou seja, a percentagem de corridas em que foi encontrado um indivíduo viável.

Para uma população de 50 indivíduos tem-se um sucesso de aproximadamente 50% e a geração de início de solução admissível é, em média, perto da 200.^a geração. O valor do sucesso do algoritmo aumenta com o aumento da população até praticamente estagnar com uma população de 200 indivíduos (96.5% de sucesso). Por outro lado, à medida que se aumenta a população,

uma solução viável vai aparecendo cada vez mais cedo. Mais uma vez, perto dos 200 indivíduos começa a verificar-se uma estagnação (em média aparece uma solução viável na 34.^a geração).

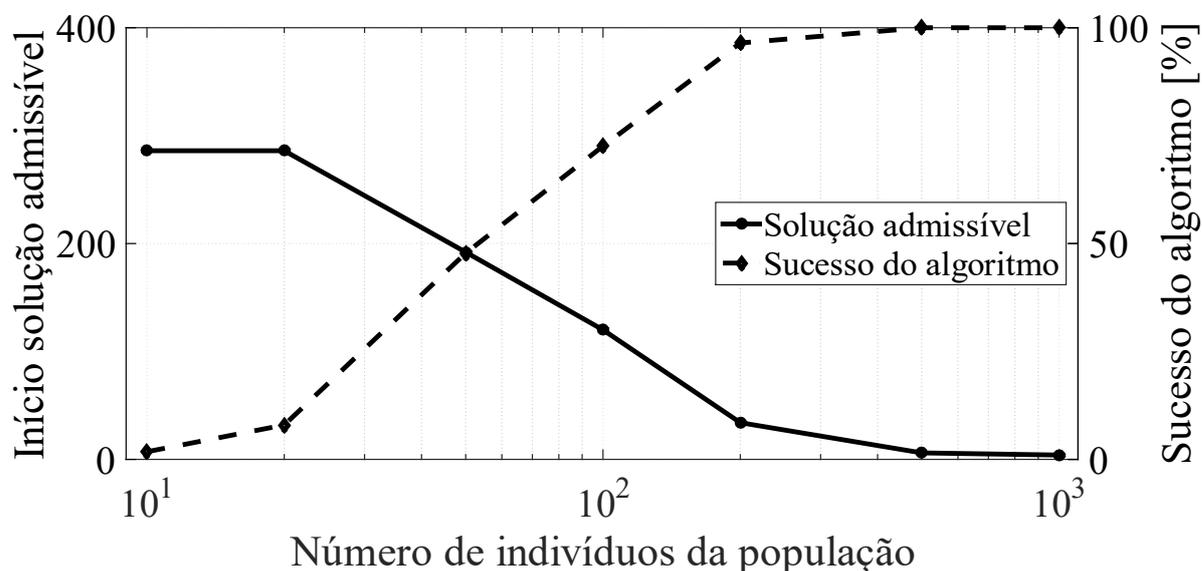


Figura 5.3 – Efeito do tamanho da população na solução e sucesso

Assim, pode assumir-se como um bom compromisso a escolha de uma população de 200 indivíduos nos ensaios subsequentes.

5.2.2 – Crossover

Para o estudo do efeito do *crossover* na performance do algoritmo genético no processo de otimização do dimensionamento do transformador, foram efetuados testes com os dados de entrada para os parâmetros do algoritmo genético da Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo do *crossover*

Parâmetro	Valor
População	200
<i>Crossover</i>	1%, 8%, 40%, 80% e 100%
Mutação	0,5%
Elitismo	5%
Critério de paragem	<i>Stall</i> (50 gerações)
Número de corridas	113

Na Figura 5.4 pode ver-se a relação entre o coeficiente de crossover e o custo mínimo e médio de construção do transformador, bem como entre o coeficiente de *crossover* e o tempo de processamento.

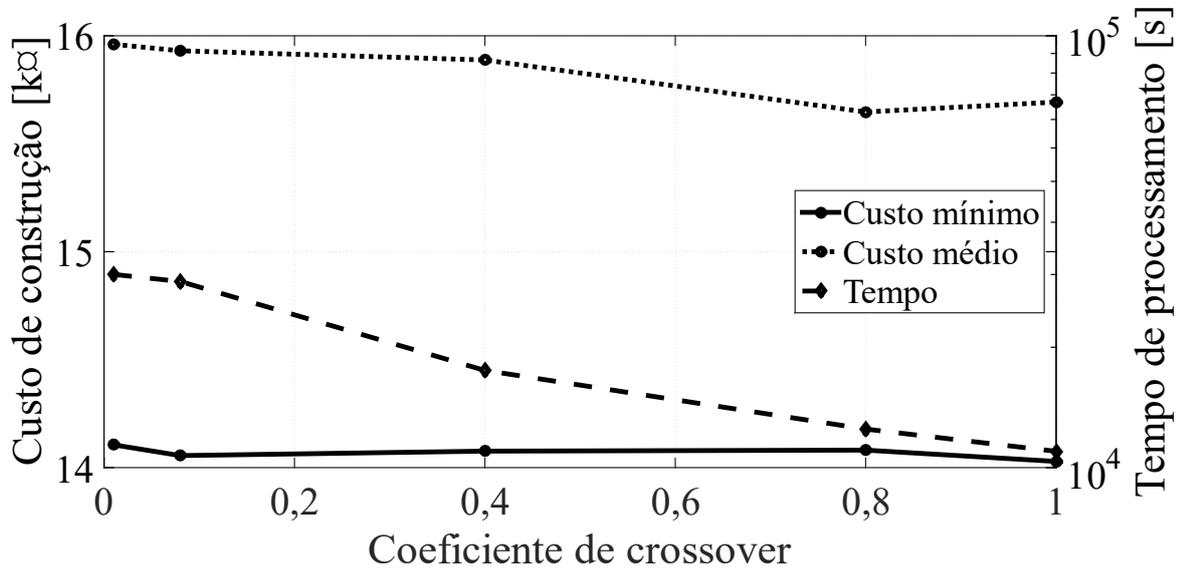


Figura 5.4 – Efeito do coeficiente de *crossover* no custo de construção e no tempo de processamento

Da Figura 5.4 pode concluir-se que tanto o custo médio como o custo mínimo são ligeiramente alterados com o aumento do coeficiente de *crossover*, no entanto o tempo de processamento altera-se bastante com o aumento do coeficiente. Para um coeficiente de *crossover* de 0,4 tem-se um tempo de processamento de 4,7 horas enquanto para um coeficiente de 1 tem-se 3,1 horas.

Na Figura 5.5 pode ver-se o efeito do coeficiente de *crossover* tanto na geração média de início de solução admissível como na percentagem de sucesso do algoritmo em encontrar uma solução viável. Apesar de para todos os coeficientes de *crossover* o sucesso do algoritmo estar acima de 60%, ocorre um aumento significativo do sucesso para coeficientes acima de 0,4. O mesmo acontece com a geração de início de solução admissível.

Como tal, dadas as vantagens tanto no tempo de processamento como no sucesso do algoritmo, o uso de um coeficiente de 1 parece ser uma escolha adequada tendo sido o valor selecionado na implementação do algoritmo genético.

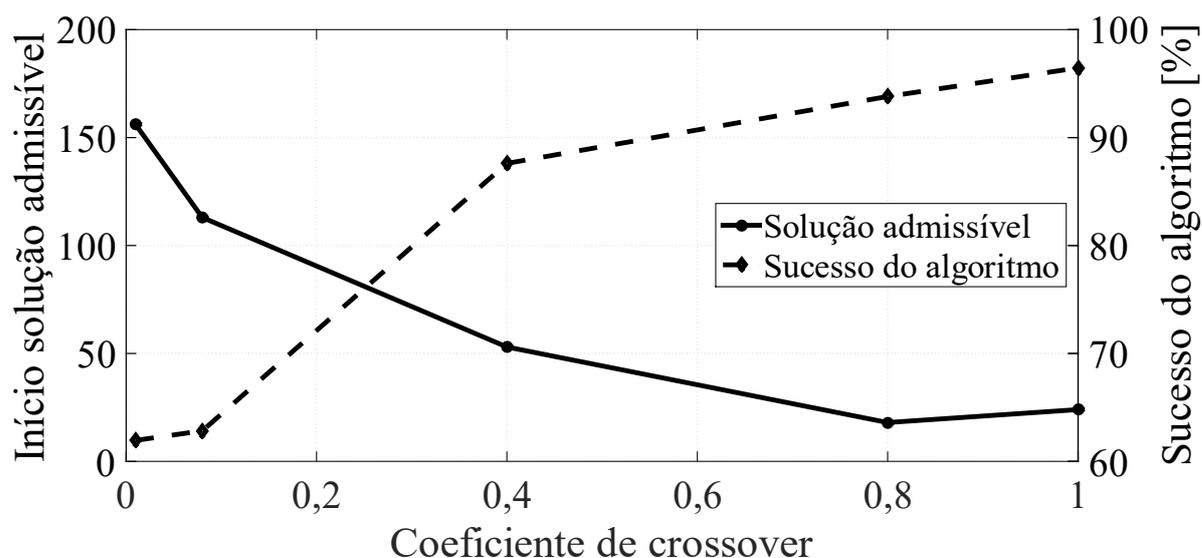


Figura 5.5 – Efeito do coeficiente de *crossover* na solução e sucesso

5.2.3 – Mutação

Para o estudo do efeito da mutação na performance do algoritmo genético no processo de otimização do dimensionamento do transformador, foram efetuados testes com os dados de entrada para os parâmetros do algoritmo genético apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo da mutação

Parâmetro	Valor
População	200
<i>Crossover</i>	100%
Mutação	0,005%, 0,05%, 0,5%, 1%, 5%, 50%, 80%
Elitismo	5%
Critério de paragem	<i>Stall</i> (50 gerações)
Número de corridas	113

Na Figura 5.6 pode ver-se a evolução dos custos mínimo e médio em função do coeficiente de mutação, bem como o tempo de processamento em função do coeficiente de mutação. Observa-se uma convergência em torno de 14 k α para o custo mínimo a partir dos 0,5% e verifica-se que à medida que o coeficiente de mutação aumenta o valor do custo médio aproxima-se do valor mínimo, o que demonstra bem a importância do coeficiente de mutação na procura do valor ótimo. Valores melhores, tanto mínimo como médios, aparecem com uma ligeira desvantagem

no que diz respeito ao tempo de processamento, o qual aumenta com o aumento da taxa de mutação.

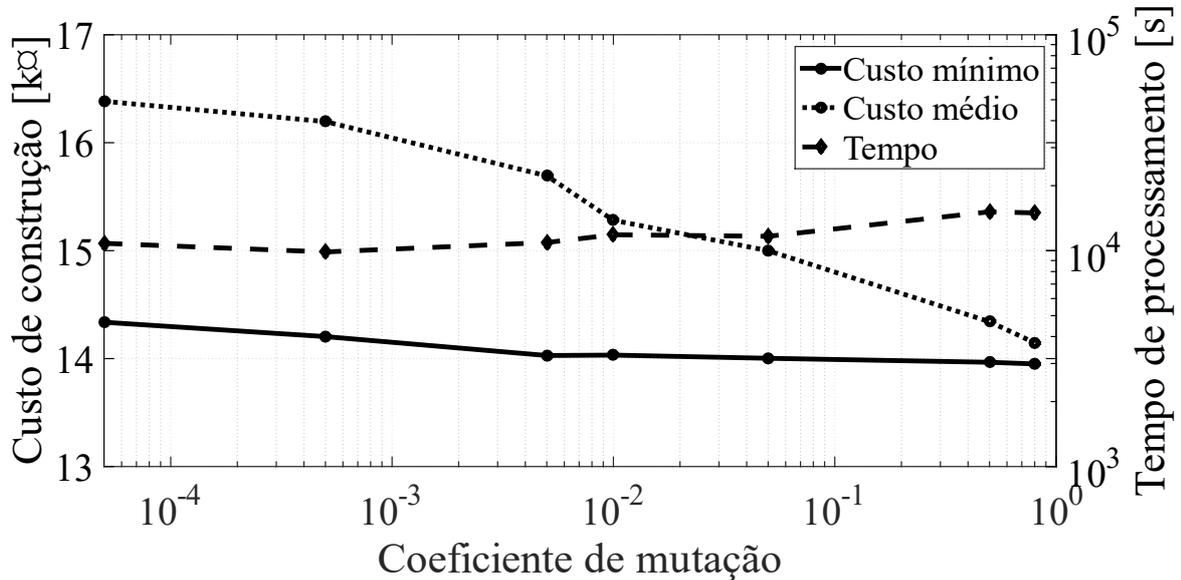


Figura 5.6 – Efeito do coeficiente de mutação no custo e tempo

Na Figura 5.7 pode ver-se o efeito do coeficiente de mutação, tanto na geração média de início de solução admissível como no sucesso do algoritmo. Em relação ao início da solução admissível, existem diferenças, mas a relação entre o coeficiente de mutação e o início da solução não parece ser muito robusta, na medida em que os valores oscilam entre 10 e 25 o que, tendo em conta o comportamento estocástico do algoritmo, não é muito relevante. Já em relação ao sucesso do algoritmo há um aumento consistente com o aumento da taxa de mutação. Parece um bom compromisso uma taxa de mutação de 1%, e será esse o valor considerado no estudo do efeito do elitismo.

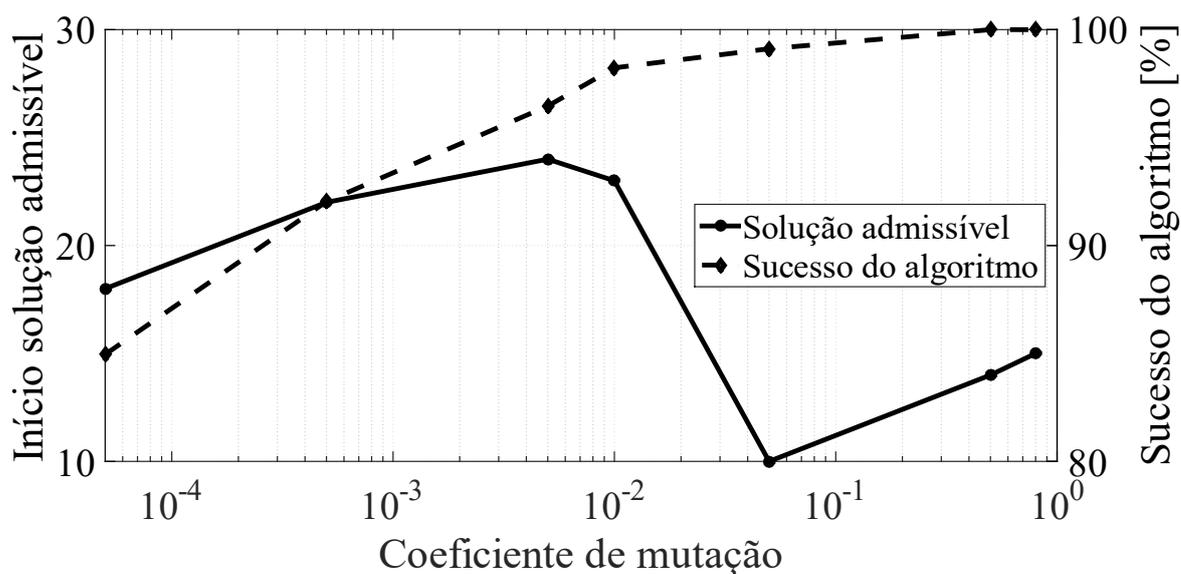


Figura 5.7 - Efeito do coeficiente de mutação na solução e sucesso do AG

5.2.4 – Elitismo

Para o estudo do efeito do elitismo na performance do algoritmo genético no processo de otimização do dimensionamento do transformador, foram efetuados testes com os dados de entrada para os parâmetros do algoritmo genético apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo do elitismo

Parâmetro	Valor
População	200
Crossover	100%
Mutação	1%
Elitismo	0%, 0,5% ,1%, 5%, 10%, 50%
Critério de paragem	Stall (50 gerações)
Número de corridas	113

Da Figura 5.8 pode ver-se que parece não haver diferenças muito significativas nos três parâmetros testados para diferentes coeficientes de elitismo. No entanto, parece haver uma maior convergência do valor mínimo para valores entre 1% e 5%.

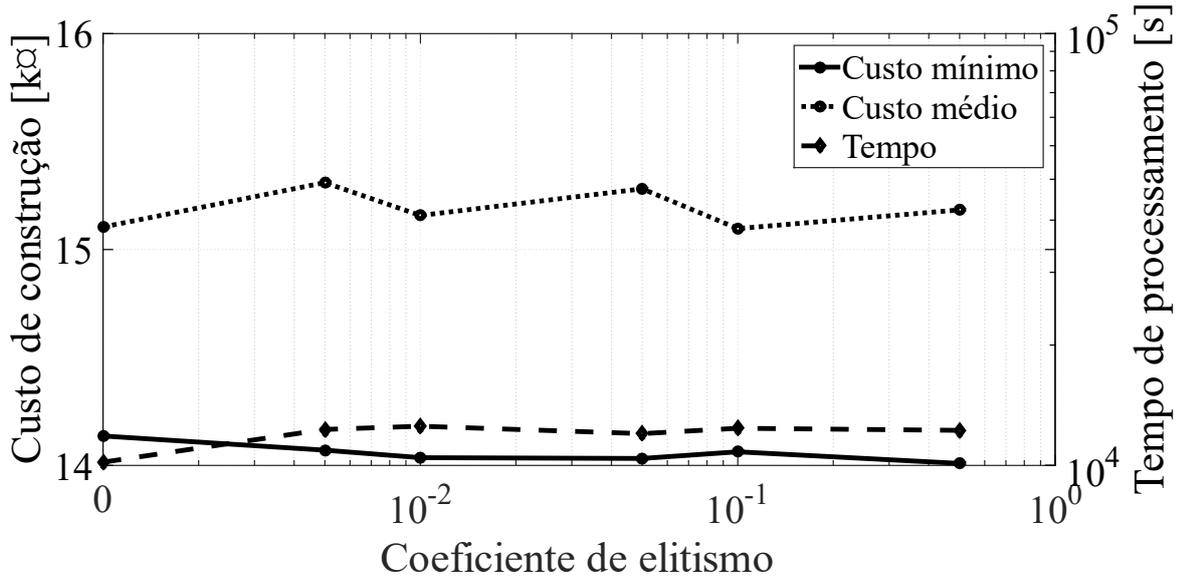


Figura 5.8 - Efeito do coeficiente de elitismo no custo e tempo

Tal como para os custos de construção e tempo de processamento, também para o sucesso do algoritmo e início de solução admissível do algoritmo, parece não haver diferenças muito significativas, como se pode observar na Figura 5.9. No entanto, os valores de coeficiente de elitismo de 1% e 5% parecem ter um efeito de maior sucesso do algoritmo genético na procura duma solução viável. Assim, o valor de coeficiente de elitismo escolhido para as análises seguintes será de 5%.

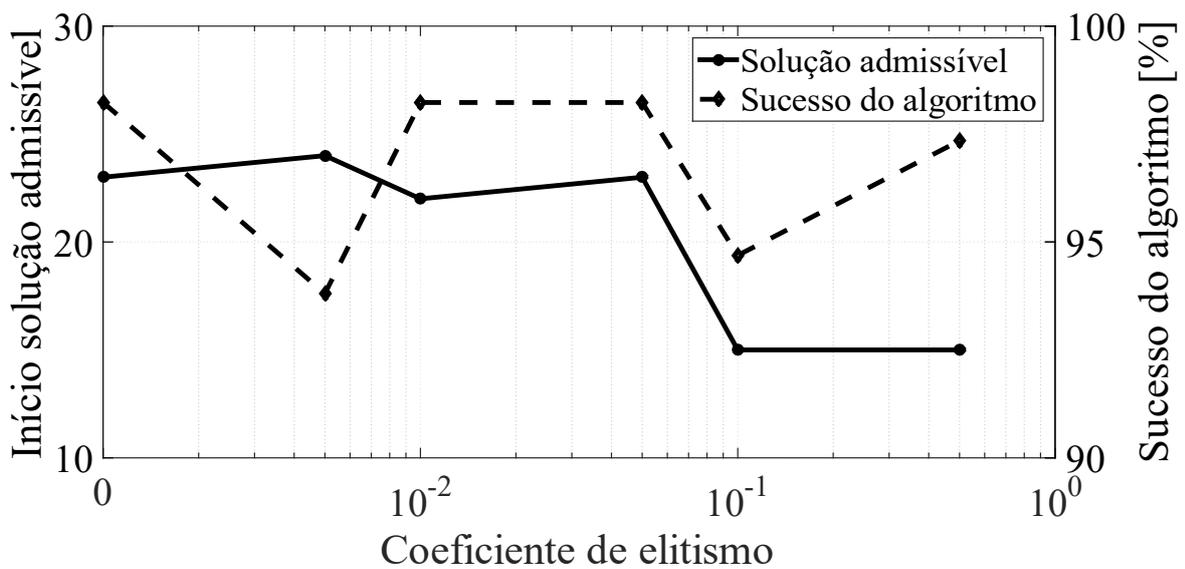


Figura 5.9 - Efeito do coeficiente de elitismo na solução e sucesso

5.2.5 – Critério de paragem - *stall*

Para o estudo do efeito do *stall* (critério de paragem) na performance do algoritmo genético no processo de otimização do dimensionamento do transformador, foram efetuados testes com os dados de entrada para os parâmetros do algoritmo genético apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Parâmetros de entrada algoritmo genético, estudo do *stall*

Parâmetro	Valor
População	200
<i>Crossover</i>	100%
Mutação	1%
Elitismo	5%
Critério de paragem	<i>Stall</i> (10, 20, 50, 100, 200 gerações)
Número de corridas	113

Como pode ver-se na Figura 5.10 a influencia do número de gerações de *stall* no custo mínimo não é muito visível, havendo diferenças pouco significativas. Já no custo médio parece haver uma convergência para valores de *stall* entre 50 e 100 gerações. Verifica-se que o tempo de processamento cresce linearmente com o número de gerações de *stall*.

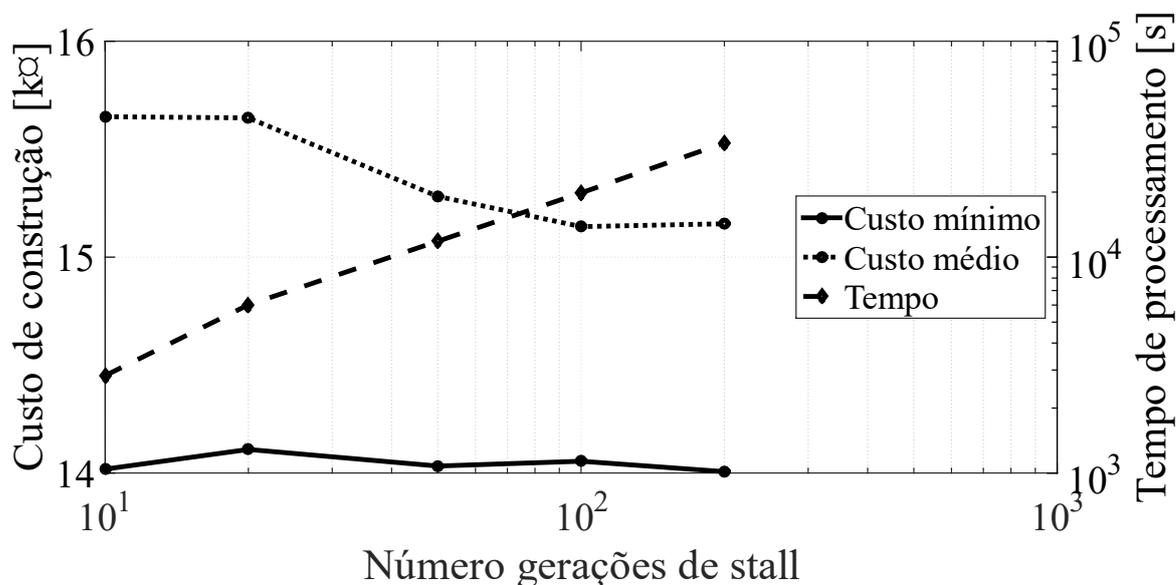


Figura 5.10 - Efeito das gerações de *stall* no custo e tempo

Na Figura 5.11 pode ver-se o efeito do número de geração de *stall* no início da solução admissível e no sucesso do algoritmo genético. No caso do início de solução admissível, o parâmetro de *stall* não tem qualquer efeito, assim pode ver-se que existe um ruído inerente neste parâmetro devido a tratar-se dum processo estocástico. O *stall* pode afetar o sucesso, no entanto as diferenças são mínimas, sendo o sucesso na generalidade muito alto.

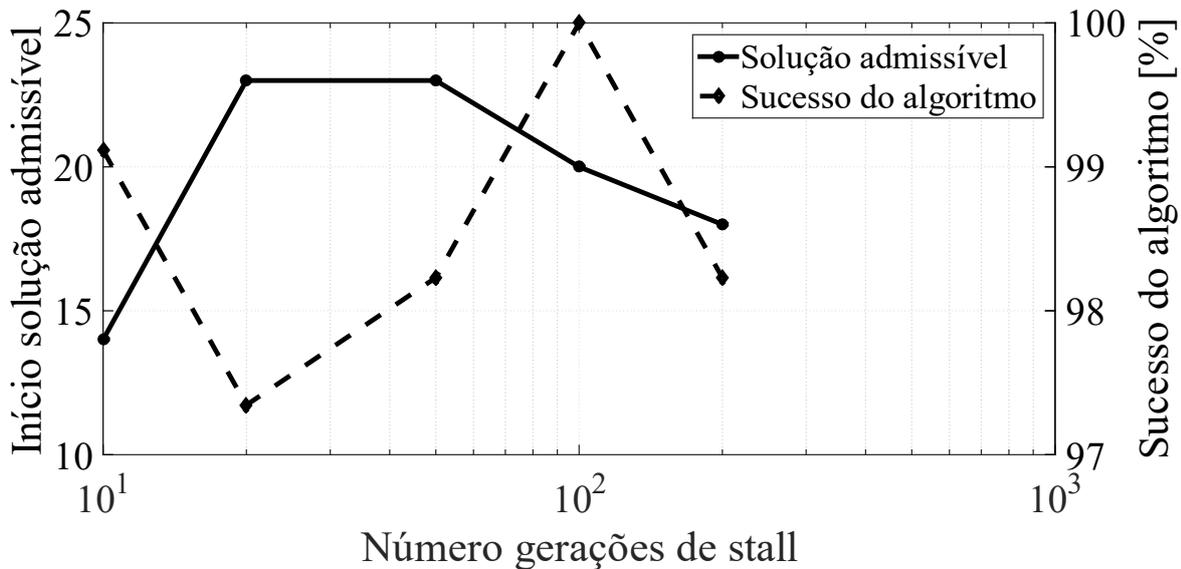


Figura 5.11 - Efeito das gerações de *stall* na solução e sucesso

Assim, a escolha do número de gerações de *stall* parece tratar-se dum equilíbrio entre esperar que a solução encontre convergência e o tempo de processamento. De acordo com os resultados obtidos, um valor de *stall* de 50 gerações parece ser adequado, pois já existe bastante convergência (valor médio do custo) e o tempo de processamento não aumenta.

5.2.6 – Número de corridas

Para o estudo do efeito do número de corridas na performance do algoritmo genético no processo de otimização do dimensionamento do transformador, foram efetuados testes com os dados de entrada para os parâmetros do algoritmo genético apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Parâmetro de entrada do algoritmo genético, estudo das corridas

Parâmetros	Valor
População	200
Crossover	100%
Mutação	1%
Elitismo	5%
Critério de paragem	Stall (50 gerações)
Número de corridas	3, 13, 23, 43, 113, 213

Na Figura 5.12 pode ver-se o efeito do número de corridas a que o algoritmo genético é sujeito no custo de construção mínimo e médio bem como no tempo de processamento. Pode ver-se uma clara convergência tanto do custo mínimo como do custo médio a partir das 43 corridas. O tempo aumenta linearmente com o aumento de iterações.

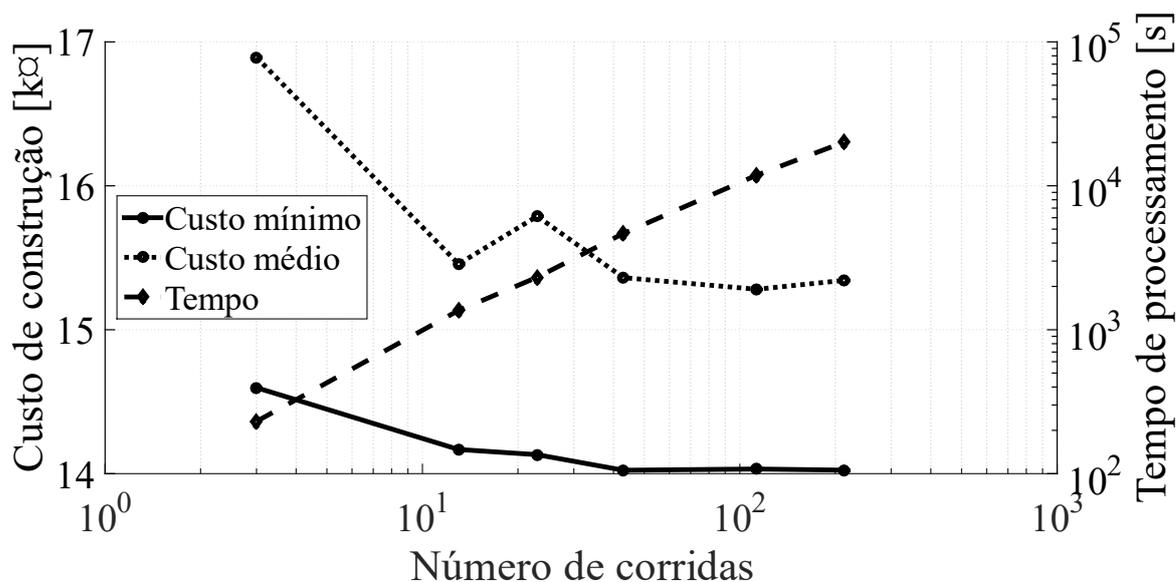


Figura 5.12 - Efeito do número de corridas no custo e tempo

Na Figura 5.13 pode ver-se que a variação tanto no início de solução admissível como no sucesso do algoritmo é baixa. A solução admissível está sempre entre as 20-25 gerações e o sucesso do algoritmo entre os 95% e 100%, sendo que estas variações são perfeitamente enquadradas na natureza estocástica do algoritmo.

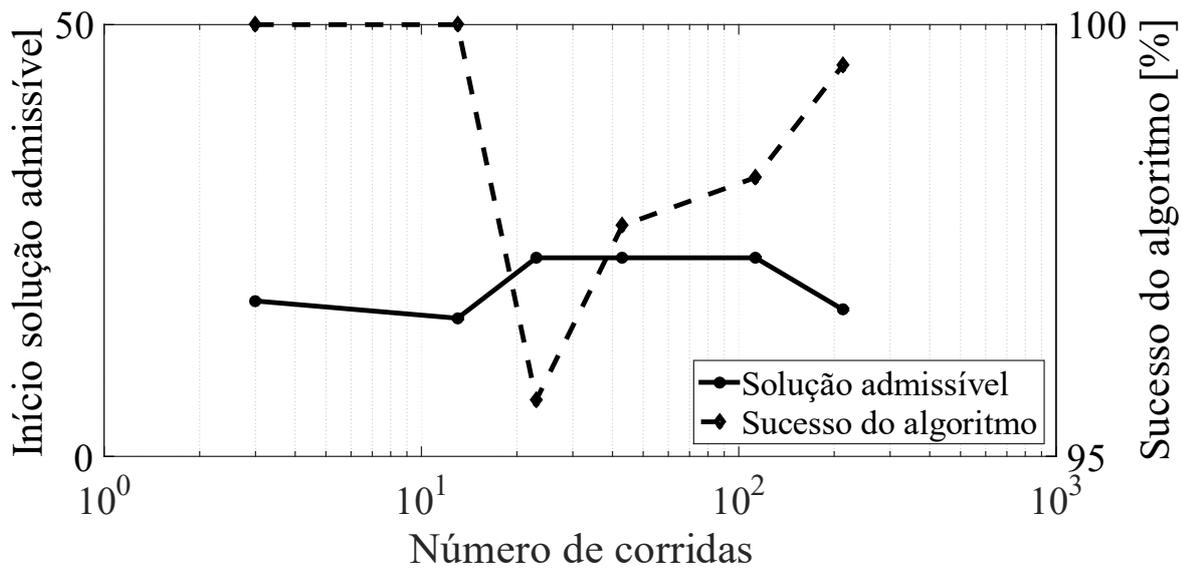


Figura 5.13 - Efeito do número de corridas na solução e sucesso

Assim, pode considerar-se que 43 corridas são um bom equilíbrio entre o desempenho do algoritmo genético e tempo de processamento.

Tendo por base as variáveis de entrada apresentadas na Tabela 5.11 e os seguintes parâmetros considerados: 200 indivíduos na população, 100% de crossover, 1% de mutação, 5% de elitismo, critério de paragem por *stall* de 50 gerações (ou limite máximo) e 43 corridas; O valor mínimo do custo de transformador são 14.023,85 € .

Tabela 5.11 – Variáveis de entrada para o melhor caso com parâmetros ajustados do algoritmo na versão base

	Espiras BT	Largura núcleo [m]	Indução magnética [T]	Altura janela núcleo [m]	Espessura condutor BT [m]	Diâmetro condutor MT [m]
x_i	15	0,240	1,698	0,259	$8,67 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-3}$
Mínimo	1	>0	1,1	>0	$4,00 \times 10^{-4}$	>0
Máximo	$+\infty$	$+\infty$	1,7	$+\infty$	$1,00 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$

As variáveis de entrada cumprem, todas as restrições, bem como as restantes variáveis sujeitas a restrição, apresentadas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Variáveis sujeitas a restrição para o melhor caso com parâmetros ajustados na versão base

Restrição	i	Valor	Mínimo	Máximo
Igualdade, tensão induzida	1	0	0	0
Igualdade, rácio de espiras	2	0	0	0
Perdas em vazio [W]	3	1051	0	1265
Perdas em carga 1 [W]	4	9347	0	10235
Perdas em carga 2 [W]	5	9656	0	10235
Perdas totais 1 [W]	6	10398	0	11000
Perdas totais 2 [W]	7	10707	0	11000
Impedância CC	8	0,058	0,054	0,066
Transf. de calor (diferença) [W]	9	0,1	0	$+\infty$
Aumento temperatura [°C]	10	46,6	0	60
Tensão induzida BT [V]	11	62	0	6000
Tensão induzida MT [V]	12	5543	0	6000
Tensão impulso BT [V]	13	1333	0	23500
Tensão impulso MT [V]	14	18232	0	23500
Altura da cuba [m]	15	0,785	0	1

Apesar de cumprir todas as restrições e o valor de custo do transformador ser um valor relativamente baixo, sabe-se pelo valor encontrado na Subcapítulo 5.1 que este valor não é o ótimo. Contudo, o valor encontrado é claramente convergente com o valor encontrado por via da força bruta.

5.3 – Análise do efeito da Compensação genética

Nesta secção é feito o dimensionamento do transformador recorrendo ao algoritmo genético incorporando a função de mutação com a variante de compensação genética. Foram utilizados os parâmetros de entrada da Tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Parâmetros do AG para dimensionamento com compensação genética

Parâmetro	Valor
População	200
Crossover	100%
Mutação	0,05%, 1%, 50%
Elitismo	5%
Critério de paragem	Stall (50 gerações)
Número de corridas	43

Sendo a compensação genética dependente da mutação, testa-se o efeito da compensação genética para vários valores de coeficiente de mutação. São testados três valores de coeficiente de mutação, 0,05%, 1% e 50%, e para cada valor de mutação são testados três valores de coeficiente de compensação genética, 5%, 20% e 100%. São também testados os valores de coeficiente de mutação sem aplicação da compensação genética para referência e utilizados na comparação dos resultados obtidos. Na Figura 5.14 apresentam-se os resultados, cuja equivalência de nomenclatura do eixo X pode ver-se na Tabela 5.14.

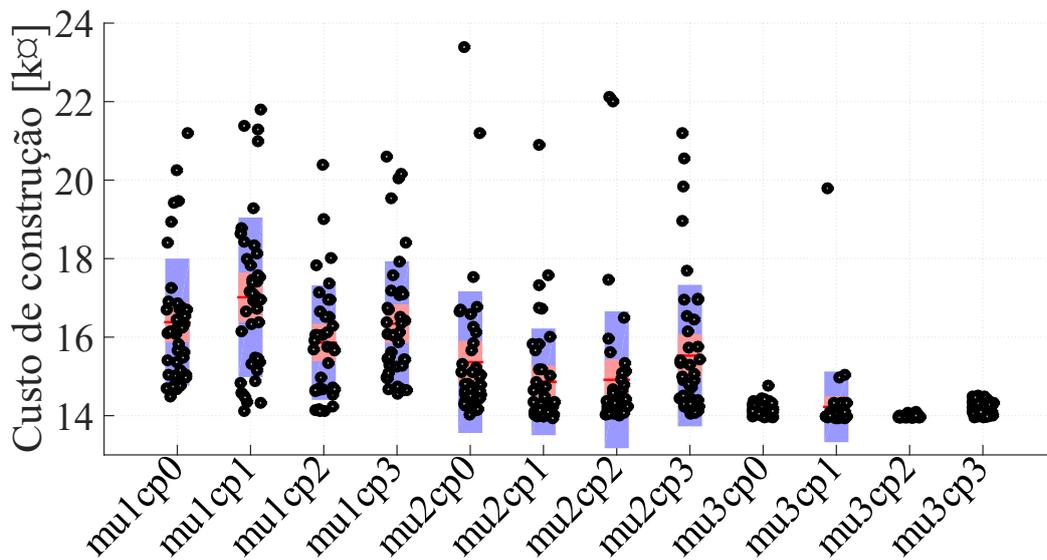


Figura 5.14 – Corridas para diversos parâmetros de mutação e compensação genética de acordo com Tabela 5.14

É visível na Figura 5.14 que, com o aumento do coeficiente de mutação há uma maior convergência, algo observado quando foi testado o efeito do coeficiente de mutação. Quanto ao efeito da compensação genética, para valores de coeficiente de mutação de 0,05%, para valores de 20% e 100% existe alguma melhoria ($\mu = 15862 \text{ k€}$, $\sigma = 1403 \text{ k€}$ e $\mu = 16343 \text{ k€}$, $\sigma = 1519 \text{ k€}$,

respetivamente) em relação ao valor de referência ($\mu = 16381$ ¤, $\sigma = 1542$ ¤), no entanto para 5%, o resultado é pior ($\mu = 17015$ ¤, $\sigma = 1971$ ¤). Este resultado pode dever-se a um valor muito baixo de mutação, 0,05%, que pode não fazer notar o efeito da compensação genética no algoritmo.

Tabela 5.14 – Equivalências da Figura 5.14

i	mu	cp
	Mutação [%]	Compensação Genética [%]
0	-	s/cp
1	0,05	5
2	1	20
3	50	100

Para um coeficiente de mutação de 1% ocorre uma melhoria significativa para valores de coeficiente de compensação genética de 5% e 20% ($\mu = 14862$ ¤, $\sigma = 1268$ ¤ e $\mu = 14914$ ¤, $\sigma = 1547$ ¤, respetivamente) em relação ao valor de referência ($\mu = 15362$ ¤, $\sigma = 1622$ ¤), no entanto para valores de 100% o resultado é pior que o de referência ($\mu = 15529$ ¤, $\sigma = 1683$ ¤).

Com 50% de coeficiente de mutação, existe uma maior convergência para valores de 20% de coeficiente de compensação genética ($\mu = 13978$ ¤, $\sigma = 33$ ¤) comparativamente à referência ($\mu = 14149$ ¤, $\sigma = 165$ ¤). O valor de coeficiente de compensação genética de 100% permite obter um valor ($\mu = 14145$ ¤, $\sigma = 161$ ¤) semelhante à referência. Já o valor de 5% de compensação genética resulta em valores piores ($\mu = 14224$ ¤, $\sigma = 803$ ¤) que a referência.

Os valores médios obtidos indicam uma evidencia da maior convergência com valores de coeficiente de mutação maiores, do que propriamente com o efeito da compensação genética.

Na Figura 5.15 pode ver-se o resultado da aplicação da compensação genética em relação ao custo mínimo encontrado nas 43 corridas de cada combinação de parâmetros.

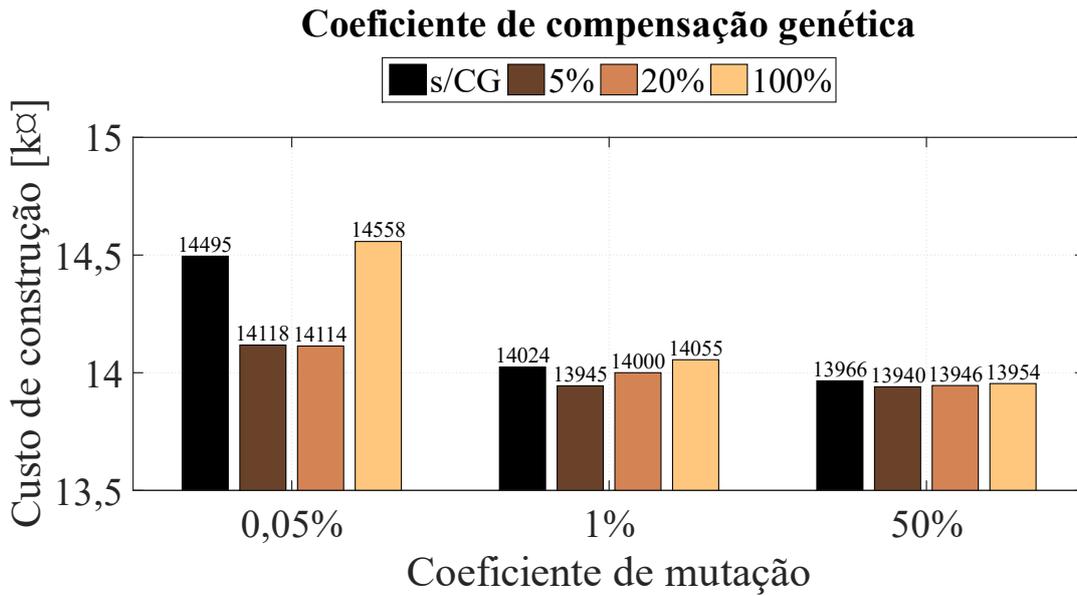


Figura 5.15 – Custo mínimo para várias combinações de mutação e compensação genética

Da Figura 5.15 pode observar-se uma clara redução do valor do custo mínimo com a utilização de coeficientes de compensação genética de 5% e 20%, mais expressiva quanto mais baixo o valor de coeficiente de mutação. Para o caso dum valor de coeficiente de compensação genética de 100% o valor até aumenta.

Na Figura 5.16 é apresentado o sucesso do algoritmo (percentagem de corridas com sucesso), não há influencia do coeficiente de compensação genética no sucesso do algoritmo, no entanto, é reforçada mais uma vez a ideia de que o coeficiente de mutação está relacionado com o sucesso do algoritmo.

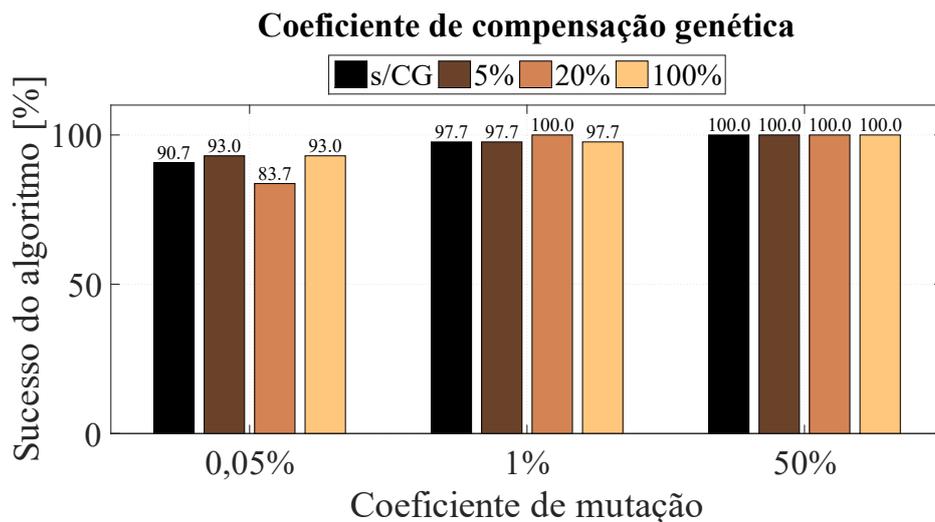


Figura 5.16 – Sucesso do algoritmo para várias combinações de mutação e compensação genética

Na Figura 5.17 apresenta-se o tempo de processamento para as várias combinações de mutação com coeficiente de compensação genética. É notório o aumento do tempo de processamento para valores de 5% e 20% de coeficiente de compensação genética. Verifica-se por outro lado uma diminuição do tempo de processamento para 100% de coeficiente de compensação genética.

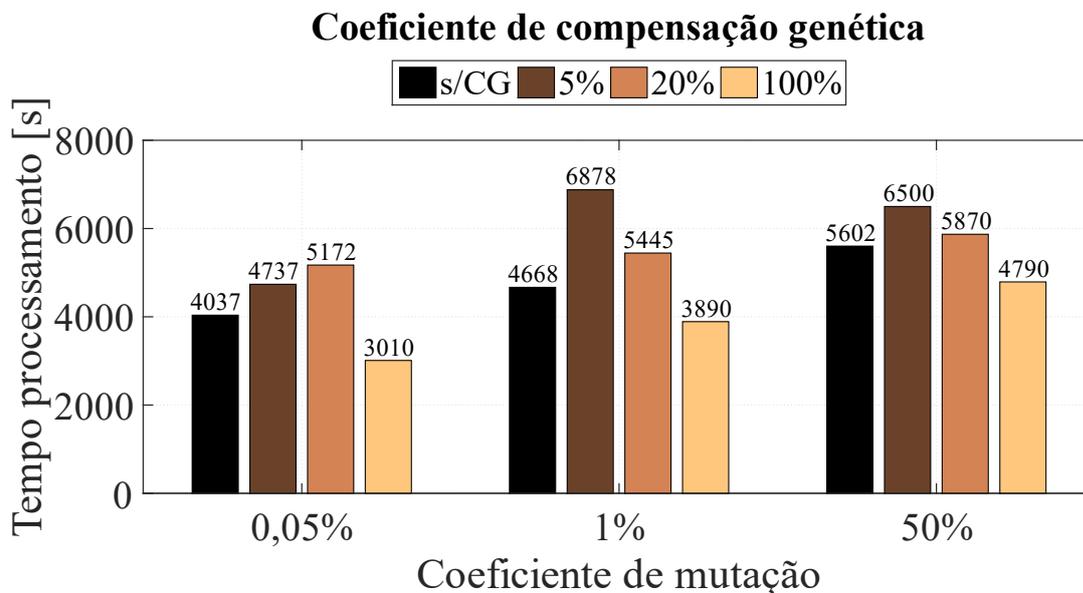


Figura 5.17 – Tempo de processamento para várias combinações de mutação e compensação genética

Com a aplicação da compensação genética na mutação conseguiu-se um melhor valor de custo de construção de 13.940,41 ₺ quando foi utilizado um coeficiente de mutação de 50% e um coeficiente de compensação genética de 5%.

Tabela 5.15 - Variáveis de entrada para o melhor caso com utilização de compensação genética

	Espiras BT	Largura núcleo [m]	Indução magnética [T]	Altura janela núcleo [m]	Espessura condutor BT [m]	Diâmetro condutor AT [m]
x_i	15	0,251	1,700	0,264	$7,27 \times 10^{-4}$	$1,84 \times 10^{-3}$
Mínimo	1	>0	1,1	>0	$4,00 \times 10^{-4}$	>0
Máximo	$+\infty$	$+\infty$	1,7	$+\infty$	$1,00 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$

Tabela 5.16 - Variáveis sujeitas a restrição para o melhor caso com utilização de compensação genética

Restrição	i	Valor	Mínimo	Máximo
Igualdade, tensão induzida	1	0	0	0
Igualdade, rácio de espiras	2	0	0	0
Perdas em vazio [W]	3	1049	0	1265
Perdas em carga 1 [W]	4	9534	0	10235
Perdas em carga 2 [W]	5	9817	0	10235
Perdas totais 1 [W]	6	10583	0	11000
Perdas totais 2 [W]	7	10866	0	11000
Impedância CC	8	0,056	0,054	0,066
Transf. de calor (diferença) [W]	9	0,1	0	$+\infty$
Aumento temperatura [°C]	10	47,4	0	60
Tensão induzida BT [V]	11	62	0	6000
Tensão induzida MT [V]	12	5543	0	6000
Tensão impulso BT [V]	13	1333	0	23500
Tensão impulso MT [V]	14	18232	0	23500
Altura da cuba [m]	15	0,782	0	1

Considerando o efeito da compensação genética, o resultado obtido é mais baixo que ambos os resultados encontrados, tanto na procura por força bruta como no algoritmo genético convencional com os parâmetros ajustados, cumprindo igualmente todas as restrições, havendo convergência com os resultados anteriores em todas as variáveis.

5.4 – Intervalo adaptativo

Para o dimensionamento do transformador recorrendo a algoritmo genético com intervalo adaptativo utilizaram-se os parâmetros escolhidos para a versão base, identificados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Parâmetros do algoritmo genético para a versão com utilização intervalo adaptativo

Parâmetro	Valor
População	200
<i>Crossover</i>	100%
Mutação	1%
Elitismo	5%
Critério de paragem	<i>Stall</i> (50 gerações)
Número de iterações	43

A versão adaptativa do algoritmo genético incorpora dois parâmetros adicionais: o coeficiente de aproximação e o valor da condição de paragem entre corridas. O coeficiente de aproximação é dado pela Equação (4.3) onde foi considerado o valor fixo de 0,5 para o parâmetro “*a*” e foram considerados três valores para o parâmetro “*b*”: 0,7, 1 e 10. Na Figura 5.18 estão representadas as curvas de coeficiente de aproximação para os três valores de “*b*”. Foram escolhidos valores de “*b*” considerando três cenários: valor de 0,7 em que a evolução do coeficiente de aproximação é mais lenta, valor de 10 em que a evolução do coeficiente é muito rápida e um valor intermédio em que existe uma evolução mais lenta nas primeiras corridas e mais rápida nas restantes. O valor escolhido para a condição de paragem (diferença da função de custo entre corridas) foi de 1 ¢.

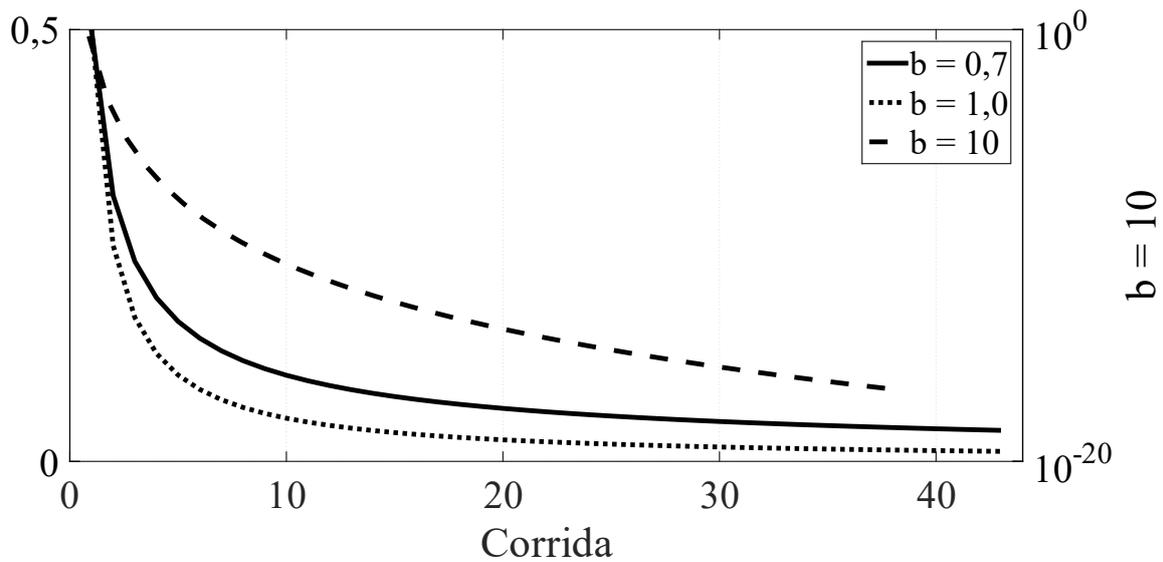


Figura 5.18 – Valor do coeficiente de aproximação em função da corrida (no eixo do lado direito para b=10)

Na Figura 5.19 estão representadas 43 iterações para cada curva de coeficiente de aproximação bem como 43 corridas para algoritmo genético sem intervalo adaptativo, utilizado como referência ou base de comparação. É inegável que existe uma maior convergência quando se recorre ao algoritmo com intervalo adaptativo. Para as corridas considerando o algoritmo genético sem intervalo adaptativo tem-se uma maior dispersão ($\mu = 15362 \text{ m}$, $\sigma = 1622 \text{ m}$). Para os valores do parâmetro “b” do coeficiente de aproximação de 0,7 e 1,0 tem-se a maior convergência (respetivamente, $\mu = 13993 \text{ m}$, $\sigma = 37 \text{ m}$ e $\mu = 13974 \text{ m}$, $\sigma = 23 \text{ m}$). Já com o valor de 10 para o parâmetro “b” ocorreu menos convergência ($\mu = 14136 \text{ m}$, $\sigma = 219 \text{ m}$).

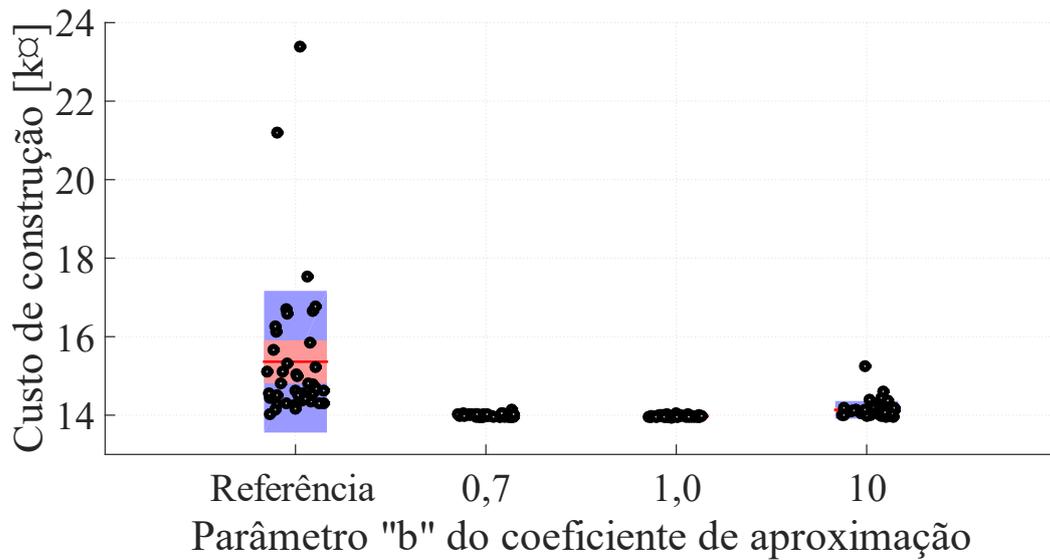


Figura 5.19 – Resultados de 43 iterações com intervalo adaptativo para cada valor de “b” e referência sem adaptação (43 corridas)

A Figura 5.20 apresenta o custo mínimo para cada valor do parâmetro “b” do coeficiente de aproximação bem como para o algoritmo utilizado como “referência”. O valor mínimo ocorre para o valor do parâmetro “b” de 1,0 (13944 ¤), melhor que o valor utilizado como base de comparação (14024 ¤), e melhor que o valor encontrado através do método de força bruta (13945 ¤). No entanto, não consegue superar o valor encontrado através da mutação com compensação genética (13940 ¤).

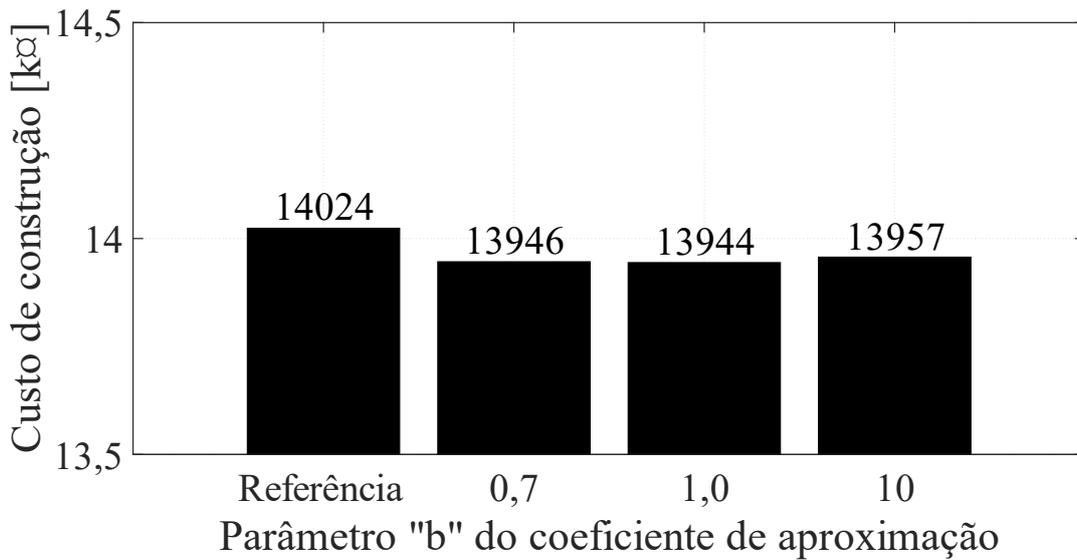


Figura 5.20 – Custo mínimo do transformador com utilização de intervalo adaptativo

Na Figura 5.21 estão representados os valores do sucesso do algoritmo genético com intervalo adaptativo para cada valor do parâmetro “b” bem como para algoritmo genético utilizado como base de comparação (“referência”). A percentagem das iterações que encontram uma solução viável é 100% em todos os ensaios com intervalo adaptativo, melhor que os verificados no algoritmo genético utilizado como base de comparação (97,7% para 43 corridas).

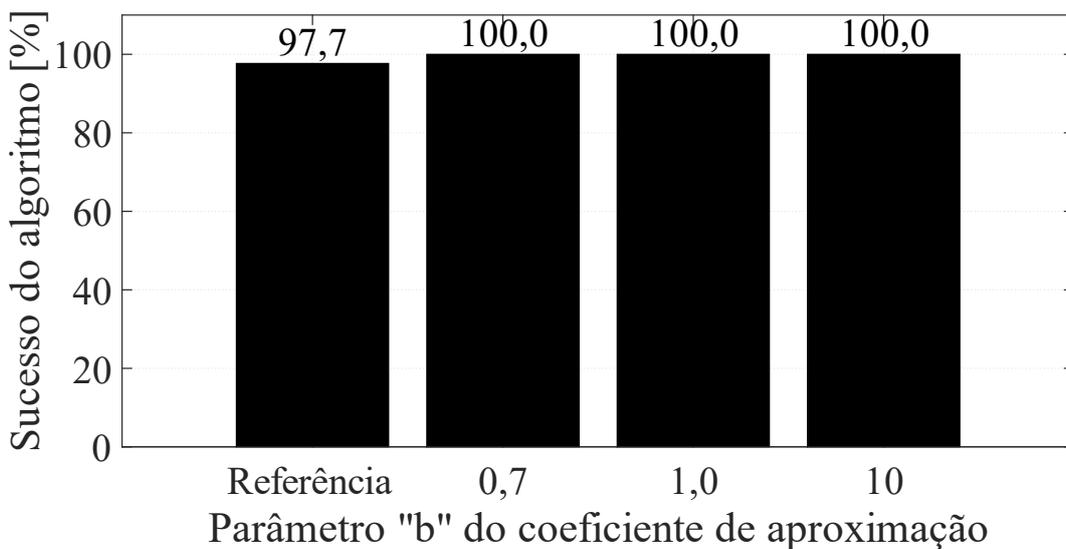


Figura 5.21 – Sucesso do algoritmo com utilização de intervalo adaptativo

Na Figura 5.22 está representado o tempo de processamento para 43 iterações para cada valor do parâmetro “*b*” bem como para as 43 corridas algoritmo genético utilizado como base de comparação. É notório o aumento significativo do tempo de processamento com a utilização do intervalo adaptativo. O tempo de processamento aumenta três vezes em relação ao algoritmo genético utilizado como base de comparação (“referência”) para o valor “*b*” com valor de 10, para “*b*” de 1,0 o tempo aumenta dezassete vezes e para 0,7 o tempo de processamento aumenta vinte e três vezes. O aumento de tempo de processamento era expectável, pois cada iteração no caso do algoritmo adaptativo, implica várias corridas.

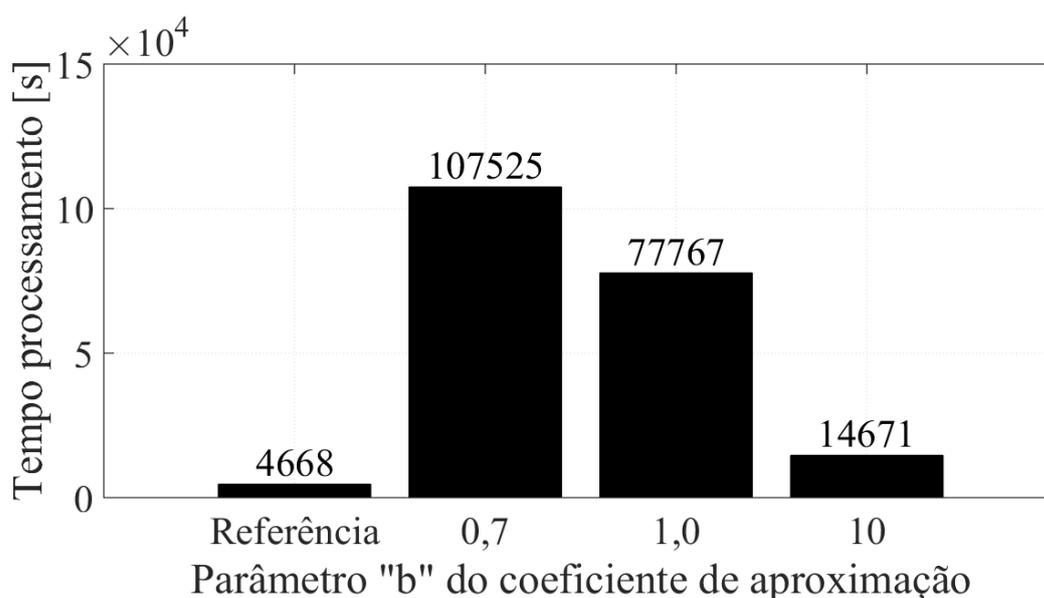


Figura 5.22 – Tempo de processamento com utilização de intervalo adaptativo

Os ensaios para o algoritmo genético que inclui a variante de intervalo adaptativo resultam num melhor valor de custo de construção do transformador de 13944,30 € com as características construtivas das variáveis de entrada apresentadas na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Variáveis de entrada para o melhor caso com utilização de intervalo adaptativo

	Espiras BT	Largura núcleo [m]	Indução magnética [T]	Altura janela núcleo [m]	Espessura condutor BT [m]	Diâmetro condutor MT [m]
x_i	15	0,251	1,700	0,265	$7,25 \times 10^{-4}$	$1,82 \times 10^{-3}$
Mínimo	1	>0	1,1	>0	$4,00 \times 10^{-4}$	>0
Máximo	$+\infty$	$+\infty$	1,7	$+\infty$	$1,00 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-3}$

Na Tabela 5.19 são apresentadas as variáveis sujeitas a restrição para o melhor valor encontrado através do algoritmo genético com intervalo adaptativo. Como se observa, todas as variáveis respeitam os valores mínimos e máximos.

Tabela 5.19 - Variáveis sujeitas a restrição para o melhor caso com utilização de intervalo adaptativo

Restrição	i	Valor	Mínimo	Máximo
Igualdade, tensão induzida	1	0	0	0
Igualdade, rácio de espiras	2	0	0	0
Perdas em vazio [W]	3	1050	0	1265
Perdas em carga 1 [W]	4	9541	0	10235
Perdas em carga 2 [W]	5	9824	0	10235
Perdas totais 1 [W]	6	10591	0	11000
Perdas totais 2 [W]	7	10875	0	11000
Impedância CC	8	0,055	0,054	0,066
Transf. de calor (diferença) [W]	9	1,7	0	$+\infty$
Aumento temperatura [°C]	10	47,4	0	60
Tensão induzida BT [V]	11	62	0	6000
Tensão induzida MT [V]	12	5543	0	6000
Tensão impulso BT [V]	13	1333	0	23500
Tensão impulso MT [V]	14	18232	0	23500
Altura da cuba [m]	15	0,783	0	1

Assim, tal como no algoritmo genético base e algoritmo genético com compensação genética, verifica-se uma convergência geral, em todas as variáveis.

Capítulo 6

Conclusões

Nesta dissertação foram atingidos todos os objetivos propostos: a caracterização do transformador, o desenvolvimento do algoritmo genético e a aplicação do mesmo. Neste capítulo são apresentadas as conclusões e é feita uma análise de todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação, dividindo em três secções respeitantes aos três objetivos principais deste trabalho.

6.1 – Considerações sobre a caracterização do transformador

Ao longo do Capítulo 2 é feita a caracterização matemática que, como um todo, é a função objetivo aplicada ao algoritmo genético. O método utilizado nesta dissertação baseou-se essencialmente na metodologia apresentada em [5], que apesar de ser (de longe) a metodologia encontrada na literatura com a melhor organização e clareza, apresenta muitas limitações do ponto de vista prático. O método apresentado pode requerer adicionalmente, experiência do projetista ou a utilização de FEM.

Assim, se houver necessidade de proceder ao dimensionamento dum transformador diferente do modelo com os parâmetros apresentados, é necessário investigar ponto a ponto se os valores são aplicáveis a um novo modelo. Por exemplo, ao alterar-se o nível de tensão, é necessário verificar se a espessura dos isolamentos é compatível com o nível de tensão.

Outro aspeto que ocorre com frequência é a utilização de gráficos como fonte de dados sem que estejam referenciados. Provavelmente isto acontece porque são dados obtidos da indústria e não da literatura científica. Para contornar este problema, todas essas consultas gráficas foram transformadas em equações matemáticas através da utilização de regressões, apesar do erro associado a esse processo.

6.2 – Algoritmos genéticos

Foi implementado com sucesso o algoritmo genético recorrendo ao *software Matlab®* e foram desenvolvidas e testadas todas as funções do algoritmo. O algoritmo implementado foi validado com recurso à função de Rastrigin nas três variantes desenvolvidas. As três variantes testadas foram: uma versão base, uma versão com mutação com efeito da compensação genética e uma versão com intervalo adaptativo de corrida para corrida. Na Tabela 6.1 apresenta-se o quadro resumo dos resultados da validação do algoritmo e variantes recorrendo à função de Rastrigin.

Tabela 6.1 - Resultados e erros absolutos da validação com a função de Rastrigin

Versão	Base		Compensação Genética		Intervalo Adaptativo	
	[-100; 100]	[4,7; 204,7]	[-100; 100]	[4,7; 204,7]	[-100; 100]	[4,7; 204,7]
$\mu(x_1)$	0,062	5,231	$-2,73 \times 10^{-12}$	4,977	0,009	4,974
$\sigma(x_1)$	1,008	0,534	$2,15 \times 10^{-10}$	0,015	0,282	0,001
$\mu(x_2)$	-0,121	5,325	$-2,90 \times 10^{-12}$	4,975	0,026	4,975
$\sigma(x_2)$	1,050	0,657	$7,02 \times 10^{-11}$	0,019	0,248	0,001
$\mu[f(x)]$	4,254	65,177	$5,02 \times 10^{-14}$	49,867	0,167	49,748
$\sigma[f(x)]$	3,557	12,655	$7,94 \times 10^{-14}$	0,187	0,303	$6,88 \times 10^{-4}$
x_1	0,000	4,975	0,000	4,975	0,000	4,975
$ \mu(x_1) - x_1 $	0,062	0,256	$2,73 \times 10^{-12}$	0,002	0,009	0,001
x_2	0,000	4,975	0,000	4,975	0,000	4,975
$ \mu(x_2) - x_2 $	0,121	0,350	$2,90 \times 10^{-12}$	0,000	0,026	0,000
$f(x)$	0,000	49,75	0,000	49,75	0,000	49,75
$ \mu[f(x)] - f(x) $	4,254	15,427	$5,021 \times 10^{-14}$	0,117	0,167	0,002

O algoritmo genético na versão base demonstra convergência, no entanto existem aspetos que devem ser tidos em conta. Em ambos os intervalos o valor das coordenadas x_1 e x_2 está próximo do ótimo global, no entanto existem diferenças relevantes o suficiente para tornar o valor de aptidão ainda distante do ótimo global. Tal pode dever-se ao facto de o declive da superfície ser muito acentuado, o que faz com que pequenas diferenças em x_1 e x_2 resultem em diferenças maiores em $f(x)$. O facto de os valores da população estarem muito dependentes dos valores da geração inicial, faz com que por vezes haja estagnação perto do ótimo global ou em ótimos locais, pois a probabilidade de mutação que torne os indivíduos mais aptos, é baixa.

Com vista a encontrar soluções para o problema descrito, com base num fenómeno natural, foi implementada e testada a mutação com compensação genética. Como pode ver-se na Tabela

6.1 os resultados são substancialmente melhores em relação à versão base, utilizando os mesmos parâmetros. A compensação genética faz com que a mutação seja mais próxima da zona de convergência o que torna a probabilidade mais alta do efeito de mutação ser benéfico para o indivíduo. No entanto, não deve ser ignorado um facto importante sobre a mutação nos algoritmos genéticos: a mutação é a rede de segurança para que não se caia em ótimos locais. Assim, e apesar de no teste efetuado com compensação genética não haver convergência em mínimos locais ao contrário da versão base, o estudo da compensação genética deve ser aprofundado. A versão com intervalo adaptativo também produz melhores resultados do que a versão base, inclusive que a versão com compensação genética. No entanto, tal como no caso da compensação genética, é preciso cautela quanto à sua implementação. No algoritmo genético com o intervalo adaptativo, a diversidade da população inicial é ajustada de corrida em corrida embora o domínio da mutação se mantenha inalterável. Isto pode causar, mais uma vez, problemas com convergência em ótimos locais, pois o intervalo pode adaptar-se junto a um ótimo local e a probabilidade de a mutação ocorrer para junto do ótimo global ser muito baixa. Portanto, apesar dos resultados validarem o algoritmo e a implementação efetuada, o uso das variantes apresentadas deve ser mais aprofundado e mais testado.

Tendo em conta os bons resultados obtidos com o algoritmo genético e as variantes desenvolvidas foi então aplicado ao problema de dimensionamento do transformador, com as devidas adaptações, mais precisamente no que diz respeito à aplicação de restrições.

6.3 – Aplicação do AG ao dimensionamento do transformador

Antes de se aplicar o algoritmo genético ao dimensionamento do transformador, houve necessidade de criar valores de referência, que serviram de comparação. Esses valores de referência foram procurados através da aplicação da técnica da força bruta. A aplicação desta técnica parte da existência de uma zona de procura e de uma solução viável, mas nada garante que não exista um ótimo fora dessa zona. Ou seja, não havendo qualquer informação prévia sobre o problema, torna-se muito difícil aplicar a técnica da força bruta. Portanto os valores encontrados, apresentados na coluna “Referência” da Tabela 6.2 são apenas uma *benchmark* para a comparação com os valores encontrados através do algoritmo genético.

Do algoritmo genético fazem parte vários parâmetros que devem ser ajustados ao problema que se quer otimizar. Para o caso da validação, foram escolhidos parâmetros comumente utilizados na literatura. Já para o problema de dimensionamento do transformador foi feita uma análise de sensibilidade aos parâmetros do algoritmo, estudando o seu efeito no custo mínimo, custo médio, tempo de processamento, geração inicial de solução admissível e sucesso do algoritmo.

No estudo do efeito do número de indivíduos da população, verifica-se que uma população de 200 indivíduos apresenta um bom compromisso entre convergência de valores e tempo de processamento. Verifica-se que o tempo de processamento aumenta linearmente com o aumento da população, portanto uma população de 1000 indivíduos demorará cinco vezes mais tempo que uma população de 200 indivíduos. Este resultado é espectável, uma vez que mais indivíduos representam um acréscimo de cálculos e consequentemente mais tempo de processamento.

Já em relação ao estudo do coeficiente de *crossover*, verifica-se uma diminuição do tempo de processamento sem sacrifício dos outros resultados avaliados. Faz sentido que um aumento do cruzamento entre indivíduos potencie a convergência e como resultado o tempo de processamento baixe. Como não parece existir nenhum efeito adverso da utilização de um coeficiente de *crossover* alto, optou-se por adotar para este problema um fator de 100%.

A mutação é uma operação do algoritmo genético que, apesar dos resultados à primeira vista parecerem pouco relevantes, tem uma grande importância. Verifica-se que quando se aumenta a taxa de mutação, o valor do custo mínimo e médio convergem para valores próximos. Isto parece indicar que, ao ter-se um coeficiente de mutação elevado, a mutação potencia a diminuição do valor de aptidão numa forma mais geral. O efeito de que uma taxa de mutação elevada pode beneficiar o algoritmo já tinha sido demonstrada em [40]. O aumento da taxa de mutação, por outro lado, aumenta ligeiramente o tempo de processamento, sendo este efeito espectável pois a população do algoritmo vai demorar mais gerações a estagnar e consequentemente a convergir numa solução. Assim, optou-se por adotar, numa primeira fase, um coeficiente de mutação 1%. Tipicamente a taxa de mutação na natureza é baixa, em humanos estima-se que a taxa de mutação ronde os $\sim 10^{-5}$ [46], por outro lado, parece haver benefícios numa taxa de mutação alta nos algoritmos genéticos. A razão para tal acontecer pode dever-se à relação entre população e mutação: com uma população pequena e uma taxa de mutação baixa é de esperar que o efeito da mutação seja muito baixo, já com uma população elevada e uma taxa de mutação baixa o efeito efetivo da mutação espera-se que seja maior. Com

isto, faz sentido que a taxa de mutação seja aumentada numa população pequena para simular o efeito duma taxa de mutação baixa numa população grande.

O estudo do elitismo demonstrou ser pouco relevante neste problema. O elitismo garante que o melhor (ou melhores) indivíduo(s) duma determinada geração nunca se perde. O efeito concreto é que, no caso duma minimização, o valor de aptidão é sempre menor ou igual ao da geração anterior. Apesar do efeito ser ténue, parece existir uma ligeira vantagem em relação a ter algum elitismo em vez de não ter elitismo de todo. Por essa razão optou-se por considerar, na generalidade, um coeficiente de elitismo de 5%.

Para além do critério de paragem por limite máximo de gerações, que serve como rede de segurança para que o algoritmo não corra indefinidamente, foi considerado outro critério de paragem, a paragem por *stall*. A paragem por *stall* ocorre quando o valor deixa de progredir durante um determinado número de gerações. Supondo que a determinado momento o algoritmo é parado por *stall*, caso essa ação não tivesse sido feita, dois cenários podiam ocorrer: o algoritmo continuaria estagnado até ao limite máximo de gerações ou o valor de aptidão iria melhorar a dada geração. O estudo da sensibilidade do número de gerações de *stall* faz a análise do efeito destas duas possibilidades. Verificou-se que ocorrem dois efeitos com o aumento do número de gerações de *stall*: por um lado o tempo de processamento aumenta e por outro existe maior convergência entre valor mínimo e valores médios das corridas. Ambos os efeitos são espectáveis, aumentar o número de gerações aumenta o número de cálculos que aumenta o tempo de processamento, e a maior convergência das várias corridas deve-se a que, com o aumento do número de gerações, a probabilidade de ocorrerem mutações que melhorem os indivíduos, aumenta. Assim, optou-se pela escolha do valor de 50 gerações de *stall*, que parece ser um bom compromisso entre tempo de processamento e convergência das corridas.

O último teste a ser realizado, já com todos os parâmetros constitutivos do algoritmo genético definidos, é o número de corridas a realizar com vista a obter valores representativos sem aumentar desnecessariamente o tempo de processamento. Verifica-se que, em média, o tempo de processamento é semelhante para cada corrida. Verifica-se também que estatisticamente não se obtém melhorias apreciáveis acima de 43 corridas. Definir um número de corridas tem apenas como objetivo uniformizar os vários testes a efetuar aos algoritmos.

Com todos os parâmetros definidos, pode obter-se o valor do custo de construção do transformador bem como os valores das variáveis de dimensionamento. Na coluna “Base” da Tabela 6.2 podem ver-se os valores obtidos.

O valor de custo obtido por via do algoritmo genético na versão base é superior ao valor selecionado como valor de comparação ou de referência. O facto de o valor ser pior que o valor de referência não é algo necessariamente mau, porque apesar disso, é notória a convergência do algoritmo para valores próximos dos valores de referência utilizados como base de comparação. Isto significa que com alguns ajustes pode ser possível igualar, ou até mesmo conseguir um valor mais baixo. O algoritmo genético parte duma posição de total incógnita em relação ao dimensionamento do transformador, em que a grande maioria dos indivíduos da população nem sequer é possível devido à violação das restrições. Já os valores conseguidos por via da força bruta partem dum design já conhecido e fazem a procura do ótimo num intervalo em redor do mesmo. Assim, apesar do resultado ser pior, pode considerar-se que o principal objetivo em relação ao algoritmo genético base foi cumprido.

Tabela 6.2 - Resultados da aplicação do algoritmo genético ao dimensionamento do transformador

Versão	Referência	Base	Compensação Genética	Intervalo Adaptativo
CTM [⊗]	13.945	14.024	13.940	13.944
Espiras BT	15	15	15	15
Largura núcleo [m]	0,248	0,240	0,251	0,251
Indução magnética [T]	1,7	1,698	1,7	1,7
Altura janela núcleo [m]	0,264	0,259	0,264	0,265
Espessura condutor BT [m]	$7,3 \times 10^{-4}$	$8,67 \times 10^{-4}$	$7,27 \times 10^{-4}$	$7,25 \times 10^{-4}$
Diâmetro condutor MT [m]	$1,8 \times 10^{-3}$	$1,75 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-3}$	$1,82 \times 10^{-3}$

Da aplicação do algoritmo na sua versão base, foi notório que para além da afinação dos parâmetros, seria interessante adotar estratégias alternativas para conseguir aproximar mais os resultados do algoritmo genético com os valores de referência obtidos pela técnica da força bruta. Para tal foram implementadas duas variantes do algoritmo genético, uma considerando o efeito da compensação genética e outra considerando o intervalo adaptativo.

Quando foi feito o estudo de sensibilidade dos parâmetros do algoritmo genético foi notório que a mutação tem um papel muito importante na convergência do algoritmo para o valor ótimo. Também é notório que com o avançar do número de gerações, o efeito que uma mutação pode fazer na melhoria do valor de aptidão diminui, pois é cada mais provável que as mutações tornem o individuo menos apto do que mais apto. Assim, foi aplicada a variante do algoritmo

incorporando a compensação genética. Verificou-se que existe uma melhoria significativa dos resultados quando se utilizam valores de coeficiente de compensação genética de 5% e 20% acompanhados de taxas de mutação elevadas. Este resultado é expectável pois o que sucede é uma mutação sempre em torno do melhor valor, neste caso num intervalo limitado com igual probabilidade de ocorrência. Também o tempo de processamento é alterado com a introdução da compensação genética: quanto menor o coeficiente de compensação genética maior o tempo de processamento. Isto pode explicar-se pelo facto de pequenos intervalos originarem mais vezes indivíduos com melhores valores de aptidão, o que leva a haja menos *stall* e, por conseguinte, mais cálculos. Em relação ao sucesso do algoritmo, parece não haver relação com a compensação genética, havendo, contudo, uma relação mais notória com o coeficiente de mutação. Apesar dos resultados promissores desta abordagem, deve ter-se em conta que a rede de segurança que impede a convergência em mínimos locais, a mutação em todo o domínio, é retirada do algoritmo. O melhor resultado conseguido com esta variante é, em todo o caso, melhor que o resultado utilizado como base de comparação e do que a versão base, mais uma vez reforçando a convergência para a mesma zona de valores, como pode ver-se na Tabela 6.2.

Foi também aplicado o algoritmo genético na variante em que é incorporado o intervalo adaptativo. Esta variante apresenta maior robustez, logo menor dispersão dos resultados relativamente ao algoritmo genético na sua versão base, contudo o tempo de processamento aumenta. De notar que apesar do tempo de processamento aumentar, quando é utilizado um valor do parâmetro “*b*” da função de coeficiente de aproximação elevado, o tempo de processamento não aumenta substancialmente e consegue-se uma convergência muito mais robusta que a obtida no resultado utilizado como referência. Já para valores de “*b*” de 0,7 o tempo aumenta cerca de 23 vezes em relação tempo considerado como base de comparação. Algo que é notório é o sucesso de 100% com a utilização do intervalo adaptativo. Esta abordagem parece promissora especialmente quando é utilizada uma curva do coeficiente de aproximação mais acentuada, o que parece aumentar a convergência da generalidade das iterações bem como mantém o tempo de processamento em condições comparáveis às obtidas pelo método utilizado como base de comparação de resultados. Mais uma vez, tal como na variante com a compensação genética, é preciso notar que uma vez que se está a limitar o intervalo da procura, ainda que progressivamente ao longo das gerações. Assim, os resultados obtidos com intervalo adaptativo, apesar de melhorarem em relação ao método que utiliza a força bruta e o algoritmo genético base, não superam o resultado da compensação genética, como pode ver-se na Tabela 6.2.

Os resultados obtidos no dimensionamento do transformador recorrendo ao algoritmo genético foram na sua generalidade bons, havendo convergência geral e por vezes até chegando a valores melhores que os obtidos com o método da força bruta. Tendo em conta que com este tipo de algoritmo, não há necessidade de conhecimento prévio do problema, os resultados são similares a alternativas mais convencionais em que é necessária outra sensibilidade por parte do projetista ou informação prévia de dimensionamentos anteriores.

6.4 – Limitações e desenvolvimentos futuros

No decorrer desta dissertação, a principal limitação identificada foi a caracterização matemática do dimensionamento do transformador. Claramente é a maior limitação deste trabalho, pois será difícil adaptar o cálculo apresentado para este tipo de transformador para outro tipo de transformador. Grande parte da informação é propriedade dos fabricantes e, a não ser que haja um interesse comum, dificilmente essa informação é disponibilizada. Contudo, a metodologia de dimensionamento serviu perfeitamente ao propósito da aplicação dos algoritmos genéticos.

Em relação ao desenvolvimento e aplicação dos algoritmos genéticos, uma das limitações identificadas prende-se com o facto do algoritmo só ter sido testado com uma função de teste. O algoritmo foi validado com a função de Rastrigin a duas dimensões, idealmente, para além deste teste, podia-se optar por outras funções, por exemplo, a função de Ackley e a função de Schwefel. Com mais testes ao algoritmo, mais fiabilidade do mesmo pode ser conseguida nas implementações subsequentes. Outra limitação prende-se com a fiabilidade das variantes apresentadas, tanto a compensação genética como o intervalo adaptativo carecem de mais testes e melhorias.

Assim, um desenvolvimento futuro seria alargar o teste do algoritmo genético a novas funções com mais dimensões. Outra recomendação seria capacitar a mutação com compensação genética de procura em todo o domínio. Isto pode ser feito transformando um intervalo limitado com probabilidade uniforme num intervalo ilimitado com uma distribuição de probabilidade não uniforme, por exemplo, com distribuição normal. É possível que essa alteração tenha o mesmo efeito que a compensação genética desenvolvida neste trabalho sem eliminar a rede de segurança da mutação em todo o domínio do problema.

Também em relação ao intervalo adaptativo pode ser aprofundado o efeito das curvas do coeficiente de adaptação em função das gerações. Neste trabalho foi estudado apenas um tipo

de curva com três variantes, mas pode alterar-se o tipo de curva e pode ainda introduzir-se um intervalo adaptativo com uma distribuição não uniforme, que considere todo o domínio, mas que se vá focando nas zonas de interesse. Isto para, tal como na compensação genética, evitar convergência em mínimos locais.

Nesta dissertação foi feita uma análise de sensibilidade aos parâmetros do algoritmo genético manualmente, experimentando vários valores e analisando os resultados. Outra opção seria correr uma otimização nesses mesmos parâmetros, ou seja, ter-se-ia um qualquer algoritmo a procurar a melhor combinação de parâmetros do algoritmo genético.

Por fim, seria também interessante adaptar o algoritmo do enxame de partículas a este problema e comparar com os resultados obtidos. Considera-se que a aplicação do enxame de partículas na aplicação a este tipo de problemas uma técnica promissora de entre os métodos estocásticos.

Bibliografia

- [1] W. Flanagan, *Handbook of Transformer Design and Applications*, 2nd ed. McGraw-Hill, 1992.
- [2] C. Darwin, *The origin of species*, V. 2009. Cambridge University Press, 1876.
- [3] M. Mitchell, *An introduction to genetic algorithms*, 5th print. MIT Press, 1999.
- [4] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P. T. Feghalu, D. M. Shah, and R. Ahuja, *Transformer Design Principles*, 2nd ed. CRC Press, 2010.
- [5] P. S. Georgilakis, *Spotlight on Modern Transformer Design*. Springer, 2009.
- [6] H. A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, and H. Meshgin-kelk, *Electric Machines - Modeling Condition Monitoring and Fault Diagnosis*, 20120612th ed. CRC Press, 2013.
- [7] N. D. Hatziaargyriou, P. S. Georgilakis, D. G. Pappas, and J. A. Bakopoulos, "Prediction of Distribution Transformer No-Load Losses Using The Learning Vector Quantization Neural Network," *MELECON '98. 9th Mediterranean Electrotechnical Conference. Proceedings*, pp. 1180–1184, 1998.
- [8] H. D. Mehta and R. M. Patel, "A Review on Transformer Design Optimization and Performance Analysis Using Artificial Intelligence Techniques," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 3, no. 9, pp. 726–733, 2014.
- [9] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, and P. S. Georgilakis, "The state of the art in engineering methods for transformer design and optimization: A survey," *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, vol. 10, no. 5, pp. 1149–1158, 2008.
- [10] M. I. Jordan and T. M. Mitchell, "Machine learning: Trends, perspectives, and prospects," *Science*, pp. 255–260, 2015.
- [11] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, and A. G. Kladas, "Transformer design and optimization: A literature survey," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 4, pp. 1999–2024, 2009.
- [12] D. Peterchuck and A. Pahwa, "Sensitivity of transformer's hottest-spot and equivalent aging to selected parameters," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 4, pp. 996–1001, 2002.
- [13] C. Nussbaum, H. Pfützner, T. Booth, N. Baumgartinger, A. Ilo, and M. Clabian, "Neural Networks for the Prediction of Magnetic Transformer Core Characteristics," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 1, pp. 313–329, 2000.
- [14] A. A. Adly, "Computation of inrush current forces on transformer windings," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2855–2857, 2001.
- [15] L. H. Geromel and C. R. Souza, "The application of intelligent systems in power transformer design," *Proc. 2002 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, pp. 285–290, 2002.
- [16] M. A. F. Finocchio, J. J. Lopes, J. A. de França, J. C. Piai, and J. F. Mangili Jr, "Neural networks applied to the design of dry-type transformers: an example to analyze the winding temperature and elevate the thermal quality," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1–10, 2017.

-
- [17] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, and A. G. Kladas, "Artificial intelligence combined with hybrid FEM-BE techniques for global transformer optimization," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, no. 4, pp. 1633–1636, 2007.
- [18] A. I. El-Gallad, M. El-Hawary, A. A. Sallam, and A. Kalas, "Swarm-intelligently trained neural network for power transformer protection," *Can. Conf. Electr. Comput. Eng. 2001. Conf. Proc.*, pp. 265–269, 2001.
- [19] W. H. Tang, S. He, E. Prempain, Q. H. Wu, and J. Fitch, "A particle swarm optimiser with passive congregation approach to thermal modelling for power transformers," *2005 IEEE Congr. Evol. Comput.*, pp. 2745–2751, 2005.
- [20] J. Du, P. Li, G. Wu, H. Bai, and J. Shen, "Improved PSO algorithm and its application in optimal design for Rectifier Transformer," *2010 Int. Conf. Intell. Comput. Integr. Syst.*, pp. 605–608, 2010.
- [21] R. Aghmasheh, V. Rashtchi, and E. Rahimpour, "Gray box modeling of power transformer windings based on design geometry and particle swarm optimization algorithm," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, no. 5, pp. 2384–2393, 2018.
- [22] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, and A. G. Kladas, "Ant Colony Solution to Optimal Transformer Sizing Problem," *2007 9th Int. Conf. Electr. Power Qual. Util.*, 2007.
- [23] M. Fouzai and T. Zouaghi, "Ant Colony algorithm applied to power transformer optimization," *2013 Int. Conf. Electr. Eng. Softw. Appl.*, 2013.
- [24] O. Folorunso, P. A. Oriafio, N. S. Idiagi, and E. A. Ogujor, "Application of ant colony optimisation in distribution transformer sizing," *Niger. J. Technol.*, vol. 36, no. 4, pp. 1233–1238, 2017.
- [25] G. Štumberger, S. Seme, B. Stumberger, B. Polajzer, and D. Dolinar, "Determining Magnetically Nonlinear Characteristics of Transformers and Iron Core Inductors by Differential Evolution," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 6, 2008.
- [26] S. H. Thilagar and G. S. Rao, "Parameter estimation of three-winding transformers using genetic algorithm," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, pp. 429–437, 2002.
- [27] S. Elia, G. Fabbri, E. Nisticò, and E. Santini, "Design of cast-resin distribution transformers by means of genetic algorithms," *Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion*, vol. 15, pp. 64–68, 2006.
- [28] N. Tutkun and A. J. Moses, "Design optimisation of a typical strip-wound toroidal core using genetic algorithms," *J. Magn. Magn. Mater.*, pp. 216–220, 2004.
- [29] S. Zhang, Q. Hu, X. Wang, and D. Wang, "Research of transformer optimal design modeling and intelligent algorithm," *2011 Chinese Control Decis. Conf.*, pp. 213–218, 2011.
- [30] L. Hui, H. Li, H. Bei, and Y. Shunchang, "Application research based on improved genetic algorithm for optimum design of power transformers," *ICEMS'2001. Proc. Fifth Int. Conf. Electr. Mach. Syst. (IEEE Cat. No.01EX501)*, pp. 242–245, 2001.
- [31] S. Zhang, Q. Hu, X. Wang, and Z. Zhu, "Application of chaos genetic algorithm to transformer optimal design," *Int. Work. Chaos-Fractals Theor. Appl.*, pp. 108–111, 2009.
- [32] M. S. Mohammed and R. A. Vural, "NSGA-II+FEM Based Loss Optimization of Three-Phase Transformer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 9, pp. 7417–7425, 2019.

- [33] R. Kokika, C. Anagha, and P. Neethu, "Performance Comparison of Conventional , Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for optimal design of Transformer with respect to its Total Owning Cost," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 3, no. 6, pp. 1–5, 2013.
- [34] A. Chipperfield, P. Fleming, H. Pohlheim, and C. Fonseca, *Genetic Algorithm Toolbox for use with MATLAB®*, V1.2. Department of Automatic Control and Systems Engineering University of Sheffield.
- [35] D. E. Goldberg and K. Deb, "A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms," in *Foundations of Genetic Algorithms*, vol. 1, G. J. E. RAWLINS, Ed. 1991, pp. 69–93.
- [36] D. Whitley, "The GENITOR Algorithm and Selection Pressure : Why Rank-Based Allocation of Reproductive Trials is Best," *Proc. third Int. Conf. Genet. algorithms*, pp. 116–121, 1989.
- [37] C. A. Coello Coello and E. M. Montes, "Constraint-handling in genetic algorithms through the use of dominance-based tournament selection," *Adv. Eng. Informatics*, pp. 193–203, 2002.
- [38] W. M. Spears and K. A. De Jong, "An Analysis of Multi-Point Crossover," *Found. Genet. Algorithms*, vol. 1, pp. 301–315, 1991.
- [39] W. M. Spears and K. A. De Jong, "On the virtues of parameterized uniform crossover," *Nav. Res. LAB Washingt. DC*, 1995.
- [40] D. M. Tate and A. E. Smith, "Expected Allele Coverage and the Role of Mutation in Genetic Algorithms," *Int. Comput. Games Assoc.*, 1993.
- [41] G. F. Grether, "Environmental change, phenotypic plasticity, and genetic compensation," *Am. Nat.*, vol. 166, no. 4, 2005.
- [42] E. Buglo *et al.*, "Genetic compensation in a stable slc25a46 mutant zebrafish: A case for using F0 CRISPR mutagenesis to study phenotypes caused by inherited disease," *PLoS One*, vol. 15, no. 3, pp. 1–19, 2020.
- [43] H. Mühlenbein and D. Schlierkamp-Voosen, "Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm," *Evol. Comput.*, vol. 1, pp. 25–49, 1993.
- [44] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002.
- [45] J. M. Dieterich and B. Hartke, "Empirical Review of Standard Benchmark Functions Using Evolutionary Global Optimization," *Neural Evol. Comput. Cornell Univ.*, 2012.
- [46] S. Schneider and L. Excoffier, "Estimation of past demographic parameters from the distribution of pairwise differences when the mutation rates vary among sites: Application to human mitochondrial DNA," *Genetics*, vol. 152, no. 3, pp. 1079–1089, 1999.

Anexo A

Código em *Matlab*®

Neste Anexo apresenta-se o código em *Matlab*® com a implementação do algoritmo genético para dimensionamento do transformador de distribuição. Em A.1 encontram-se os parâmetros necessários descritos no subcapítulo 2.1. Em A.2 encontra-se a função objetivo, ou seja, as equações que caracterizam o transformador, descritas no subcapítulo 2.2. Em A.3 encontra-se o *script* do algoritmo genético na sua versão base. Em A.4 encontra-se a função de seleção por torneio. Em A.5 encontra-se a função crossover. Em A.6 encontra-se a função mutação (versão base). Em A.7 encontra-se a função elitismo. Em A.8 encontra-se a função que encontra o melhor valor possível de cada corrida. Em A.9 a função critério de paragem, neste caso por *stall*. Em A.10 encontra-se a função de mutação com compensação genética. Por fim, em A.11, o *script* do algoritmo genético com intervalo adaptativo.

A.1 – Parâmetros do transformador

```
% Transformer design data

% 2.5.1 - Description Variables
f = 50; % Frequency [Hz]
HVCC = 'delta'; % Connection of HV winding [delta or star]
LVCC = 'star'; % Connection of LV winding [delta or star]
Sn = 630E3; % Rated Power [VA]
V_HV1 = 20000; % First line voltage of HV winding [V]
V_HV2 = 6600; % Second rated line voltage of HV winding [V]
V_LV = 400; % Rated line voltage of LV winding [V]

% 2.5.2 - Special Variables
BIL_HV = 125e3; % Basic insulation level of HV winding [V]
BIL_LV = 10e3; % Basic insulation level of LV winding [V]
Induced_max = 6E3; % [V] max induced voltage the layer of insulation
0.28mm
Impulse_max = 23.5E3; % [V] max impulse voltage the layer of insulation
0.28mm
CSF = 0.965; % Core stacking factor
g_CP = 9.87; % Weight per unit area of corrugated panels [kg/m^2]
g_DS = 1250; % Mass density of duct strips [kg/m^3]
g_HV = 8856; % Mass density of HV winding (8856 cooper) [kg/m^3]
g_LV = 8856; % Mass density of LV winding (8856 cooper) [kg/m^3]
g_MM = 7650; % Mass density of magnetic steel [kg/m^3]
```

```

g_O = 870; % Mass density of mineral oil [kg/m^3]
LDSP_HV = 1; % Layer direction space factor of HV winding
LDSP_LV = 0.909; % Layer direction space factor of LV winding
ta_max = 45; % Maximum ambient temperature [°C]
TDSP_HV = 0.98; % Turns direction factor of HV winding
tw_max = 105; % Maximum winding temperature [°C]
rho_HV = 2.0968e-8; % Resistivity of HV winding (Cu) [ohm.m]
rho_LV = 2.0968e-8; % Resistivity of LV winding (Cu) [ohm.m]
FD_sat = 1.7; % Magnetic saturation [T] ref: Electrical Machines (2013)

% 2.5.3 - Default Variables
EdL_HV = 266; % Eddy current loss of HV winding [W]
EdL_LV = 399; % Eddy current loss of LV winding [W]
LL_g = 8900; % Guaranteed load loss [W]
NLL_g = 1100; % Guaranteed no-load loss [W]
Taps_HVmax = 5; % Upper limits of taps of HV winding [%]
Taps_HVmin = 5; % Lower limits of taps of HV winding [%]
Ukg = 6; % Guaranteed impedance voltage [%]
mu_0 = 4 * pi * 1E-7; % Permeability of free space [H/m]
TH = 1015E-3; % [m] tank height constructional reasons

% 2.5.4 - Cost Variables
A = 13.39; % No-load loss factor (cost rate) [$/W]
B = 2.09; % Load loss (cost rate) [$/W]
C_Lab = 4541; % Labour cost [$]
CRM = 1236; % Cost of rest of materials CHECK THIS?!?!? [$]
SM = 35; % Sales margin [%]
uc_1 = 12.01; % Unit cost of LV winding [$/kg]
uc_2 = 12.01; % Unit cost of HV winding [$/kg]
uc_3 = 6.01; % Unit cost of magnetic steel [$/kg]
uc_4 = 7.72; % Unit cost of insulating paper [$/kg]
uc_5 = 8.58; % Unit cost of duct strips [$/kg]
uc_6 = 1.72; % Unit cost of mineral oil [$/kg]
uc_7 = 1.03; % Unit cost of sheet steel [$/kg]
uc_8 = 1.20; % Unit cost of corrugated panels [$/kg]

% 2.5.5 - Various Variables
CCEE = 3e-3; % Core to coil each end [m]
D_HVC = 39e-3; % Distance between HV winding and core [m]
D_LVC = 6.5e-3; % Distance between LV winding and core [m]
D_Panel = 220e-3; % Width of corrugated panel [m]
Ducts_HV = 12; % Number of ducts of HV winding
Ducts_LV = 10; % Number of ducts of LV winding
FN_Ducts_HV = 0.320; % Tables - corresponding to 12 ducts
Dw = 15e-3; % Width of cooling ducts [m]
DWPG_HV = 35e-3; % Width of HV winding duct strip plus gap [m]
DWPG_LV = 25e-3; % Width of LV winding duct strip plus gap [m]
HCP = 800e-3; % Height of corrugated panel [m]
I_HV_HV = 6.64e-3; % Insulation outside external winding [m]
I_HV_LV = 6.92e-3; % Insulation between LV winding and HV winding [m]
I_LV_C = 1.5e-3; % Insulation between LV winding and core [m]
K = 9e-3; % Distance between two adjacent cores [m]
Pitch = 44e-3; % Distance between two adjacent fins [m]
T_DS = 3e-3; % Thickness of duct strips (without insulation) [m]
TE = 38.1e-3; % Tolerances and elongation of coil [m]
TI_HV = 1.4e-3; % Insulation of HV taps [m]
TLT_HV = 14.2e-3; % Total thickness of the HV leads [m]
TLT_LV = 12.48e-3; % Total thickness of the LV leads [m]
V_CT = 25e-3; % Volume of oil conservator [m^3]

```

```

% 2.5.6 - Values of conductor cross-section calculation variables for the
630 kVA
%transformer
HVCM = 'Copper'; % Material of HV conductor
LVCM = 'Copper'; % Material of LV conductor
Type_HV = 'Round wire'; % Type of HV conductor
Type_LV = 'Foil'; % Type of LV conductor
deltaD_HV = 0.111e-3; % Insulation of HV conductor [m]

```

A.2 – Equações de dimensionamento do transformador

```

function [CTM, TOC, dvar] = fCTD(ivar)

% Load constants
run constants_CTD.m

%% DESIGN VARIABLES

% 1 - Number of turns low voltage turns_LV
turns_LV = ivar(1,1);

% 2 - Width of core leg D [m]
D = ivar(1,2);

% 3 - Magnetic Induction FD_max [Tesla] (1 Tesla = 10000 Gauss)
FD_max = ivar(1,3);

% 4 - Height of core window G [m]
G = ivar(1,4);

% 5 - Cross-section area LV conductor area_LV [m^2]
t_LV = ivar(1,5); % Thickness of LV conductor [m] default 0.79e-3m

% 6 - Cross-section area HV conductor area
d_HV = ivar(1,6); % Diameter of HV conductor [m]

% CALCULATIONS - EVERY CALCULATION IN S.I. UNITS

%% 2.6 - Calculation of Volts per Turn and Thickness of Core Leg

% 2.6.1 - Calculation of Volts per Turn

Vp_LV = V_LV / sqrt(3); % [V]

VPT = Vp_LV / turns_LV; % [V] where Vp_LV (V) is the rated phase voltage of
the
% LV winding and turns_LV is the number of turns of the LV winding

% 2.6.2 - Calculation of Thickness of Core Leg

```

```

E_u = ( sqrt(2) * VPT ) / ( 4 * pi * f * FD_max * CSF * D); % [m] where VPT
is
% the Volts per turn [V], f the frequency [Hz], FD_max the maximum magnetic
% induction [Tesla], CSF is the core stacking factor and D is the width of
the
% core [m]

%% 2.7 - Calculation of Layer of insulation

% 2.7.1 - Layer of insulation of LV Winding

% Empirical rule (using tables)
I_LVL = 0.28E-3; % [m] for copper foil with thickness between 0.4 and 1 mm

% 2.7.2 - Layer of insulation of HV Winding

% Empirical rule (using tables)
I_HVL = 0.28E-3; % [m] for copper wire with diameter less than 2 mm

%% 2.8 - calculations of Winding and Core Dimensions

% 2.8.1 - LV Winding dimension, HV Winding dimension, Window width (small
% and large) and check insulations are correctly selected

% a) LV Winding dimension
TurnsMain_LV = turns_LV; % since there are no taps at the LV winding

Layers_LV = TurnsMain_LV; % since the LV winding is made of foil

TD_LV = G - 2 * CCEE - 2 * D_LVC; % [m] Width of LV Winding

BLD_LV = (t_LV + I_LVL) * (Layers_LV / LDSP_LV); % [m] thickness of LV
winding

SPLD_LV = BLD_LV + I_LV_C + I_HV_LV; % [m] total LV winding thickness with
insulations

% b) HV Winding dimension

% HV connection type
if HVCC == 'delta'
    Vp_HV1 = V_HV1; % HV windings delta-connected
    Vp_HV2 = V_HV2; % HV windings delta-connected
elseif HVCC == 'star'
    Vp_HV1 = V_HV1/sqrt(3); % HV windings star-connected
    Vp_HV2 = V_HV2/sqrt(3); % HV windings star-connected
end

Vp_HV_maxtap = Vp_HV1 * (1 + Taps_HVmax/100); % [v] max Voltage at max tap

turns_HV_max = Vp_HV_maxtap / VPT; % max number of turns at max voltage

TurnsMain_HV = turns_HV_max * (Vp_HV1 / Vp_HV_maxtap); % rated number of
turns

TD_HV = G - 2 * CCEE - 2 * D_HVC; % [m] width of th HV layer

TurnWidth_HV = d_HV + deltaD_HV; % [m] turn width HV

```

```

TurnsPerLayer_HV = (TD_HV / TurnWidth_HV - 1) * TDSP_HV; % turns per layer
HV

TurnsPerLayer_HV_subcoil = floor(TurnsPerLayer_HV / 3); % sub coil 6.6kV

TurnsPerLayer_HV = 3 * TurnsPerLayer_HV_subcoil; % turns final HV coil

Layers_HV = round( turns_HV_max / TurnsPerLayer_HV ); % layers HV winding

BLD_HV = (TurnWidth_HV + I_HVL) * (Layers_HV / LDSP_HV) + TI_HV; % [m]
thickness HV winding

SPLD_HV = BLD_HV + I_HV_HV; % [m] total thickness HV winding

% c) Windows width (small and large)

F1 = SPLD_LV + SPLD_HV; % [m] width of the small window

F2 = 2 * F1; % [m] width of the large window

% d) check insulations

% the layer of insulation 0.28mm can withstand 6 kV of induced voltage and
% 23.5 kV max impulse voltage

Induced_LV = VPT * 2 * 2; % [V]

Impulse_LV = (2 * BIL_LV)/turns_LV; % [V]

Induced_HV = VPT * 2 * TurnsPerLayer_HV * 2; % [V]

Vp_HV_mintap = Vp_HV1 * (1 - Taps_HVmin/100); % [V] min tap voltage

Impulse_HV = (2 * BIL_HV * TurnsPerLayer_HV) / (TurnsMain_HV *
(Vp_HV_mintap / Vp_HV1));

%% 2.9 Calculation of core weight and No-Load Loss

% mean turn length of the small individual core [Hatziargyriou et al. 1998]
CMT1 = 2 * (F1 + G) + 2 * pi * ((E_u / 2) + 3.5e-3) - 8 * 3.5e-3; % [m]

% weight of the small individual core
SCW = CMT1 * D * E_u * CSF * g_MM; % [kg]

% mean turn length of the large individual core [Hatziargyriou et al. 1998]
CMT2 = 2 * (F2 + G) + 2 * pi * (E_u / 2 + 3.5e-3) - 8 * 3.5e-3; % [m]

% weight of the large individual core
LCW = CMT2 * D * E_u * CSF * g_MM;

% total weight of the magnetic material
w_3 = 2 * (SCW + LCW); % [kg]

% Specific no-load loss
SNLL_TF = 0.08829*exp(0.00017*(FD_max*10000)) + 5.906e-
10*exp(0.001124*(FD_max*10000)); % [W/kg]

```

```

% R-square: 0.9997
% RMSE: 0.01063
% Adaptado do artigo [Hatziargyriou et al. 1998]

% transformer no load loss
NLL = w_3 * SNLL_TF; % [W]

%% 2.10 - Calculation of inductive part of impedance voltage

% the mean lengths of the coil ML and MW
ML = D + 2 * CCEE; % [m]
MW = 2 * E_u + K; % [m]

% the equivalent diameter of the coil
DMC = (2 * (ML + MW) - 10.992e-3) / pi; % [m]

% the equivalent external diameter (include paper I_LV_C)
D3 = DMC + 2 * I_LV_C; % [m]

% the area corresponding to D3
A3 = (pi * D3^2) / 4; % [m^2]

% the external diameter of LV winding w/o cooling ducts
D5 = D3 + 2 * BLD_LV; % [m]

% the area corresponding to D5
A5 = (pi * D5^2) / 4; % [m^2]

% dimension LG_LV of cooling ducts
LG_LV = MW; % [m]

% the area of cooling ducts LV winding
A6 = Ducts_LV * 3.33e-3 * LG_LV * 2; % [m^2]

% the area of LV winding w/ cooling ducts
A7 = A5 + A6; % [m^2]

% the diameter corresponding to the winding w/ cooling ducts
D7 = sqrt((4 * A7) / pi); % [m]

% the inner diameter of the HV winding
D9 = D7 + 2 * I_HV_LV; % [m]

% the area corresponding to A9
A9 = (pi * D9^2) / 4; % [m^2]

% Equivalent external diameter HV winding (without cooling ducts)
D11 = D9 + 2 * BLD_HV; % [m^2]

% area corresponding to D11
A11 = (pi * D11^2) / 4; % [m^2]

% dimension of LG_HV cooling ducts of HV winding
LG_HV = LG_LV + 2 * BLD_LV + 2 * I_HV_LV; % parece haver uma gralha nesta
formula [m^2]

% the area of the HV cooling ducts is:
A12 = Ducts_HV * 3.33E-3 * LG_HV * 2; % [m^2]

```

```

% the area of the HV winding
A13 = A11 + A12; % [m^2]

% the diameter corresponding to A13 (HV winding diameter)
D13 = sqrt((4 * A13) / pi);

% the factor k_L
k_L = (-2 * sqrt(A3) + sqrt(A7) + sqrt(A9)) / (3.54 * TD_LV); %
adimensional

% the dimension L17
L17 = (k_L^2 + k_L + 1) * TD_LV; % [m]

% the factor k_P
k_P = ( 2 * sqrt(A13) - sqrt(A7) - sqrt(A9) ) / (3.54 * TD_HV); %
adimensional

% the dimension L21
L21 = (k_P^2 + k_P + 1) * TD_HV; % [m]

% the dimension LH23
LH23 = L17 + L21; % [m]

% L25 inductance based on L17 that is based on LV winding
L25 = ( (A5 - A3) * 0.396 * mu_0 ) / L17; % [H]

% L26 inductance based on L21 that is based on the HV winding
L26 = ( (A11 - A9) * 0.396 * mu_0 ) / L21; % [H]

% L27 inductance based on LH23 that is the sum of L17 and L21
L27 = ( (A9 - A7) * 2 * mu_0 ) / LH23; % [H]

% L28 inductance (ducts LV)
FN_Ducts_LV = 0.318; % Tables!!! corresponding to 10 ducts PUT IN VARIABLES
L28 = ( A6 * FN_Ducts_LV * mu_0 ) / L17; % [H]

% L29 inductance (ducts HV)
L29 = ( A12 * FN_Ducts_HV * mu_0 ) / L21; % [H]

% TOTAL inductance
L_tot = L25 + L26 + L27 + L28 + L29; % [H]

% the phase current star connected LV winding
Ip_LV = Sn / ( 3 * Vp_LV ); % [A]

% inductive part of the impedance voltage
IX = ( Ip_LV * 2 * pi * f * turns_LV^2 * L_tot ) / Vp_LV; % [adimensional]

%% 2.11 - Calculation of load loss

% mean turn of LV winding
MT_LV = (( D3 + D7 ) / 2) * pi; % [m]

% length of LV winding
CL_LV = MT_LV * Layers_LV * 3; % [m]

% cross section of LV winding

```

```

area_LV = TD_LV * t_LV; % [m^2]

% resistance of the LV winding
R_LV = (rho_LV * ( CL_LV / 3 ) )/area_LV; % [ohm]

% load loss LV winding
LL_LV = 3 * R_LV * Ip_LV^2 * 1.04; % [W]

% mean turn of HV winding
MT_HV = ( (D9 + D13) / 2 ) * pi; % [m]

% length of HV winding rated at 20kV
CL_HV_1 = MT_HV * TurnsMain_HV * 3; % [m]

% cross section of HV winding
area_HV = ( pi * d_HV^2 ) / 4; % [m^2]

% phase current delta-connected HV winding
Ip_HV_1 = Sn / ( 3 * Vp_HV1 ); % [V]

% the resistance of the HV winding (20 kV)
R_HV1 = ( rho_HV * ( CL_HV_1 / 3 ) ) / area_HV; % [ohm]

% the load loss of the HV winding at 20kV
LL_HV_1 = 3 * R_HV1 * Ip_HV_1^2 * 1.06; % [W]

% the transformer load loss at 20kV
LL_1 = LL_LV + LL_HV_1 + EdL_LV + EdL_HV; % [W]

% minimum high voltage
HVp_min = Vp_HV2 * (1 - Taps_HVmin / 100); % [V]

% number of turn of the minimum voltage
Turns_HV_min = round( TurnsMain_HV * (HVp_min / Vp_HV1)); % adimensional

% length of HV winding minimum high voltage
CL_HV_2 = MT_HV * Turns_HV_min * 3; % [m]

% phase current delta connection minimum voltage
Ip_HV_2 = Sn / (3 * HVp_min); % [A]

% current in each subcoil
Ip_HV_2_subcoil = Ip_HV_2 / 3; % [A]

% resistance of HV winding for the minimum voltage
R_HV2 = ( rho_HV * ( CL_HV_2 / 3 ) ) / area_HV; % [rho]

% load loss of the sub coil minimum HV voltage
LL_HV_2_subcoil = 3 * R_HV2 * Ip_HV_2_subcoil^2 * 1.06; % [W]

% load loss minimum voltage
LL_HV_2 = 3 * LL_HV_2_subcoil; % [W]

% total load loss at minimum voltage
LL_2 = LL_LV + LL_HV_2 + EdL_LV + EdL_HV; % [W]

% total weight of LV winding
w_1 = CL_LV * area_LV * g_LV * 1.05; % [kg]

```

```

% total weight of HV winding
w_2 = CL_HV_1 * (1 + Taps_HVmax / 100) * area_HV * g_HV * 1.08; % [kg]

%% 2.12 - Calculation of impedance voltage

% the ohmic part of impedance
IR = LL_1 / Sn; % [adimensional]

% impedance voltage
U_k = sqrt(IR^2 + IX^2); % [adimensional]

%% 2.13 - Calculation of coil length

% total thickness of cooling ducts
TCD = 2 * (Ducts_LV + Ducts_HV) * 3.33E-3; % [m]

% paper insulation thickness LV winding
OLI_LV = 1.5E-3 + I_LVL; % [m]

% paper insulation thickness HV winding
OLI_HV = Layers_HV * I_HVL; % [m]

% total length of the coil
TLC = ML + 2 * F1 + TCD + TLT_LV + TLT_HV + OLI_LV + OLI_HV + TE; % [m]

%% 2.14 - Calculation of tank dimensions

% tank length
TL = 2 * (4 * E_u + 3 * F1 + K) + K + 108E-3; % [m]

% tank width
TW = TLC + 38E-3; % [m]

% tank height
TH_min = G + 2 * E_u + 350E-3; % [m]

% mineral oil height
OH = TH; % [m]

%% 2.15 - Calculation of winding gradient and oil gradient

% area of the cooling ducts LV
DuctArea_LV = Ducts_LV * 2 * 2 * MW * TD_LV; % [m^2]

% the area of cooling ducts LV gap
GapDuctArea_LV = D7 * pi * TD_LV; % [m^2] por enrolamento

% total area of cooling ducts
TotalDuctArea_LV = DuctArea_LV + GapDuctArea_LV; % [m^2] por enrolamento

% loss in each LV winding
CoilLoss_LV = ( LL_LV + EdL_LV ) / 3; % [W] perda por enrolamento LV

% LV winding loss per surface
LPS_LV = CoilLoss_LV / TotalDuctArea_LV; % [W/m^2] potencia por area

```

```

% average copper temperature rise
ACR = tw_max - ta_max; % [K]

% calculation only admits average cooper temp rise of 60°C
Gra_LV = ((5.8-5.2)/(758.0182-671.4298)) * LPS_LV + 0.5474;

% average gradient between oil and LV winding
AvGra_LV = 2.09 * Gra_LV; % [K]

% area of the cooling ducts HV
DuctArea_HV = Ducts_HV * 2 * 2 * LG_HV * TD_HV; % [m^2]

% the area of cooling ducts HV gap
GapDuctArea_HV = D7 * pi * TD_HV; % [m^2] por enrolamento

% total area of cooling ducts HV
TotalDuctArea_HV = DuctArea_HV + GapDuctArea_HV; % [m^2] por enrolamento

% loss in each HV winding
CoilLoss_HV = ( LL_HV_2 + EdL_HV ) / 3; % [W] perda por enrolamento HV

% HV winding loss per surface
LPS_HV = CoilLoss_HV / TotalDuctArea_HV; % [W/m^2] potencia por area

% calculation only admits average cooper temp rise of 60°C
Gra_HV = ((5.8-5.2)/(758.0182-671.4298)) * LPS_HV + 0.5474;

% average gradient between oil and HV winding
AvGra_HV = 2.09 * Gra_HV; % [K]

% max gradient
MaxGra = max(AvGra_LV, AvGra_HV); % [K] maximo dos dis LV e HV

% the average oil temperature rise
AOR = ACR - MaxGra; % [K]

%% 2.16 - Calculation of Heat Transfer

% convection heat coefficient from Figure 2.13
% R-square: 0.9983
% RMSE: 2.354
TCC = 6.254 * AOR - 51.57; % [W/m^2] from figure TCC(AOR)

% radiation heat coefficient from Figure 2.13
% R-square: 0.9989
% RMSE: 2.78
TRC = 9.343 * AOR - 69.29; % [W/m^2] from figure TRC(AOR)

% heat transfer coef corrugated panels from Figure 2.14
% R-square: 0.99
% RMSE: 6.955
CPC = -5.488 -0.4832*(D_Panel * 1000) + 8.496*AOR + 0.003297*(D_Panel *
1000)^2 ...
-0.02355*(D_Panel * 1000)*AOR + 0.01829*AOR^2 -5.979e-06*(D_Panel *
1000)^3 ...
+ 4.234e-05*(D_Panel * 1000)^2*AOR -2.562e-05*(D_Panel * 1000)*AOR^2;
% [W/m^2] from Figure CPC(AOR, D_Panel)

```

```

% tank convection area
TCA = 2 * (TL + TW) * TH + 2 * TL * TW; % [m^2]

% heat transfer due to tank convection
TCL = TCA * TCC; % [W]

% tank radiation area
TRA = ( 2 * (TL + TW) + 4 * D_Panel * sqrt(2)) * OH; % [m^2]

% heat transfer due to tank radiation
TRL = TRA * TRC; % [W]

% number of corrugated panels across tank length
NCPTL = floor( (TL - 60E-3)/Pitch) + 1;

% number of corrugated panels across tank width
NCPTW = floor( (TW - 60E-3)/Pitch) + 1;

% total number of corrugated panels
NCP = 2 * (NCPTL + NCPTW);

% corrugated panels area
CPA = 2 * D_Panel * HCP * NCP; % [m^2]

% heat transfer corrugated panels
CPL = CPA * CPC; % [W]

% total heat transfer
TLRRT = TCL + TRL + CPL; % [W]

% transformer total loss
TTL_2 = NLL + LL_2; % [W]

%% 2.17 - Calculation of the weight of insulating materials

% LV

% the area of tube paper 1.5mm
S_LV_TP = MW * ( G - 2 * CCEE ) + D3 * pi * ( G - 2 * CCEE); % [m^2]

% the area of the layer insulation 0.28mm
S_LV_LI = MT_LV * ( G - 2 * CCEE) * Layers_LV; % [m^2]

% the area of the end ducts insulation 0.15mm
S_LV_EDI = MW * ( G - 2 * CCEE) * Ducts_LV * 2; % [m^2]

% the area of perimetric ducts insulation 0.15mm
S_LV_PDI = D7 * pi * ( G - 2 * CCEE); % [m^2]

% the area of extension paper insulation 0.41mm
S_LV_EPI = 2 * 2 * pi * D13 * ( ( G - 2 * CCEE) + 1.8 * BLD_HV); % [m^2]

% number of papers with thickness 0.28mm
NPGI = round((I_HV_LV - 3.3E-3 - 2 * 0.41E-3)/I_HVL);

% the area of gap insulation 0.28mm
S_LV_GI = D7 * pi * ( G - 2 * CCEE) * NPGI; % [m^2]

```

```

% HV

% the area of the layer of insulation 0.28mm
S_HV_LI = MT_HV * ((G - 2 * CCEE) + 4*19e-3) * Layers_HV * 1.25; % [m]

% the area of the end ducts 0.15mm
S_HV_EDI = LG_HV * (G - 2 * CCEE) * Ducts_HV * 2; % [m]

% the area of perimetric ducts 0.15mm
S_HV_PDI = D13 * pi * (G - 2 * CCEE); % [m]

% the area of insulation HV subcoils
S_HV_Sub = MT_HV * (G - 2 * CCEE) * 5; % [m]

% number of papers with thickness 0.28mm
NPEGI = round((I_HV_HV - 3.3e-3 - 2*0.41e-3)/I_HVL);

% the area of HV gap insulation 0.28mm
S_HV_GI = D13 * pi * (G - 2 * CCEE) * NPEGI; % [m^2]

% the area of the insulating board paper 1.5mm
S_HV_IBP = MT_HV * 40e-3 * Layers_HV; % [m^2]

% LV and HV weight insulating materials

% the weight insulating 1.5mm
WIM_1_5 = 3 * 1.1 * 1.95 * (S_LV_TP + S_HV_IBP); % [kg]

% the weight insulating 0.41mm
WIM_0_41 = 3 * 1.1 * 0.37 * S_LV_EPI; % [kg]

% the weight insulating 0.28mm
WIM_0_28 = 3 * 1.1 * 0.26 * (S_LV_LI + S_LV_GI + S_HV_LI + S_HV_Sub +
S_HV_GI); % [kg]

% the weight insulation 0.15mm
WIM_0_15 = 3 * 1.1 * 0.13 * (S_LV_EDI + S_LV_PDI + S_HV_EDI + S_HV_PDI); %
[kg]

% total weight of insulating materials
w_4 = WIM_1_5 + WIM_0_41 + WIM_0_28 + WIM_0_15; % [kg]

%% 2.18 - Calculation of the weight of the ducts

% number of duct strips LV
N_1 = round((MW / DWPG_LV) * Ducts_LV * 2);

% number of perimetric duct strips LV
N_2 = round((pi * D7) / DWPG_LV);

% number of duct strips HV
N_3 = round(((MW + 2 * BLD_LV) / DWPG_HV) * Ducts_HV * 2);

% number of perimeter duct strips HV
N_4 = round((pi * D13) / DWPG_HV);

```

```

% the total weight of duct strips
w_5 = 3 * 1.1 * g_DS * ( (N_1 + N_2 + N_3 + N_4) * (G - 2 * CCEE) * Dw *
T_DS); % [kg]

%% 2.19 - Calculation of the weight of oil

% the volume of corrugated panels
V_CP = 8E-3 * HCP * D_Panel * NCP; % [m^3]

% the volume of the LV and HV winding
V_Wd = ( w_1 + w_2 ) / g_LV; % [m^3]

% the volume of magnetic material
V_MM = w_3 / g_MM; % [m^3]

% the volume of the tank
V_T = TL * TW * OH; % [m^3]

% the volume of mineral oil
V_O = V_T + V_CT + V_CP - V_Wd - V_MM; % [m^3]

% weight of mineral oil
w_6 = 0.95 * g_O * V_O;

%% 2.20 - Calculation of the weight of sheet steel

% Área ótima para o volume do reservatório de óleo de determinado volume
A_CT = 2 * pi * ((V_CT / (2 * pi))^(1/3)) * (2 * (V_CT / (2 * pi))^(1/3))
+...
2 * pi * ((V_CT / (2 * pi))^(1/3))^2;

% Área total de painéis de aço (cuba e cilindro)
A_7 = TCA + A_CT;

% Considerando uma variação linear em que com 6.0419 m^2 temos 217.2 kg
w_7 = (217.2/6.0419)*A_7; % [kg]

%% 2.21 - Calculation of the weight of corrugated panels
w_8 = g_CP * CPA; % [kg]

%% 2.22 - Calculation of the cost of materials

% cost of LV winding
C_1 = uc_1 * w_1; % [$]

% cost of HV winding
C_2 = uc_2 * w_2; % [$]

% cost of magnetic material
C_3 = uc_3 * w_3; % [$]

% cost of insulating materials
C_4 = uc_4 * w_4; % [$]

% cost of duct strips
C_5 = uc_5 * w_5; % [$]

% cost of mineral oil

```

```

C_6 = uc_6 * w_6; % [$]

% cost os sheet metal
C_7 = uc_7 * w_7; % [$]

% cost of corrugated panels
C_8 = uc_8 * w_8; % [$]

% cost of main materials
CMM = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8; % [$]

%% 2.23 - Calculation of transformer manufacturing cost

% total cost of materials
CM = CMM + CRM; % [$]

% the transformer manufacturing cost
CTM = CM + C_Lab; % [$]

% Transformer bid price
BP = CTM / ( 1 - SM/100 ); % [$]

% Transformer sales margin
MS = BP - CTM; % [$]

% Transformer total owning cost
TOC = BP + A * NLL + B * LL_1; % [$]

%% VARIÁVEIS DEPENDENTES SUJEITAS A RESTRIÇÃO
% 1 - Tensão induzida, igualdade de expressão, restrição valor residual
dvar(1,1) = round(abs(Vp_LV - 4.44 * f * TurnsMain_LV * FD_max * CSF * D *
2 * E_u));

% 2 - Rácio de espiras, igualdade de expressão, restrição valor residual
dvar(1,2) = round(abs(Vp_HV1 / Vp_LV - TurnsMain_HV / TurnsMain_LV));

% 3 - Perdas em vazio, NLL
dvar(1,3) = NLL;

% 4 - Perdas em carga, LL_1
dvar(1,4) = LL_1;

% 5 - Perdas em carga, LL_2
dvar(1,5) = LL_2;

% 6 - Perdas totais, NLL + LL_1
dvar(1,6) = NLL + LL_1;

% 7 - Perdas totais, NLL + LL_2
dvar(1,7) = NLL + LL_2;

% 8 - Impedância de curto-circuito, U_k
dvar(1,8) = U_k;

% 9 - Transferência de calor, TLRTT - TTL2, restrição maior que zero
dvar(1,9) = TLRTT - TTL_2;

```

```
% 10 - Aumento de temperatura, AOR
dvar(1,10) = AOR;

% 11 - Tensão induzida LV, Induced_LV
dvar(1,11) = Induced_LV;

% 12 - Tensão induzida HV, Induced_HV
dvar(1,12) = Induced_HV;

% 13 - Tensão de impulso, Impulse_LV
dvar(1,13) = Impulse_LV;

% 14 - Tensão de impulso, Impulse_HV
dvar(1,14) = Impulse_HV;

% 15 - Dimesoes do cuba, TH_min
dvar(1,15) = TH_min;

end % function
```

A.3 – Script Algoritmo genético base

```
% Genetic Algorithm based transformer design
clear all % Limpa variaveis
close all
clc % Limpa consola
tic % Inicio contagem tempo

%% 1 - Dados, Restrições e Matrizes

% A - Parametros entrada GA

% Numero de runs
Nruns = 43;

% Tamanho da população
ps = 200;

% Elitismo
eli = 0.05;

% Crossover
xo = 1;

% Mutação
mu = 0.0005 ;

% Stall
stall = 50;

% B - Intervalo de entrada de procura (minimos e maximo de procura)

% 1 - Numero de espiras BT, turns_LV
```

```
IN_turns_LV_min = 1; % Impossibilidade fisica, valor minimo
IN_turns_LV_max = 30; % Valor flexivel

% 2 - Lagura do nucleo, D
IN_D_min = 0; % Impossibilidade fisica, valor minimo
IN_D_max = 0.5; % Valor flexivel [m]

% 3 - Indução magnética, FD_max
IN_FD_min = 1.1; % Indução magnetica minima [T] valores minimo de
interpolação
IN_FD_sat = 1.8; % Valor acima de 1.7 T (valor considerado normal para TD)
[T]

% 4 - Altura da janela do nucleo, G
IN_G_min = 0; % Impossibilidade fisica, valor minimo
IN_G_max = 0.5; % Valor flexivel [m]

% 5 - Espessura da fita condutora enrolamento BT, t_LV [m]
IN_t_LV_min = 0.4E-3; % Valor minimo, dados limitados
IN_t_LV_max = 1E-3; % Valor maximo, dados limitados

% 6 - Diametro do fio condutor enrolamento AT, d_HV [m]
IN_d_HV_min = 0; % Impossibilidade fisica, valor minimo
IN_d_HV_max = 2E-3; % Valor maximo, dados limitados

% C - Restrições das variaveis independentes

% 1 - Numero de espiras BT, turns_LV
turns_LV_min = 1; % Impossibilidade fisica
turns_LV_max = 100; % Valor arbitrario (grande)

% 2 - Lagura do nucleo, D
D_min = 1E-4; % Impossibilidade fisica [m]
D_max = 1; % Valor arbitrario (grande) [m]

% 3 - Indução magnética, FD_max
FD_min = 1.1; % Indução magnetica minima valores minimo de interpolação [T]
FD_sat = 1.7; % Saturação magnetica maxima considerada maioritariamente [T]

% 4 - Altura da janela do nucleo, G
G_min = 1E-4; % Impossibilidade fisica [m]
G_max = 1; % Valor arbitrario (grande) [m]

% 5 - Espessura da fita condutora enrolamento BT, t_LV [m]
t_LV_min = 0.4E-3; % Restrição devido a dados limitados
t_LV_max = 1E-3; % Restrição devido a dados limitados

% 6 - Diametro do fio condutor enrolamento AT, d_HV [m]
d_HV_min = 1E-4; % Restrição devido a dados limitados
d_HV_max = 2E-3; % Restrição devido a dados limitados

% D - Lista de variaveis dependentes sujeitas a restrição

% 1 - Tensao induzida, igualdade de expressao, restrição valor residual
dvar1_min = -0.001;
dvar1_max = 0.001;

% 2 - Racio de espiras, igualdade de expressao, restrição valor residual
```

```

dvar2_min = -0.001;
dvar2_max = 0.001;

% 3 - Perdas em vazio, NLL
NLL_g = 1100; % Guaranteed no-load loss IEC 60076-1 [W]
NLL_min = 0; % Impossibilidade fisica
NLL_max = 1.15 * NLL_g; % Valor máximo IEC 60076-1 [W]

% 4 - Perdas em carga, LL_1
LL_g = 8900; % Guaranteed load loss [W]
LL_min = 0; % Impossibilidade fisica
LL_max = 1.15 * LL_g; % Valor máximo IEC 60076-1 [W]

% 5 - Perdas em carga, LL_2
% Identico a 4.

% 6 - Perdas totais, NLL + LL_1
TL_min = 0; % Impossibilidade fisica
TL_max = 1.1 * (NLL_g + LL_g); % Valor máximo IEC 60076-1 [W]

% 7 - Perdas totais, NLL + LL_2
% Identico a 6.

% 8 - Impedancia de curto-circuito, U_k
Ukg = 6; % Guaranteed impedance voltage [%]
U_k_min = (0.9 * Ukg/100); % Valor minimo IEC 60076-1 [W]
U_k_max = (1.1 * Ukg/100); % Valor máximo IEC 60076-1 [W]

% 9 - Transferencia de calor, TLRTT, restricao maior que zero
dvar9_min = 0; % Capacidade de transferencia de calor tem de ser maior que
perdas
dvar9_max = 1.1 * (NLL_g + LL_g); % Valor arbitrário (transferencia de
calor em excesso a dobrar) [W];

% 10 - Aumento de temperatura, AOR
AOR_min = 0; % Tem de haver o minimo aumento de temperatura [°C]
AOR_max = 60; % max top-oil temperature rise is 60°C according to IEC 60076-
2

% 11 - Tensão induzida LV, Induced_LV
Induced_min = 0; % [V] Impossibilidade fisica
Induced_max = 6E3; % [V] max induced voltage the layer of insulation 0.28mm

% 12 - Tensao induzida HV, Induced_HV
% Identico a 11.

% 13 - Tensao de impulso, Impulse_LV
Impulse_min = 0; % [V] Impossibilidade fisica
Impulse_max = 23.5E3; % [V] max impulse voltage the layer of insulation
0.28mm

% 14 - Tensão de impulso, Impulse_HV
% Identico a 13.

% 15 - Dimesoes do cuba, TH_min
TH_low = 0; % Impossibilidade fisica
TH = 1015E-3; % [m] tank height constructional reasons

```

```

% E - Matrizes de dados
% Dados de entrada das var independentes [x_min y_min; x_max y_max]
IN_ivar = [IN_turns_LV_min IN_D_min IN_FD_min IN_G_min IN_t_LV_min
IN_d_HV_min; ...
IN_turns_LV_max IN_D_max IN_FD_sat IN_G_max IN_t_LV_max IN_d_HV_max];

% Restrições das variáveis independentes [x_min y_min; x_max y_max]
r_ivar = [turns_LV_min D_min FD_min G_min t_LV_min d_HV_min; ...
turns_LV_max D_max FD_sat G_max t_LV_max d_HV_max];

% Restrições das variáveis dependentes [x_min y_min; x_max y_max]
r_dvar = [dvar1_min dvar2_min NLL_min LL_min LL_min TL_min TL_min U_k_min
dvar9_min AOR_min Induced_min Induced_min Impulse_min Impulse_min TH_low;
...
dvar1_max dvar2_max NLL_max LL_max LL_max TL_max TL_max U_k_max
dvar9_max AOR_max Induced_max Induced_max Impulse_max Impulse_max TH];

%% 2 - População inicial
% Numero de variáveis
var = length(IN_ivar);

% Numero de gerações maximo (regra de x100)
ng = 100 * var;

% Runs individuais
for k = 1:Nruns

% População inicial
x_i = zeros(ps,var);
for i = 1:ps
for j = 1:var
x_i(i,j) = (IN_ivar(2,j) - IN_ivar(1,j))*rand + IN_ivar(1,j);
if j == 1
x_i(i,j) = round(x_i(i,j)); % Numero de espiras inteiro
end
end
end

%% 3 - Valores de Y da pop inicial
% G - Inicio de loop do GA
dvar_i = zeros(ps,15); % variáveis dependentes geração N-1
dvar_i_c = zeros(ps,15); % variáveis dependentes geração N
for i = 1:ng % for das gerações

if i == 1 % Diferente na primeira iteração
for j=1:ps
[CTM, TOC, dvar] = fCTD(x_i(j,:));

dvar_i(j,:) = dvar; % variáveis dependentes p/ indexes

% Consoante o que se quer minimizar:
% CTM - custo de fabrico
% TOC - custo total de posse
if CTM > 0
Y(j,1) = CTM;
else
Y(j,1) = NaN;

```

```

        end

    end

end

%% 4 - Torneio de índices de índices
ii = tournament(Y, x_i, r_ivar, dvar_i, r_dvar);

%% 5 - Crossover
x_c=x_i(ii,:); % Genes para fazer crossover (do torneio)

% Matriz de genes para descendentes cruzados
x_ch=zeros(ps,var);

% Crossover
for prc=1:(ps*xo)/2 % fraccão xo a população
    i1=1+2*(prc-1); % 1 3 5 etc
    i2=2+2*(prc-1); % 2 4 6 etc
    g1=x_c(i1,:); %one chromossome
    g2=x_c(i2,:); %another chromossome
    cp=ceil((var-1)*rand); % crossover point, random number form range
[1; nn-1]

    % construção dos 2 descendentes:
    g1ch=xover(g1,g2,cp);
    g2ch=xover(g2,g1,cp);

    x_ch(i1,:)=g1ch; % 1 3 5 etc
    x_ch(i2,:)=g2ch; % 2 4 6 etc
end
for j=prc+1:ps
    x_ch(j,:) = x_c(j,:);
end
x_c=x_ch; % nova geração com crossover

%% 6 - Mutação
for j=1:ps
    if rand < mu
        [j_m, x_c_m] = mutation(r_ivar);
        x_c(j,j_m)=x_c_m;
    end
end

%% 7 - Valores de Y da nova geração após crossover e mutação
% Novos valores de Y, nova geração
Y_c=zeros(ps,1);
% Calculo dos valores Y nova geração
for j=1:ps
    [CTM, TOC, dvar] = fCTD(x_c(j,:));

    dvar_i_c(j,:) = dvar; % variáveis dependentes p/ indexes

    % Consoante o que se quer minimizar:
    % CTM - custo de fabrico
    % TOC - custo total de posse
    if CTM > 0
        Y_c(j,1) = CTM;
    end
end

```

```

        else
            Y_c(j,1) = NaN;
        end

    end

%% 8 - Elitismo
x_c = elitism(Y_c, Y, x_c, dvar_i_c, x_i, dvar_i, r_ivar, r_dvar, eli);

%% 9 - Nova geração final
x_i = x_c;

%% 10 - Calculo dos valores Y (target)
for j=1:ps
    [CTM, TOC, dvar] = fCTD(x_i(j,:));

    dvar_i(j,:) = dvar; % variaveis dependentes p/ indexes

    % Consoante o que se quer minimizar:
    % CTM - custo de fabrico
    % TOC - custo total de posse
    if CTM > 0
        Y(j,1) = CTM;
    else
        Y(j,1) = NaN;
    end

end

%% 10 - Melhor possivel
[Y_cB, X_cB, dvar_B] = bestpossible(Y, x_i, dvar_i, r_ivar, r_dvar);

%% 11 - Junta o melhor valor à lista
Y_i(k,i) = Y_cB; % Melhor valor para cada iteração

X_i(k,:) = X_cB(1,:); % Melhor configuração para cada iteração

X_ii(k,:) = dvar_B(1,:); % Variaveis dependentes com restrição

Y_i(Y_i==0) = NaN; % Substitui 0 por NaNs

%% 12 - Critérios de paragem
if i > 1
    [order] = stopcriterion(i, Y_i(k,:), stall);
    if order == 1
        break
    end
end

end % end for das gerações

clearvars -except IN_ivar r_ivar r_dvar var ps eli xo mu dFcn ng stall X_i
X_ii Y_i Nruns tic k

percem = (k/Nruns)*100;
clc
disp('Completed:')

```

```

percem

end % End for das iterações

% Tempo decorrido
elapsedTime = toc;

% % Save results file
fname = [ 'Nruns_' num2str(Nruns) '_Pop_' num2str(ps) '_Eli_' num2str(eli)
'_Xo_' num2str(xo) '_Mu_' num2str(mu) '_Stall_' num2str(stall) '.mat' ];

save(fname, 'X_i', 'X_ii', 'Y_i', 'elapsedTime');

```

A.4 – Função seleção por torneio

```

function ii = tournament(Y, x_ii, rx_ii, z_ii, rz_ii)

% Juntar variaveis
[~, by] = size(x_ii);
[~, dy] = size(z_ii);
x_i(:,1:by)=x_ii;
x_i(:,by+1:by+dy)=z_ii;

% Juntar restricoes
[~, ay] = size(rx_ii);
[~, cy] = size(rz_ii);
rx_i(:,1:ay)=rx_ii;
rx_i(:,ay+1:ay+cy)=rz_ii;

% explicação de funcionamento:
% tendo valores da função objectivo; das variaveis sujeitas a restrição e
% dos intervalos de restrição, aplicam-se as seguintes regras, por esta
% ordem, comparando as soluções duas a duas:

% 1 - É preferível uma solução dentro das restrições a uma solução fora das
restrições;
% 2 - No caso de duas soluções dentro das restrições, prefere-se a que tem
% melhor função objectivo
% 3 - No caso de duas soluções fora das restrições, prefere-se a que está
% mais perto da fronteira das restrições

% Y - valor da função objectivo
% x_i - valor das valores de aptidão
% rx_i - valor das restrições

% dimensao da população e dimensao das variaveis
[dpop, dvar] = size(x_i);

ii = zeros(1,dpop);
% Vamos precisar de "i" resultados de torneio para preencher indices
for i = 1:dpop
    % Dois indices aleatorios e diferentes da população
    ix(1,1) = ceil(rand * length(Y));

```

```

ix(1,2) = ceil(rand * length(Y));
while ix(1,1)==ix(1,2)
    ix(1,1) = ceil(rand * length(Y));
    ix(1,2) = ceil(rand * length(Y));
end

% Cria tabela de pertença à comunidade (dentro de restrições)
% se dentro das restrições =1, se fora =0
com = zeros(2,dvar);
for j = 1:2 % os dois índices aleatorios
    for k = 1:dvar % numero de variáveis de restrição
        if x_i(ix(1,j),k) >= rx_i(1,k) && x_i(ix(1,j),k) <= rx_i(2,k)
            com(j,k)=1;
        else
            com(j,k)=0;
        end
    end
end

% Cria tabela de diferenças relativas
rel = zeros(2,dvar);
for j = 1:2 % os dois índices aleatorios
    for k = 1:dvar % numero de variáveis de restrição
        % se var menor q limit inferior calcula distancia relativa
        if x_i(ix(1,j),k) < rx_i(1,k)
            rel(j,k) = abs(x_i(ix(1,j),k) - rx_i(1,k))/abs(rx_i(1,k));
        % se var maior q limit superior calcula distancia relativa
        elseif x_i(ix(1,j),k) > rx_i(2,k)
            rel(j,k) = abs(x_i(ix(1,j),k) - rx_i(2,k))/abs(rx_i(2,k));
        % se for igual a distancia é zero ;)
        else
            rel(j,k) = 0;
        end
    end
end

% Torneio de candidatos
% Se A pertencer e B NAO pertencer passa A
if sum(com(1,:))==2 && sum(com(2,:))~=2
    ii(i)=ix(1,1);
% Se A NAO pertencer e B pertencer passa B
elseif sum(com(1,:))~=2 && sum(com(2,:))==2
    ii(i)=ix(1,2);
% Se A e B pertencerem passa o que tiver menor valor de fcn obj
(minimização)
elseif sum(com(1,:))==2 && sum(com(2,:))==2
    % se A for <= que B, passa A
    if Y(ix(1,1)) <= Y(ix(1,2))
        ii(i)=ix(1,1);
    % caso contrario passa B
    else
        ii(i)=ix(1,2);
    end
% Se nenhum pertencer passa o que tiver menor violação
else
    % Se alguma das soluções violar relativamente, em soma, menos
    % restrições ganha
    if sum(rel(1,:)) > sum(rel(2,:))
        ii(i)=ix(1,2);
    elseif sum(rel(1,:)) < sum(rel(2,:))

```

```
        ii(i)=ix(1,1);
    % Caso violem as restricoes de igual forma, moeda ao ar
elseif rand >= 0.5
        ii(i)=ix(1,2);
else
        ii(i)=ix(1,1);
end

end

end

end
```

A.5 – Função *crossover*

```
function gch = xover(g1, g2, xpoint)
% Half-identical segment Physical Position (bp): 95546028-102882145
% Genetic distance: 5.71 cM Number of SNPs: 1294

gi(1:xpoint) = g2(1:xpoint);

gi(xpoint+1:length(g1)) = g1(xpoint+1:length(g1));

gch = gi;
```

A.6 – Função mutação

```
% função mutação com restrições

% j - determinar cromossoma a mutar
% v_m - valor da mutação ja dentro das restrições
% rx_i - matriz restrições

function [j, v_m] = mutation(rx_i)

[~,jr] = size(rx_i);

% gene aleatorio a mutar
j = ceil(rand * jr);

% valor da mutação dentro de restrições
v_m = rx_i(1,j)+(rx_i(2,j)-rx_i(1,j))*rand;

% Numero de espiras do enrolamento é inteiro
if j == 1
    v_m = round(v_m);
```

```
end
```

```
end
```

A.7 – Função elitismo

```
% função elitismo com restrições

% Protocolo:

% uma parte da geração velha passa para a geração nova, percentagem
% definida pelo utilizador. ou seja, existem N numero de vagas de
% individuos que passam da geração velha para a nova.
% i) passam para geração seguinte individuos que tenham os melhores valores
% e que cumpram as restrições ate um maximo de N individuos
% ii) saiem da nova ger os individuos com os piores valores que nao cumpram
% as restrições (ou apenas uma das restrições)

function [pop_ne] = elitism(val_n, val_v, x_n, dvar_n, x_v, dvar_v, r_ivar,
r_dvar, eli)

    % val_n - valores novos
    % val_v - valores velhos
    % pop_n - população nova
    % pop_v - população velha
    % rest - restrições
    % eli - % elitismo

%% 1 Tabela de cumprimento de restrições col 1 ivar e col 2 dvar
% pop velha
rest_ok_v = zeros(length(val_v),2);

% verifica o cumprimento das restrições pela população velha
for i=1:length(val_v)

    % diferenas min max de ivar
    i_min = x_v(i,:) - r_ivar(1,:);
    i_max = r_ivar(2,:) - x_v(i,:);

    % Verifica violação de restrições de ivar
    for j=1:length(i_min)
        if i_min(j) < 0
            rest_ok_v(i,1) = 1;
            break
        elseif i_max(j) < 0
            rest_ok_v(i,1) = 1;
            break
        end
    end
end

% diferenças min max dvar
d_min = dvar_v(i,:) - r_dvar(1,:);
d_max = r_dvar(2,:) - dvar_v(i,:);

% Verifica violação de restrições de dvar
for j=1:length(d_min)
```

```

        if d_min(j) < 0
            rest_ok_v(i,2) = 1;
            break
        elseif d_max(j) < 0
            rest_ok_v(i,2) = 1;
            break
        end
    end
end

end

%% 2 - Tabela de cumprimento de restrições col 1 ivar e col 2 dvar
% pop nova
rest_ok_n = zeros(length(val_n),2);

% verifica o cumprimento das restrições pela população nova
for i=1:length(val_n)

    % diferencas min max de ivar
    i_min = x_n(i,:) - r_ivar(1,:);
    i_max = r_ivar(2,:) - x_n(i,:);

    % Verifica violação de restrições de ivar
    for j=1:length(i_min)
        if i_min(j) < 0
            rest_ok_n(i,1) = 1;
            break
        elseif i_max(j) < 0
            rest_ok_n(i,1) = 1;
            break
        end
    end
end

% diferenças min max dvar
d_min = dvar_n(i,:) - r_dvar(1,:);
d_max = r_dvar(2,:) - dvar_n(i,:);

% Verifica violação de restrições de dvar
for j=1:length(d_min)
    if d_min(j) < 0
        rest_ok_n(i,2) = 1;
        break
    elseif d_max(j) < 0
        rest_ok_n(i,2) = 1;
        break
    end
end
end

end

%% 3 - Sorting ascendete da velha
[~, pos_v] = sort(val_v, 'ascend');

%% 4 - Sorting descendente da nova
[~, pos_n] = sort(val_n, 'descend');

%% 5 - Construção de matriz com elite
[~, cn] = size(x_n);
pop_ne = x_n;

```

```

Neli = round(eli * length(val_n)); % Numero de elites a passar

CGV = 0;
x_sub = zeros(Neli,cn);
y_sub = zeros(Neli,1);
for i = 1:length(pos_v)
    sum_rest_v = rest_ok_v(pos_v(i),1) + rest_ok_v(pos_v(i),2); % 0 se
nao
    % houver violacao das restricoes

    if sum_rest_v == 0 && CGV < Neli
        CGV = CGV + 1;
        x_sub(CGV,:) = x_v(pos_v(i),:);
        y_sub(CGV,:) = val_v(pos_v(i),:);
    end

end

%% 6 - Matriz substituida com elite
if CGV > 0
    I = 1;
    for j = 1:CGV
        for i = I:length(pos_n)
            sum_rest_n = rest_ok_n(pos_n(i),1) + rest_ok_n(pos_n(i),2);
% 0 se nao
            % houver violacao das restricoes

            if sum_rest_n > 0
                I = i + 1;
                pop_ne(pos_n(i),:) = x_sub(j,:);
            elseif y_sub(j,1) < val_n(pos_n(i))
                I = i + 1;
                pop_ne(pos_n(i),:) = x_sub(j,:);
                break
            end
        end
    end
end
end
end

end

```

A.8 – Função melhor valor possível

```

function [Y_Best, x_Best, d_Best] = bestpossible(Y, x_i, dvar_i, r_ivar,
r_dvar)

% Tabela de cumprimento de restrições col 1 ivar e col 2 dvar
rest_ok = zeros(length(Y),2);

% Tamanho população
[~, cx] = size(x_i);

% Tamanho var dependentes
[~, cd] = size(dvar_i);

```

```

% verifica o cumprimento das restrições pela população
for i=1:length(Y)

    % diferencas min max de ivar
    i_min = x_i(i,:) - r_ivar(1,:);
    i_max = r_ivar(2,:) - x_i(i,:);

    % Verifica violação de restrições de ivar
    for j=1:length(i_min)
        if i_min(j) < 0
            rest_ok(i,1) = 1;
            break
        elseif i_max(j) < 0
            rest_ok(i,1) = 1;
            break
        end
    end

    % diferencas min max dvar
    d_min = dvar_i(i,:) - r_dvar(1,:);
    d_max = r_dvar(2,:) - dvar_i(i,:);

    % Verifica violação de restrições de dvar
    for j=1:length(d_min)
        if d_min(j) < 0
            rest_ok(i,2) = 1;
            break
        elseif d_max(j) < 0
            rest_ok(i,2) = 1;
            break
        end
    end

end

% Sorting ascendete
[~, posicao] = sort(Y, 'ascend');

% Encontra melhor valor que cumpre as restrições
flag = 0;
for i=1:length(posicao)
    sum_rest = rest_ok(posicao(i),1) + rest_ok(posicao(i),2); % 0 se nao
    % houver violacao das restricoes

    if sum_rest == 0
        Y_Best = Y(posicao(i),1);
        x_Best = x_i(posicao(i),:);
        d_Best = dvar_i(posicao(i),:);
        flag = 1;
        break
    end
end

% Caso não haja um melhor possivel
if flag ==0
    Y_Best = NaN;
    x_Best(1,cx) = NaN;
    d_Best(1,cd) = NaN;
end

```

```
end
```

```
end
```

A.9 – Função critério de paragem

```
function [order] = stopcriterium(i, Y, stall)

% Função critério de paragem - termina calculo quando satisfeito critério
%% 1 - Critério de paragem por stall
if i > stall && isnan(Y(1,i))==0
    if Y(1,i) == Y(1,i-stall)
        order = 1;
    else
        order = 0;
    end
else
    order = 0;
end

end
```

A.10 – Função mutação com compensação genética

```
% função mutação com restrições e com efeito da compensação genética

% j - determinar cromossoma a mutar
% v_m - valor da mutação já dentro das restrições e com compensação
% genética
% i - geração
% rx_i - matriz restrições
% Bvar - vetor com
% comp - coeficiente de alcance da mutação

function [j, v_m] = mutation(i,rx_i,Bvar,comp)

% ve numero de alelos do cromossoma
[~,jr] = size(rx_i);

% alelo aleatorio a mutar
j = ceil(rand * jr);

if i == 1 || isnan(Bvar(1,1)) == 1 || Bvar(1,1)==0

    % valor da mutação dentro de restrições
    v_m = rx_i(1,j)+(rx_i(2,j)-rx_i(1,j))*rand;

else
    % valor da mutação com compensação genética
    v_m = Bvar(1,j) * (1 + comp * (rand*2 - 1));

    % verificação das restrições
```

```
    if v_m > rx_i(2,j)
        v_m = rx_i(2,j);
    elseif v_m < rx_i(1,j)
        v_m = rx_i(1,j);
    end
end
end

% Numero de espiras do enrolamento é inteiro
if j == 1
    v_m = round(v_m);
end

end
```

A.11 – Script AG com intervalo adaptativo

```
% Genetic Algorithm based transformer design
clear all % Limpa variaveis
close all
clc % Limpa consola
tic % Inicio contagem tempo

%% 0 - Iterações
runs = 43;

for v = 1:runs

% 1 - Dados, Restrições e Matrizes

% A - Parametros entrada GA

% Numero de corridas
Nruns = 43;

% Tamanho da população
ps = 200;

% Elitismo
eli = 0.05;

% Crossover
xo = 1;

% Mutação
mu = 0.5 ;

% Stall
stall = 50;
```

```
% Approach
%apr = 0.1;

% Paragem por convergencia
cvlg = 1;

% B - Intervalo de entrada de procura (minimos e maximo de procura)

% 1 - Numero de espiras BT, turns_LV
IN_turns_LV_min = 1; % Impossibilidade fisica, valor minimo
IN_turns_LV_max = 30; % Valor flexivel

% 2 - Lagura do nucleo, D
IN_D_min = 0; % Impossibilidade fisica, valor minimo
IN_D_max = 0.5; % Valor flexivel [m]

% 3 - Indução magnética, FD_max
IN_FD_min = 1.1; % Indução magnetica minima [T] valores minimo de
interpolação
IN_FD_sat = 1.8; % Valor acima de 1.7 T (valor considerado normal para TD)
[T]

% 4 - Altura da janela do nucleo, G
IN_G_min = 0; % Impossibilidade fisica, valor minimo
IN_G_max = 0.5; % Valor flexivel [m]

% 5 - Espessura da fita condutora enrolamento BT, t_LV [m]
IN_t_LV_min = 0.4E-3; % Valor minimo, dados limitados
IN_t_LV_max = 1E-3; % Valor maximo, dados limitados

% 6 - Diametro do fio condutor enrolamento AT, d_HV [m]
IN_d_HV_min = 0; % Impossibilidade fisica, valor minimo
IN_d_HV_max = 2E-3; % Valor maximo, dados limitados

% C - Restrições das variaveis independentes

% 1 - Numero de espiras BT, turns_LV
turns_LV_min = 1; % Impossibilidade fisica
turns_LV_max = 100; % Valor arbitrario (grande)

% 2 - Lagura do nucleo, D
D_min = 1E-4; % Impossibilidade fisica [m]
D_max = 1; % Valor arbitrario (grande) [m]

% 3 - Indução magnética, FD_max
FD_min = 1.1; % Indução magnetica minima valores minimo de interpolação [T]
FD_sat = 1.7; % Saturação magnetica maxima considerada maioritariamente [T]

% 4 - Altura da janela do nucleo, G
G_min = 1E-4; % Impossibilidade fisica [m]
G_max = 1; % Valor arbitrario (grande) [m]

% 5 - Espessura da fita condutora enrolamento BT, t_LV [m]
t_LV_min = 0.4E-3; % Restrição devido a dados limitados
t_LV_max = 1E-3; % Restrição devido a dados limitados

% 6 - Diametro do fio condutor enrolamento AT, d_HV [m]
```

```

d_HV_min = 1E-4; % Restrição devido a dados limitados
d_HV_max = 2E-3; % Restrição devido a dados limitados

% D - Lista de variáveis dependentes sujeitas a restrição

% 1 - Tensão induzida, igualdade de expressão, restrição valor residual
dvar1_min = -0.001;
dvar1_max = 0.001;

% 2 - Rácio de espiras, igualdade de expressão, restrição valor residual
dvar2_min = -0.001;
dvar2_max = 0.001;

% 3 - Perdas em vazio, NLL
NLL_g = 1100; % Guaranteed no-load loss IEC 60076-1 [W]
NLL_min = 0; % Impossibilidade física
NLL_max = 1.15 * NLL_g; % Valor máximo IEC 60076-1 [W]

% 4 - Perdas em carga, LL_1
LL_g = 8900; % Guaranteed load loss [W]
LL_min = 0; % Impossibilidade física
LL_max = 1.15 * LL_g; % Valor máximo IEC 60076-1 [W]

% 5 - Perdas em carga, LL_2
% Idêntico a 4.

% 6 - Perdas totais, NLL + LL_1
TL_min = 0; % Impossibilidade física
TL_max = 1.1 * (NLL_g + LL_g); % Valor máximo IEC 60076-1 [W]

% 7 - Perdas totais, NLL + LL_2
% Idêntico a 6.

% 8 - Impedância de curto-circuito, U_k
Ukg = 6; % Guaranteed impedance voltage [%]
U_k_min = (0.9 * Ukg/100); % Valor mínimo IEC 60076-1 [W]
U_k_max = (1.1 * Ukg/100); % Valor máximo IEC 60076-1 [W]

% 9 - Transferência de calor, TLRTT, restrição maior que zero
dvar9_min = 0; % Capacidade de transferência de calor tem de ser maior que
perdas
dvar9_max = 1.1 * (NLL_g + LL_g); % Valor arbitrário (transferência de
calor em excesso a dobrar) [W];

% 10 - Aumento de temperatura, AOR
AOR_min = 0; % Tem de haver o mínimo aumento de temperatura [°C]
AOR_max = 60; % max top-oil temperature rise is 60°C according to IEC 60076-
2

% 11 - Tensão induzida LV, Induced_LV
Induced_min = 0; % [V] Impossibilidade física
Induced_max = 6E3; % [V] max induced voltage the layer of insulation 0.28mm

% 12 - Tensão induzida HV, Induced_HV
% Idêntico a 11.

% 13 - Tensão de impulso, Impulse_LV
Impulse_min = 0; % [V] Impossibilidade física

```

```

Impulse_max = 23.5E3; % [V] max impulse voltage the layer of insulation
0.28mm

% 14 - Tensão de impulso, Impulse_HV
% Identico a 13.

% 15 - Dimesoes do cuba, TH_min
TH_low = 0; % Impossibilidade fisica
TH = 1015E-3; % [m] tank height constructional reasons

% E - Matrizes de dados
% Dados de entrada das var independentes [x_min y_min; x_max y_max]
IN_ivar = [IN_turns_LV_min IN_D_min IN_FD_min IN_G_min IN_t_LV_min
IN_d_HV_min; ...
IN_turns_LV_max IN_D_max IN_FD_sat IN_G_max IN_t_LV_max IN_d_HV_max];

% Restrições das variaveis independentes [x_min y_min; x_max y_max]
r_ivar = [turns_LV_min D_min FD_min G_min t_LV_min d_HV_min; ...
turns_LV_max D_max FD_sat G_max t_LV_max d_HV_max];

% Restrições das variaveis dependentes [x_min y_min; x_max y_max]
r_dvar = [dvar1_min dvar2_min NLL_min LL_min LL_min TL_min TL_min U_k_min
dvar9_min AOR_min Induced_min Induced_min Impulse_min Impulse_min TH_low;
...
dvar1_max dvar2_max NLL_max LL_max LL_max TL_max TL_max U_k_max
dvar9_max AOR_max Induced_max Induced_max Impulse_max Impulse_max TH];

%% 2 - População inicial
% Numero de variáveis
var = length(IN_ivar);

% Numero de gerações maximo (regra de x100)
ng = 100 * var;

% Runs individuais
for k = 1:Nruns

% População inicial
x_i = zeros(ps,var);
for i = 1:ps
    for j = 1:var
        x_i(i,j) = (IN_ivar(2,j) - IN_ivar(1,j))*rand + IN_ivar(1,j);
        if j == 1
            x_i(i,j) = round(x_i(i,j)); % Numero de espiras inteiro
        end
    end
end

%% 3 - Valores de Y da pop inicial
% G - Inicio de loop do GA
dvar_i = zeros(ps,15); % variaveis dependentes geração N-1
dvar_i_c = zeros(ps,15); % variaveis dependentes geração N
for i = 1:ng % for das gerações

    if i == 1 % Diferente na primeira iteração
        for j=1:ps
            [CTM, TOC, dvar] = fCTD(x_i(j,:));

```

```

    dvar_i(j,:) = dvar; % variaveis dependentes p/ indexes

    % Consoante o que se quer minimizar:
    % CTM - custo de fabrico d_min = dvar_i(posicao(i),:) -
r_dvar(1,:)
    % TOC - custo total de posse
    if CTM > 0
        Y(j,1) = CTM;
    else
        Y(j,1) = NaN;
    end

end
end

%% 4 - Torneio de indices de indices
ii = tournament(Y, x_i, r_ivar, dvar_i, r_dvar);

%% 5 - Crossover
x_c=x_i(ii,:); % Genes para fazer crossover (do torneio)

% Matriz de genes para descendentes cruzados
x_ch=zeros(ps,var);

% Crossover
for prc=1:(ps*xo)/2 % fraccão xo a população
    i1=1+2*(prc-1); % 1 3 5 etc
    i2=2+2*(prc-1); % 2 4 6 etc
    g1=x_c(i1,:); %one chromossome
    g2=x_c(i2,:); %another chromossome
    cp=ceil((var-1)*rand); % crossover point, random number form range
[1; nn-1]

    % construção dos 2 descendentes:
    g1ch=xover(g1,g2,cp);
    g2ch=xover(g2,g1,cp);

    x_ch(i1,:)=g1ch; % 1 3 5 etc
    x_ch(i2,:)=g2ch; % 2 4 6 etc
end
for j=prc+1:ps
    x_ch(j,:) = x_c(j,:);
end
x_c=x_ch; % nova geração com crossover

%% 6 - Mutação
for j=1:ps
    if rand < mu
        [j_m, x_c_m] = mutation(r_ivar);
        x_c(j,j_m)=x_c_m;
    end
end

%% 7 - Valores de Y da nova geração após crossover e mutação
% Novos valores de Y, nova geração
Y_c=zeros(ps,1);
% Calculo dos valores Y nova geração

```

```

for j=1:ps
    [CTM, TOC, dvar] = fCTD(x_c(j,:));

    dvar_i_c(j,:) = dvar; % variaveis dependentes p/ indexes

    % Consoante o que se quer minimizar:
    % CTM - custo de fabrico
    % TOC - custo total de posse
    if CTM > 0
        Y_c(j,1) = CTM;
    else
        Y_c(j,1) = NaN;
    end

end

%% 8 - Elitismo
x_c = elitism(Y_c, Y, x_c, dvar_i_c, x_i, dvar_i, r_ivar, r_dvar, eli);

%% 9 - Nova geração final
x_i = x_c;

%% 10 - Calculo dos valores Y (target)
for j=1:ps
    [CTM, TOC, dvar] = fCTD(x_i(j,:));

    dvar_i(j,:) = dvar; % variaveis dependentes p/ indexes

    % Consoante o que se quer minimizar:
    % CTM - custo de fabrico
    % TOC - custo total de posse
    if CTM > 0
        Y(j,1) = CTM;
    else
        Y(j,1) = NaN;
    end

end

%% 10 - Melhor possivel
[Y_CB, X_CB, dvar_B] = bestpossible(Y, x_i, dvar_i, r_ivar, r_dvar);

%% 11 - Junta o melhor valor à lista
Y_i(k,i) = Y_CB; % Melhor valor para cada iteração

X_i(k,:) = X_CB(1,:); % Melhor configuração para cada iteração

X_ii(k,:) = dvar_B(1,:); % Variaveis dependentes com restrição

Y_i(Y_i==0) = NaN; % Substitui 0 por NaNs

%% 12 - Critérios de paragem
if i > 1
    [order] = stopcriterion(i, Y_i(k,:), stall);
    if order == 1
        break
    end
end
end

```

```

end % end for das gerações

% Valor da variavel de decisao
Yit(1,k) = Y_i(k,i)

% Valor das variaveis de entrada
Xit = X_i(k,:)

clearvars -except ng var runs XitN YitN v Xit cvg Yit apr IN_ivar r_ivar
r_dvar var ps eli xo mu dFcn ng stall X_i X_ii Y_i Nruns tic k

% Criterio de paragem por convergencia
if k~= 1
    if abs(Yit(k-1) - Yit(k)) < cvg
        break
    end00
end

apr = 0.5 * k^(-0.7);
% faz intervalo de procura adaptativo
if isnan(X_i(k,1))==0
    IN_ivar(1,:) = (1 - apr) * X_i(k,:);
    IN_ivar(2,:) = (1 + apr) * X_i(k,:);
    IN_ivar(1,1) = round(IN_ivar(1,1));
    IN_ivar(2,1) = round(IN_ivar(2,1));
    IN_ivar

end

%clc
disp('Ites:')
k

end % End for das iterações

clearvars -except ng var runs Xit Yit YitN XitN v

for i = 1:length(Yit)
    YitN(v,i) = Yit(1,i);
end

XitN(v,:) = Xit;

clear Yit Xit

%clc
disp('Runs:')
v

end % End das Runs

% Tempo decorrido
elapsedTime = toc;

% % Save results file
fname = [ 'Adaptative.mat' ];

```

```
save(fname, 'XitN', 'YitN', 'elapsedTime');
```