

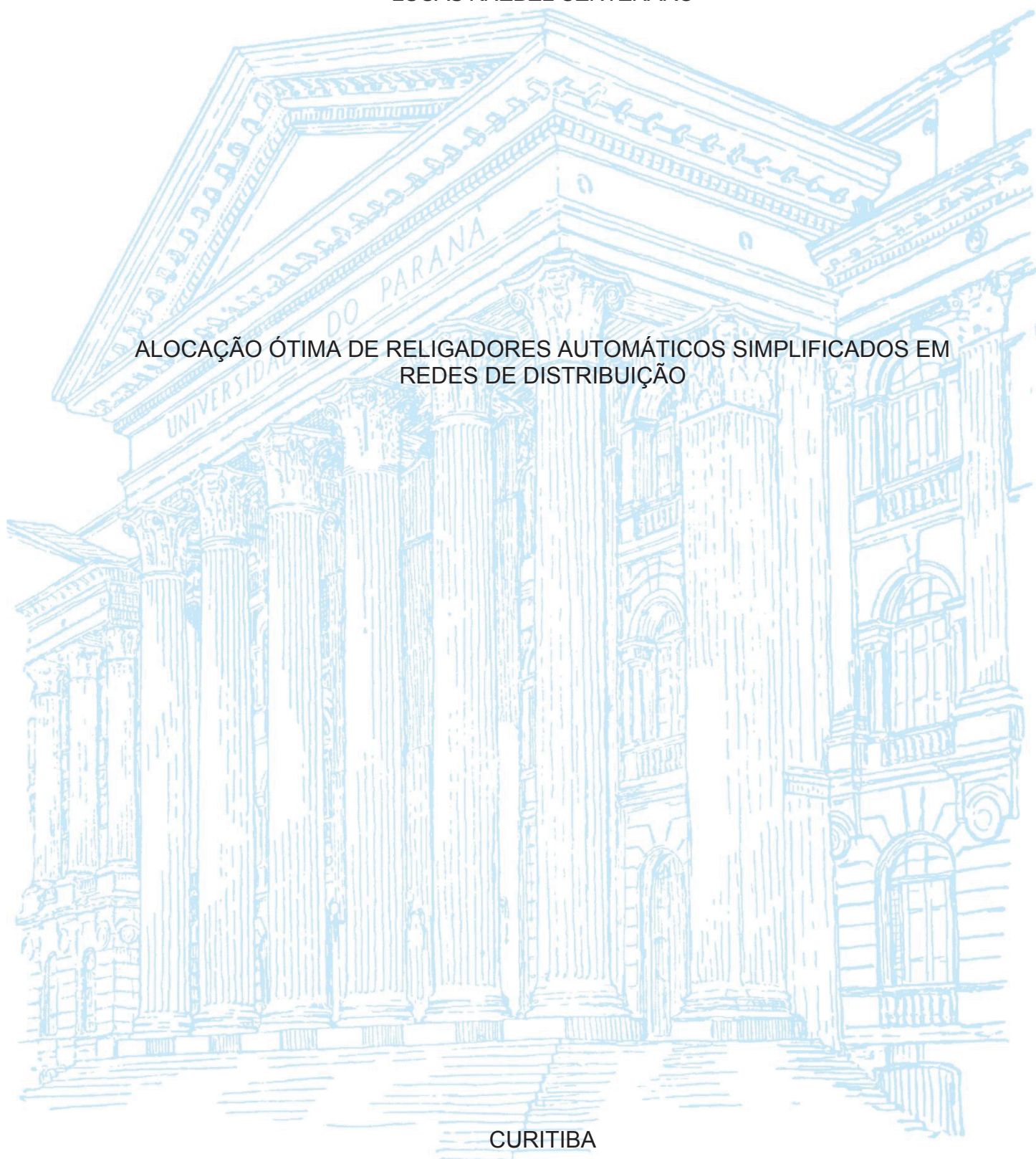
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS KNEBEL CENTENARO

ALOCÇÃO ÓTIMA DE RELIGADORES AUTOMÁTICOS SIMPLIFICADOS EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO

CURITIBA

2020



LUCAS KNEBEL CENTENARO

ALOCÇÃO ÓTIMA DE RELIGADORES AUTOMÁTICOS SIMPLIFICADOS EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas de Energia, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Thelma Solange Piazza Fernandes

CURITIBA

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C397a

Centenaro, Lucas Knebel

Alocação ótima de religadores automáticos simplificados em redes de distribuição [recurso eletrônico] / Lucas Knebel Centenaro. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Orientadora: Thelma Solange Piazza Fernandes.

DOI: <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.969>

1. Algoritmos Genéticos. 2. Redes elétricas - Analisadores. 3. Energia elétrica - Distribuição. 4. Multas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Fernandes, Thelma Solange Piazza. III. Título.

CDD: 354.49

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUCAS KNEBEL CENTENARO** intitulada: **ALOCÇÃO ÓTIMA DE RELIGADORES AUTOMÁTICOS SIMPLIFICADOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**, sob orientação da Profa. Dra. THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 27 de Novembro de 2020.

Assinatura Eletrônica

27/11/2020 16:32:15.0

THELMA SOLANGE PIAZZA FERNANDES
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

27/11/2020 12:08:15.0

NASTASHA SALAME DA SILVA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

27/11/2020 13:51:46.0

ROMAN KUIAVA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

30/11/2020 00:49:08.0

CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dep.Eng.Elétrica-DELT, Centro Politécnico - UFPR - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531990 - Tel: 41 3361-3622 - E-mail: ppgee@eletrica.ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 63869

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 63869

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio incondicional.

À professora Thelma S. Piazza Fernandes que, em todos os momentos compreendeu e teve paciência com sabedoria para contribuir para com minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

RESUMO

Dentre os estudos realizados na fase de planejamento da operação de redes de distribuição, tem os que visam alocar adequadamente equipamentos que promovam a qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores, tais como os equipamentos de proteção. Um desses equipamentos, que tem se sobressaído devido à flexibilidade e baixo custo, são os religadores automáticos simplificados (RASs) que são equipamentos capazes de isolar automaticamente faltas permanentes. Mas, a fim de melhor atuar na melhoria dos indicadores de qualidade é importante realizar um adequado planejamento da alocação destes dispositivos. Deste modo, o presente trabalho propõe alocação de RASs em redes de distribuição tendo como objetivos a minimização de seus custo de instalação, manutenção e operação, priorizando a instalação dos mesmos em locais com índices de falha elevado, minimizando o tempo do retorno de investimento e diferentemente dos demais trabalhos, também mitigar os efeitos negativos de penalizações (multas) efetuadas pelo órgão regulador. Para tanto, formula-se um problema de otimização resolvido por meio de Algoritmos Genéticos (AG). Os testes foram realizados utilizando sistema IEEE-123 barras e um alimentador de uma distribuidora real. Para as simulações, três estratégias de alocação são propostas: indicação de número máximo de dispositivos a serem instalados; valor máximo em reais que se deseja investir; deixando o programa escolher a melhor estratégia (autônomo). Também são realizadas análises qualitativas dos resultados via gráficos de dispersão que apresentam as probabilidades relacionadas às alocações obtidas. Conclui-se que houve economia e obtenção de retorno de investimentos atrativos, que são tão mais atrativos quanto mais se investe, além de alocação de dispositivos em barras com índices de falhas elevados. A formulação proposta por esse trabalho pode ser aplicada a diversos arranjos utilizados por distribuidoras a fim de propiciar adequado gerenciamento da alocação de RASs.

Palavras-Chave: Alocação. Religadores. Redes de Distribuição. Algoritmos Genéticos. Multas. Retorno de Investimento.

ABSTRACT

Among the studies carried out in planning distribution networks operation, are those that aim to properly allocate equipment that promotes the quality of delivered electric energy to consumers, such as protective equipment. One of such devices, which has stood out due to its flexibility and low cost, is the simplified automatic reclosers (RASs), which are capable of automatically isolating permanent faults. However, in order to better act in the improvement of the quality indicators, it is important to carry out an adequate planning for the allocation of these devices. Thus, the present work proposes the allocation of RASs in distribution networks with the objective of minimizing their installation, maintenance and operation costs, prioritizing their installations in locations with high failure rates, minimizing the time of return on investment and, unlike other works, also mitigates the negative effects of penalties (fines) made by the regulatory agency. To this end, it is formulated an optimization problem solved by Genetic Algorithms (AG). The tests were performed using the IEEE-123 bus system and a real distributor feeder. For the simulations, three allocation strategies are proposed: indication of the maximum number of devices to be installed, maximum value in reais to be invested or letting the program choose the best (stand-alone) strategy. Qualitative analyzes of the results are also performed via dispersion plots that present the probabilities related to the allocations obtained. The results present attractive return on investments, which are more attractive the more it is invested, and in addition the allocation of devices occurred at buses with high failure rates. The proposed formulation can be applied to several arrangements used by distributors in order to provide adequate management of the allocation of RASs.

Keywords: Allocation. Reclosers. Distribution Networks. Genetic Algorithms. Fines. Return of Investment.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPENSAÇÃO PELA TRANSGRESSÃO DOS LIMITES DE CONTINUIDADE PARA CONCESSIONÁRIAS.....	15
FIGURA 2 - COMPENSAÇÃO PELA TRANSGRESSÃO DOS LIMITES DE CONTINUIDADE PARA CONCESSIONÁRIAS.....	15
FIGURA 3 - RESUMO DOS PRINCIPAIS TRABALHOS REVISADOS	25
FIGURA 4 - INTERAÇÃO DO RELIGADOR COM A CORRENTE NOMINAL E DE FALTA.	28
FIGURA 5 - CONFIGURAÇÃO DE INSTALAÇÃO DO RAS	32
FIGURA 6 - DESEMPENHO DO RAS PARA FALTAS TRANSITÓRIAS.....	34
FIGURA 7 - DESEMPENHO DO RAS PARA FALTAS PERMANENTES	34
FIGURA 8 - CODIFICAÇÃO DO CROMOSSOMO	50
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DE OPERAÇÃO MODELOS DE RELIGADORES EM ESTOQUE E MÁXIMO INVESTIMENTO	51
FIGURA 10 - SEQUÊNCIA DE CODIFICAÇÃO DO CROMOSSOMO MODO AUTÔNOMO	52
FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DO MODO 3, ESCOLHIDO PELO PLANEJADOR....	53
FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DO MODELO PROPOSTO.....	54
FIGURA 13 - MODELO TESTE IEEE 123 BARRAS	58
FIGURA 14 - MODELO TESTE 182 BARRAS	61
FIGURA 15 - CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DOS GRÁFICOS	67
FIGURA 16 - ICRI X RETORNO DE INVESTIMENTO (IEAUTOW1111)	74
FIGURA 17 - ICRI X RETORNO DE INVESTIMENTO (REAUTOW1111).....	75
FIGURA 18 - LOCALIZAÇÃO X ECONOMIA (IEAUTOW5151).....	76
FIGURA 19 - LOCALIZAÇÃO X ECONOMIA (REAUTOW5151)	76
FIGURA 20 - ICRI X BENEFÍCIO (IEAUTOW1550).....	77
FIGURA 21 - ICRI X BENEFÍCIO (REAUTOW1550)	78
FIGURA 22 - CENÁRIO SEM A FUNÇÃO MULTAS (IEAUTOW1101).....	79
FIGURA 23 - CENÁRIO COM A FUNÇÃO MULTAS (IEAUTOW1111)	80
FIGURA 24 - CENÁRIO SEM A FUNÇÃO MULTAS (REAUTOW1101)	81
FIGURA 25 - CENÁRIO COM A FUNÇÃO MULTAS (REAUTOW1111)	81
 FIGURA 1 AN.1 - INDICADORES DE CONCESSIONÁRIAS NO BRASIL	 89
FIGURA 2 AN.4 - INFORMAÇÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL UTILIZADO PARA AS SIMULAÇÕES.....	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PALAVRAS-CHAVE NA ESTRATÉGIA DE BUSCA.....	17
TABELA 2 – SÍNTESE DOS CRITÉRIOS DE PESQUISA	19
TABELA 3 – RESULTADO QUANTITATIVO DA PESQUISA NO <i>POP</i>	20
TABELA 4 – DISTRIBUIÇÃO FINAL DA SELEÇÃO LITERÁRIA	21
TABELA 5 – COMPOSIÇÃO PROBABILÍSTICA ENTRE OS TIPOS	40
TABELA 6 – CUSTOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO	57
TABELA 7 – DADOS ESTIMADOS PARA A SIMULAÇÃO	59
TABELA 8 – DADOS DO HISTÓRICO DE UMA CONCESSIONÁRIA PARA A SIMULAÇÃO	62
TABELA 9 – PARÂMETROS COMPUTACIONAIS	64
TABELA 10 – SIGLAS DOS MODELOS	66
TABELA 11 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO IEEE 123 BARRAS (W1111)	69
TABELA 12 – VALORES DAS FUNÇÕES	69
TABELA 13 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO 182 BARRAS (W1111)	71
TABELA 14 – VALORES DAS FUNÇÕES PARCIAIS NORMALIZADAS	72
 TABELA 1 AN.2 – DADOS TÉCNICOS DE ATUAÇÃO / OPERAÇÃO DO RAS	90
TABELA 2 AN.3 – DISPERSÃO QUANTITATIVA DA PERSISTÊNCIA DO AG	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO	14
1.3	OBJETIVOS	15
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	METODOLOGIA DA PESQUISA LITERÁRIA	17
2.1.1	AMBIENTES DE PESQUISA	18
2.1.2	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	19
2.2	APRESENTAÇÃO DA LITERATURA SELECIONADA	21
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	26
3	RELIGADOR AUTOMÁTICO	27
3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	27
3.2	APLICAÇÕES	28
3.3	CLASSIFICAÇÃO E TIPOS	29
3.3.1	QUANTO AO NÚMERO DE FASES	29
3.3.1.1	MONOFÁSICOS	29
3.3.1.2	MONOFÁSICOS COM OPERAÇÃO BIFÁSICA OU TRIFÁSICA DE BLOQUEIO	29
3.3.1.3	TRIFÁSICOS	30
3.3.1.4	TRIFÁSICOS COM OPERAÇÃO MONOFÁSICA E BLOQUEIO TRIFÁSICO	30
3.3.2	QUANTO AO TIPO DO CONTROLE	30
3.3.2.1	HIDRÁULICO	30
3.3.2.2	ELETRÔNICO	30
3.3.3	QUANTO AO MEIO DE INTERRUPTÃO	31
3.4	EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA	31
3.5	ANÁLISE E DEFINIÇÕES	32
4	PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PROPOSTO	37
4.1	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	37
4.1.1	FUNÇÃO MUTIOBJETIVO	37
4.1.1.1	FUNÇÃO CUSTO (F_C)	38
4.1.1.2	FUNÇÃO PRIORIZAÇÃO DE INSTALAÇÃO (F_P)	41
4.1.1.3	FUNÇÃO MULTAS (F_M)	43
4.1.1.4	FUNÇÃO RETORNO DE INVESTIMENTO (F_R)	46
4.2	MÉTODO DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	47
4.2.1	ALGORITMO GENÉTICO	47
4.2.1.1	SÍNTESE	47
4.2.1.2	MODELAGEM	48
4.2.1.2.1	CODIFICAÇÃO DO INDIVÍDUO	49
4.2.1.3	PROCESSO DE SELEÇÃO E OPERADORES GENÉTICOS	55
4.2.1.3.1	SELEÇÃO	55
4.2.1.3.2	CROSSOVER	56
4.2.1.3.3	MUTAÇÃO	56
4.3	ABORDAGEM UTILIZADA PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.3.1	MÉTRICAS	57
4.3.1.1	SISTEMAS UTILIZADOS PARA AS SIMULAÇÕES	58

4.3.1.1.1	SISTEMA IEEE 123 BARRAS	58
4.3.1.1.2	SISTEMA REAL 182 BARRAS	60
4.3.2	FERRAMENTAS	64
5	RESULTADOS.....	68
5.1	ANÁLISE QUANTITATIVA	68
5.1.1	SISTEMA IEEE-123 BARRAS	68
5.1.2	SISTEMA REAL 182 BARRAS	70
5.2	ANÁLISE QUALITATIVA	73
5.2.1	ÍNDICE DE FALHAS E RETORNO DE INVESTIMENTO	74
5.2.2	LOCALIZAÇÃO DAS BARRAS E ECONOMIA.....	75
5.2.3	ÍNDICE DE FALHAS E BENEFÍCIO.....	77
5.3	COMPARATIVO QUALITATIVO DO CASO MULTAS	78
5.4	CUSTO COMPUTACIONAL.....	82
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS.....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	ANEXO I – GRÁFICOS DO HISTÓRICO DE INDICADORES DE QUALIDADE NO BRASIL.....	89
	ANEXO II – DADOS TÉCNICOS DE ATUAÇÃO / OPERAÇÃO DO RAS	90
	ANEXO III – DISPERSÃO QUANTITATIVA DA PERSISTÊNCIA DO AG	91
	ANEXO IV – INFORMAÇÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL UTILIZADO PARA AS SIMULAÇÕES.....	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A qualidade da energia é regulada e fiscalizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que orienta, a partir do Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição), os valores de referência para os principais indicadores coletivos de qualidade: DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora).

As distribuidoras de energia elétrica devem seguir as orientações do agente regulador para evitar sanções penalizadoras pela baixa qualidade do produto fornecido aos clientes.

Um perfil de baixa qualidade de energia desencadeia uma série de prejuízos às distribuidoras, oriundos não só pela diminuição do faturamento ou energia não suprida, mas também pela geração de multas e insatisfação de clientes.

A instalação de dispositivos de proteção, por exemplo, permeia adequações no sistema para que valores mínimos de qualidade de energia exigidos pelo órgão regulador sejam alcançados.

Tradicionalmente, a escolha do melhor ponto de instalação para dispositivos de proteção baseia-se no histórico dos indicadores de qualidade e não leva em consideração formulações matemáticas que buscam otimizar a localização de modo sistêmico.

Além disso, os equipamentos de proteção passam por evolução tecnológica, sendo necessário estudos para melhorar a prática de atuação, restabelecimento rápido do fornecimento e localização dos blocos com defeito. Tais tecnologias, associadas à necessidade de maior confiabilidade nos sistemas de distribuição, podem ser consideradas os principais fatores que contribuem para se buscar adequada automação dos sistemas, especialmente, os inteligentes (KONDO et al., 2013-2015).

Assim, para a instalação racional, factível e sincronizada, com propósito autônomo à tomada de decisões, é primordial que os investimentos efetuados pelas concessionárias considerem a instalação otimizada dos dispositivos de proteção, determinando os melhores locais de instalação e que contribuam e permitam a

interação inteligente da rede, tendo em vista a melhora dos indicadores de qualidade da energia.

Além disso, o desempenho dos principais indicadores de qualidade (DEC e FEC) trazem subsídios para se efetuar uma alocação ótima de dispositivos de proteção.

O indicador FEC está bem gerenciado, pois o limite como um todo, desde o ano de 2008, não foi ultrapassado. Esse indicador considera a frequência de ocorrências em certo espaço de tempo, sendo então, que os blocos alimentadores de distribuição e os fluxos de potência para o atendimento à expansão estão bem ajustados, bem como também a coordenação e seletividade dos sistemas. Porém a DEC, indicador relacionado à duração de cada interrupção, leva em consideração principalmente os tempos de reparo, posterior à ocorrência do desligamento permanente. Esse indicador está além do limite máximo normatizado, sendo que desde 2010 esse índice nunca esteve dentro da região factível (ANEXO I - FIGURA 1 AN.1) salvo algumas exceções, em algumas distribuidoras de energia (ANEEL, 2018).

A grande parte das ocorrências de falta permanente e que amplificam o DEC, ocorrem em perímetros rurais, destacando que estes sistemas são mais longos, o que aumenta o tempo de atendimento presencial do operador para localizar a falha e corrigi-la. Silva et al. (2002) ponderou que aproximadamente 80% das falhas no sistema são consideradas transitórias e causadas principalmente por vegetação, animais, entre outros. As faltas permanentes estão em torno de 20%, causados por problemas técnicos, intempéries ou imprevistos estruturais na rede.

Quando ocorrem falhas transitórias, os dispositivos de proteção devem atuar precisamente de modo a eliminar a falha dentro do ajuste inserido, sem comprometer o fornecimento do produto ao cliente. Porém, isto nem sempre ocorre, pois as distribuidoras instalam dispositivos com elemento fusível, que promovem o desligamento permanente da rede, o que impacta nos indicadores de qualidade. Desde a primeira patente do fusível para rede de distribuição, registrada por Thomas Edison em 1890, as concessionárias efetuam a sua utilização em massa, devido ao dispositivo ter baixo valor de mercado, sendo eficaz ao que se propõe, mas, em contrapartida, não é significativamente eficiente se comparado à atuação de religadores, pois eleva o índice da DEC, impactando a relação: consumidor, concessionária e órgão regulador.

Vislumbrando eliminar os problemas relativos às faltas transitórias que se tornam permanentes pela utilização do elo fusível de proteção em alguns ramais derivados do tronco alimentador, empresas têm realizado estudos para instalação de religadores automáticos simplificados (RASs), que se posicionam na guarda do elemento a ser protegido e que está na retaguarda. Nestes estudos, apenas o histórico de dados do indicador de falhas é tido como parâmetro de decisão na projeção deste equipamento de proteção.

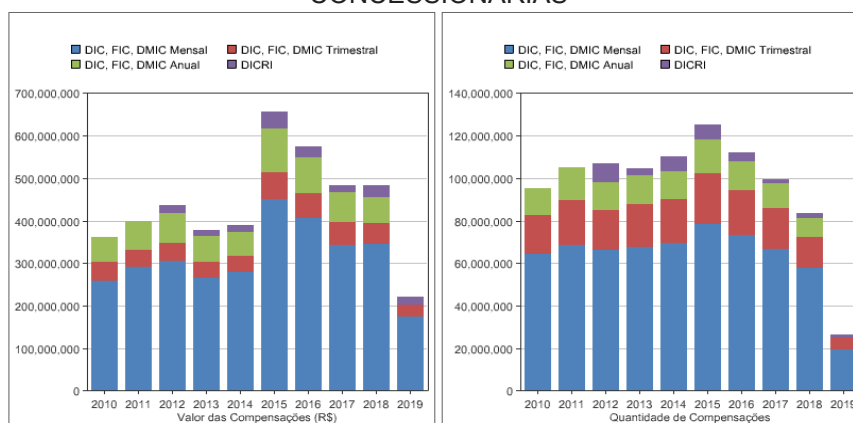
Os RASs, foram desenvolvidos para proteger as ramificações de linhas aéreas de média tensão. Ele remove os impactos de faltas transitórias nas linhas de distribuição de energia e protege o fusível, ou seja, conforme elencado por Silva et al. (2002), os 80% de eventos transitórios que prejudicam drasticamente o índice DEC, podem ser suprimidos por um processo de automatização. Porém, apenas instalar estes dispositivos sem otimizar seu posicionamento no sistema, pode não gerar impactos relevantes ao qual se deseja.

Neste viés, considerando que uma grande parcela de empresas distribuidoras efetuam a instalação de RASs observando apenas os dados históricos de eventos, este trabalho propõe a estruturação de um algoritmo para alocação ótima destes dispositivos, com vistas a minimizar os custos devido a multas aplicadas pelo regulador, minimizar o custo de instalação, manutenção e operação dos religadores, maximizar a priorização de instalação em locais com índices de falha elevado e minimizar o tempo do retorno de investimento.

1.2 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÃO

A ANEEL disponibiliza anualmente os valores de compensação, que são repassados aos consumidores, pelas concessionárias e permissionárias de energia elétrica quando há transgressão dos limites estabelecidos pelo regulador. Nas Figuras 1 e 2 é mostrado o quantitativo de ressarcimento que as concessionárias poderiam reverter em forma de investimentos ou mesmo lucrar se houvesse um controle e metodologias primorosas quanto à alocação de equipamentos de proteção na rede de distribuição.

FIGURA 1 - COMPENSAÇÃO PELA TRANSGRESSÃO DOS LIMITES DE CONTINUIDADE PARA CONCESSIONÁRIAS



FONTE: ANEEL (2019) – Valores em reais (R\$)

FIGURA 2 - COMPENSAÇÃO PELA TRANSGRESSÃO DOS LIMITES DE CONTINUIDADE PARA CONCESSIONÁRIAS

Compensação de Continuidade das Concessionárias			2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
DIC, FIC e DMIC	Mensal	QTD	64.528.029	68.376.650	66.031.346	67.586.765	69.433.683	78.455.430	73.450.080	66.886.121	57.601.345	19.599.113
		VLR	259.409.387,88	290.941.585,92	305.792.525,44	265.045.891,13	279.043.522,19	450.176.623,42	405.084.576,21	343.231.014,84	344.533.137,49	174.180.240,41
	Trimestral	QTD	18.311.034	21.500.368	19.139.127	20.071.661	20.546.783	23.656.339	20.694.645	18.849.382	14.608.873	5.452.043
		VLR	42.844.877,84	40.513.635,13	41.990.777,27	37.144.197,46	38.215.040,48	64.540.627,96	59.469.423,39	54.190.532,49	48.861.292,42	27.507.720,18
	Anual	QTD	12.252.627	15.260.861	12.882.181	13.716.452	13.032.543	16.064.721	13.597.798	11.715.274	9.225.490	0
		VLR	58.543.287,88	68.836.266,39	69.891.361,86	61.779.107,02	54.988.606,81	102.218.280,49	84.604.859,24	68.742.985,61	61.182.750,26	0,00
DICRI		QTD	0	0	9.170.700	3.378.948	7.195.740	7.024.954	4.293.725	1.908.786	1.992.068	1.252.935
		VLR	0,00	0,00	19.796.625,84	14.584.068,41	18.513.244,11	39.957.952,19	26.429.211,32	17.000.875,95	29.025.824,62	19.906.021,05
TOTAL GERAL		QTD	95.091.690	105.137.879	107.223.354	104.753.826	110.208.749	125.201.444	112.036.248	99.359.563	83.427.776	26.304.091
		VLR	360.797.553,60	400.291.487,44	437.471.290,41	378.553.264,02	390.760.413,59	656.893.484,06	575.588.070,16	483.165.408,89	483.603.004,79	221.593.981,64

FONTE: ANEEL (2019) – Valores em reais (R\$)

Este fator de ressarcimento é agravante e justifica a importância de incluir esta variável, para que, no processo de otimização se obtenha o maior benefício com menor custo possível, em menor tempo e relacionando o investimento inicial.

Neste viés, este trabalho diferencia-se dos demais pois equaciona um problema de otimização que aloca dispositivos RASs em redes de distribuição de energia elétrica que, além de melhorar os indicadores de continuidade e minimizar custos de investimentos, busca também minimizar os prejuízos das concessionárias devido às perdas monetárias de receita por não atendimento à carga.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é formular um problema de otimização que efetue a alocação ótima de RASs em redes de distribuição de energia elétrica a fim de melhorar os indicadores de continuidade ao menor custo, menor tempo de retorno

de investimento e ainda, reduzir o montante financeiro rateado aos consumidores devido à transgressão de limites de continuidade, estabelecidos pelo órgão regulador.

Como objetivos específicos, tem-se:

- ✓ Avaliar obras na literatura que propiciem transferir conhecimento para o desenvolvimento ao trabalho, principalmente dentro de alguns critérios a serem estabelecidos no Capítulo 2;
- ✓ Formular problema de otimização para alocação de RASs resolvido via Algoritmos Genéticos (AG);
- ✓ Implementar computacionalmente o problema de otimização proposto;
- ✓ Realizar testes e análise de resultados – quantitativos e qualitativos.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em 6 capítulos:

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte, com a revisão da literatura, contemplando os trabalhos já desenvolvidos acerca de alocação de dispositivos de proteção em redes de distribuição de energia elétrica.

No Capítulo 3 é descrito as classes e tipos de religadores, aplicações e limitações. Apresenta também o RAS e suas peculiaridades técnicas e diferenças para os demais religadores.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia para atender à problematização, com o equacionamento matemático via AG.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da metodologia para alocação de RASs no sistema fictício do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) -123 barras e um alimentador real de concessionária com 182 barras. Ainda neste capítulo, é efetuada uma análise quantitativa e qualitativa da função objetivo e AG, com gráficos de dispersão para diferentes cenários.

No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do trabalho e exposto as ideias para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentado uma síntese das principais obras pesquisadas, o processo de seleção, as metodologias propostas por cada autor bem como os critérios de otimização já formulados. Além disso, é mostrada uma tabela resumo a qual contém o tipo de otimização, os objetivos da função *fitness* e as restrições do problema da literatura existente.

2.1 METODOLOGIA DA PESQUISA LITERÁRIA

A compilação literária dos trabalhos desenvolvidos na alocação ótima de equipamentos de proteção ou correlatos seguiu a estratégia de utilizar aspectos de ambientes ao qual foram pesquisados e de utilizar propostas de seleção pré-estabelecidas, objetivando obter materiais com maior grau de fidelidade ao assunto deste trabalho e avaliando a qualidade dos mesmos.

Primeiramente, como todas as buscas dependem de um conjunto de filtros necessários para produzir resultados satisfatórios, foi estruturado um conjunto de palavras-chave, apresentado na TABELA 1, que foi utilizado para compor uma ampla busca periférica.

TABELA 1 – PALAVRAS-CHAVE NA ESTRATÉGIA DE BUSCA

Palavras-Chave	Combinação para Pesquisa	Código Combinação
Alocação; Religadores; Dispositivos; Algoritmos Genéticos; Multas; Retorno de Investimento.	Alocação; Religadores; Dispositivos	ARDP
	Alocação; Religadores; Dispositivos; Algoritmos Genéticos	ARDAG
	Alocação; Religadores; Multas	ARMP
	Alocação; Religadores; Dispositivos; Retorno de Investimento	ARDRIP
Tradução para o Inglês		
<i>Allocation; Reclosers; Devices; Distribution Networks; Genetic Algorithms; Fines; Return of Investment.</i>	<i>Allocation; Reclosers; Devices</i>	ARDI
	<i>Allocation; Reclosers; Devices; Genetic Algorithms</i>	ARDGA
	<i>Allocation; Reclosers; Fines</i>	ARF
	<i>Allocation; Reclosers; Devices; Return of Investment (Payback)</i>	ARDRII

FONTE: O autor (2020).

2.1.1 AMBIENTES DE PESQUISA

Para trazer subsídios com qualidade, os ambientes de pesquisa, aferição e vetorização dos artigos, revistas, teses etc., foram determinados segundo seus impactos na comunidade acadêmica.

O conjunto de ambientes pesquisados, dentro das suas peculiaridades, sincronizados, foi:

- ✓ *Software Publish or Perish (POP)*;
- ✓ Periódicos Qualis – Capes.

O *software POP* é um poderoso aplicativo de consulta acadêmica, gratuito, que compila obras registradas como artigos, teses, dissertações, publicações diversas, efetuadas em revistas, anais etc. A interface deste recurso é amigável, proporcionando uma consulta com filtros por autor, palavras-chave, ano de publicação, além de propiciar a busca em diferentes bancos de dados como *Scopus*, Google Acadêmico e *Web of Science*. Os resultados da pesquisa, podem ser ranqueados por ano de publicação, número de citações ou até mesmo o tipo de documento que se deseja analisar.

Assim, devido às características elencadas e à versatilidade desta ferramenta para a pesquisa acadêmica, este *software* foi utilizado neste trabalho para compor uma busca ampla em um banco de dados variado.

Os Periódicos Qualis são o conjunto de procedimentos utilizados pela Capes, para estratificar a qualidade da produção intelectual dos programas de pós-graduação *stricto sensu* no Brasil. Este ambiente é utilizado por pesquisadores para direcionamento de suas publicações, almejando avaliações de qualidade para o programa na área de atuação. A plataforma de pesquisa utilizada no país é o Sucupira, que permite filtros pela área de conhecimento, classificação do documento (A1, A2, B1, B2, B3, B4, B5 e C), título e ISSN.

Esta plataforma de consulta foi utilizada neste trabalho, com o intuito de polarizar o número de citações e suas classificações no Qualis como critérios de qualidade primordiais nesta pesquisa.

2.1.2 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Para a rotina de pesquisa ser construída com resultados ideais ou próximo destes, foi necessário utilizar critérios. Os critérios utilizados, sem preservação da ordem, para garantir se filtrar a literatura foram:

- a. Título e resumo da obra com traços de similaridade ou proximidade com o assunto deste trabalho;
- b. O mínimo de 5 citações caso não estar classificada em Periódicos Qualis como A1, A2, B1 ou B2. Neste item foi eliminado a duplicidade de títulos pesquisados em diferentes plataformas;
- c. Ter publicação em Periódicos Qualis de classificação A1, A2, B1 ou B2 – CAPES.

Na TABELA 2 é apresentada a síntese dos principais critérios aplicados à pesquisa, porém, obras com relação de conteúdo próximas do que prescreve este trabalho, também são pré-selecionadas.

TABELA 2 – SÍNTESE DOS CRITÉRIOS DE PESQUISA

Plataforma de Pesquisa	Banco de Dados	Critérios
<i>Publish or Perish</i>	Google Acadêmico (GA)	Mínimo de 5 se Qualis < A1, A2, B1 ou B2
	<i>Scopus (SCO)</i>	
	<i>Web of Science (WS)</i>	
Sucupira - CAPES	Periódicos Qualis (QUA)	A1, A2, B1, B2

FONTE: O autor (2020).

Primeiramente, de forma genérica, foi construída uma pesquisa ampla em todas as plataformas, considerando o conjunto de palavras-chave. Posteriormente, a partir do critério “a”, são eliminadas as obras que não tem proximidade em título e resumo e com o que é apresentado neste trabalho.

Em seguida, o critério “b” é aplicado, onde a plataforma *POP* é utilizada para apresentar subsídios de obras segundo o quantitativo de citações.

Para o critério “c”, a plataforma Sucupira foi utilizada para a pesquisa de qualificação das bases, a fim de qualificar os trabalhos selecionados e que irão compor as referências principais deste trabalho.

O filtro das obras selecionadas no ambiente de pesquisa da Capes, objetivando a verificação da classificação das bases, foi: classificação de periódicos no Triênio 2010-2012 e quadriênio 2013-2016; Engenharias IV (engenharia elétrica / engenharia biomédica).

Com os filtros ativados no *POP* e Periódicos Capes para o banco de dados selecionado e o conjunto de palavras-chave supracitadas na TABELA 1, obtiveram-se os resultados quantitativos apresentados na TABELA 3, limitando-se a 1000 resultados.

TABELA 3 – RESULTADO QUANTITATIVO DA PESQUISA NO *POP*

Código Combinação	Banco de Dados	Residual após seleção pelo critério “a”	Residual após seleção pelos critérios “b” e “c”
ARDP	GA=497	GA=37 SCO=8 WS=10 QUA=23	GA=14 SCO=4 WS=9 QUA=5
	SCO=0		
	WS=0		
	QUA=0		
ARDAG	GA=186		
	SCO=0		
	WS=0		
	QUA=0		
ARMP	GA=172		
	SCO=0		
	WS=0		
	QUA=0		
ARDRIP	GA=197		
	SCO=0		
	WS=0		
	QUA=0		
ARDI	GA=1000		
	SCO=20		
	WS=18		
	QUA=46		
ARDGA	GA=1000		
	SCO=6		
	WS=3		
	QUA=50		
ARF	GA=325		
	SCO=0		
	WS=0		
	QUA=1		
ARDRII	GA=363		
	SCO=0		
	WS=0		
	QUA=3		

FONTE: O autor (2020).

Na TABELA 4 é apresentada a distribuição das obras selecionadas por citações e classificação Qualis, bem como, local de publicação.

TABELA 4 – DISTRIBUIÇÃO FINAL DA SELEÇÃO LITERÁRIA

Local de Publicação		Citações		Qualis			
Revistas/Jornais	Outros	C<5	C≥5	A1	A2	B1	B2
7	7	2	12	4	-	1	-

FONTE: O autor (2020).

Na pesquisa literária efetuada, buscaram-se referências com maior número de citações considerando obras com Qualis A1, A2, B1 e B2. Estrategicamente os resultados que foram filtrados desenharam um material qualificado e promissor para abranger os aspectos e condições a serem projetadas neste trabalho, sob o ponto de vista da construção e modelagem do algoritmo, bem como das técnicas e ponderações já pesquisadas na literatura.

2.2 APRESENTAÇÃO DA LITERATURA SELECIONADA

O estudo para alocação ótima de dispositivos de proteção e seccionamento é amplamente discutida dentro do histórico literário da área de conhecimento envolvida. Porém, neste contexto, as concessionárias que efetuam a projeção de religadores, não utilizam ferramentas de Inteligência Artificial (IA) baseadas em alguma metodologia para otimizar o processo de instalação, além de existir poucos trabalhos específicos quanto ao posicionamento ótimo desses dispositivos, sendo que os existentes, apresentam um número pequeno de citações para a base do referencial teórico.

A seguir, apresenta-se a síntese das obras pesquisadas.

Campitelli et al. (2007) trata da implementação de um algoritmo genético computacional que tem por objetivo nortear projetistas para a alocação otimizada de geração distribuída e dispositivos de proteção. O modelo matemático proposto é uma extensão melhorada do modelo proposto por Silva et al. (2002), que é obtido usando o conceito de energia não fornecida e dados históricos dos índices de faltas permanentes e temporárias no alimentador fornecido por Soudi e Tomsovic (1998 e 2001).

Darabi et al. (2011) apresenta um método de programação binária para resolver o problema de localização de dispositivos de proteção em redes de distribuição, com vistas a reduzir os principais indicadores de qualidade internacional SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) e SAIDI (*System Average Interruption Duration Index*). A função objetivo considera os custos de comutação e a vida útil dos equipamentos. O algoritmo é testado em um sistema real de distribuição ao qual propõe que este método pode ser aplicado para religadores, disjuntores, chaves fusíveis e seccionadoras.

Elmitwally et al. (2016) utiliza AG para encontrar os limitadores de corrente ideais e minimizar o acréscimo de corrente de curto-circuito decorrente da integração de Geração Distribuída (GD). A função objetivo principalmente visa minimizar simultaneamente o aumento da corrente de falta, afundamento de tensão e o custo total (tamanho) dos limitadores requeridos.

Esmaili et al. (2016) elabora estudo para realizar reconfiguração de redes de distribuição, considerando a inserção de GD. Para tanto, objetiva a redução de falhas e manutenção em níveis de curto-circuito para vários cenários. Utiliza a técnica de otimização *Fuzzy*, tendo como as restrições do problema o fluxo de potência, a importância das cargas e a tensão.

Ferreira et al. (2010) desenvolve uma metodologia para mitigar os problemas que prejudicam a confiabilidade do sistema, tais como as interrupções sofridas pelos clientes. A função multiobjetivo modelada, objetiva a minimização dos principais indicadores de continuidade utilizados internacionalmente por distribuidoras, o SAIFI, SAIDI e o MAIFI (*Momentary Average Interruption Duration Index*). As restrições impostas incluem as técnicas e econômicas. Um sistema real de 51 barras foi utilizado para gerar resultados comparativos à topologia existente.

Kondo (2015) et al. propõe, em quatro etapas, uma metodologia para instalação de religadores automatizados em alimentadores primários de distribuição, visando minimizar os indicadores de continuidade DEC e FEC, além da energia não distribuída (END). A modelagem matemática considerou a maximização dos benefícios. As restrições do problema foram elencadas como de cunho técnico e sendo: os níveis de tensão nas barras e o carregamento das linhas. A metodologia é testada em um alimentador de Concessionária do Estado de Minas Gerais – CEMIG, a partir da técnica de algoritmos genéticos.

Rutes (2017) propõe uma metodologia que utiliza AG para alocar chaves religadoras, buscando a minimização dos principais indicadores de qualidade e *payback*, a fim de melhorar a qualidade do fornecimento de energia elétrica em área rural. O trabalho testa um alimentador real que contempla restrições de acessibilidade prejudicada por atipicidades geográficas que impõem dificuldades para a equipe de restauração se deslocar e recuperar o sistema. A restrição imposta é a capacidade do sistema. O autor não elaborou uma metodologia conforme proposto por Zambom (2006) que considerou uma expectativa de DEC e FEC posterior a projeção de equipamentos de proteção com as alocações efetuadas. Portanto, os resultados obtidos foram comparados subjetivamente, o que comprometeu a eficácia da metodologia elaborada.

S. A. A. Shahriari et al. (2009) destaca a necessidade de aplicação de alocações de dispositivos limitadores de corrente, frente à introdução da GD, tendo na função objetivo, perdas elétricas, custo e a coordenação e seletividade do sistema. Utiliza a técnica de algoritmos genéticos para resolver o problema.

Silva et al (2002). aloca dispositivos seccionadores e de proteção em locais estratégicos, utilizando técnicas de programação não linear inteira do tipo binária, com um conjunto de restrições não lineares. O principal objetivo é melhorar o índice de confiabilidade da rede, reduzindo as taxas de DEC e FEC. Para a modelagem do algoritmo e a tomada de decisão, os elementos que norteiam as diretrizes do projeto são: a importância do sistema, o tipo de carga, a topologia do circuito e as limitações físicas do sistema. A modelagem matemática utilizada insere elementos que necessariamente impactam, direta e indiretamente, nos índices de qualidade e confiabilidade da energia elétrica e, criteriosamente, na melhor localização do dispositivo de proteção, sendo estes: número de clientes, taxa de faltas permanentes e temporárias, extensão do alimentador e tipo de carga conectada. Por fim, ainda é inserida a divisão entre dispositivos trifásicos e monofásicos: os trifásicos (disjuntores, religadores, seccionadores, etc) minimizam o número de clientes afetados por faltas permanentes e restauram automaticamente a energia para faltas temporárias; já os monofásicos (fusíveis) não têm capacidade de religamento e assim, faltas temporárias são tratadas como sendo faltas permanentes.

Silva et al. (2004) inclui na função objetivo da publicação de 2002, os custos de alocação e realocação. Assim, o processo é baseado na minimização dos custos fixos para a alocação e realocação, custo da energia não fornecida e custo de

restauração posterior aos eventos. As restrições para o problema de otimização foram definidas considerando os seguintes aspectos: equações de fluxo de potência; capacidade de fluxo dos alimentadores; capacidade das subestações; quantidade de dispositivos para alocação; número máximo de dispositivos que podem ser alocados em série sem perder o sincronismo de coordenação e seletividade; setores onde deve ser instalado religadores devido à importância de carga ou sujeito a altos índices de falhas temporárias; setores em que as cargas não podem ter baixo índice de qualidade da energia.

Zambon et al. (2009) desenvolve um estudo para alocação de dispositivos religadores no sistema, objetivando melhorar os índices de continuidade. O autor efetuou a reformulação das atuais equações origem dos indicadores para comparar os resultados da metodologia de alocação a uma expectativa do DEC e FEC, posterior à simulação. A expectativa de resultados com redução dos indicadores coletivos, se fez necessária para analisar os resultados da metodologia, pois, caso contrário, os resultados seriam apenas analisados no espectro histórico, depois de um certo espaço de tempo, com as modificações físicas já aplicadas na rede de distribuição, o que é inviável do ponto de vista técnico e econômico.

Na FIGURA 3 é mostrado um resumo dos melhores trabalhos pesquisados, contendo o tipo de otimização que utilizam, os dispositivos considerados para alocação, as variáveis do problema e suas restrições.

FIGURA 3 - RESUMO DOS PRINCIPAIS TRABALHOS REVISADOS

			Otimização								Equipamentos				Objetivo do Trabalho						Restrições																
Título	Autores	Citações	Qualis	Programação Binária	Fuzzy	Genetic Algorithm	Simulated Annealing	Busca Tabu Reativo	Busca Exaustiva	Branch-and-Bound	Specialized Genetic Algorithm	GD	Chaves Fusíveis	RASs	Religadores	Seccionalizadores	Disjuntores	FCLs	Redução de Perdas	DEC	FEC	MAIFI	END	Custo	Coordenação e Seletividade	Retorno de Investimento	Multas	Coordenação entre dispositivos	Fluxo de Potência	GD	Quantidade de Dispositivos para Alocação	Capacidade do Sistema	Numero Máximo de Dispositivos em Série	Dispositivos no Tronco Alimentador	Importância da Carga	Alocação em Barras com Chave Fusível	Tensão
Interactive System for Placement and Coordination of Overcurrent Protective Devices	CAMPITELLI, E. M.; L. G. W. Da Silva; R. A. F. Pereira; J. R. S. Mantovani.	5	-			x					x	x		x											x			x	x	x	x	x		x			
Reability Cost Allocation Of Protective Devices Using Binary Programming	DARABI, F.; Shooshtari, A.T.; Babaei, E.; Darabi, S	8	-		x								x		x	x	x				x	x							x								
Restoring recloser-fuse coordination by optimal fault current limiters planning in DG-integrated distribution systems	ELMITWALLY, A.; GOUDA, E. ; ELADAWY, S	36	A1			x								x				x						x	x			x	x								
Short-circuit level control through a multi objective feeder reconfiguration using fault current limiters in the presence of distributed generations	ESMAEILI, Abbas; ESMAEILI, Saeid; HOJABRI, Hosseini	29	A1		x						x							x	x											x					x	x	
Optimal Distribution Protection Designs Considering Momentary and Sustained Reliability Indices	G. D. Ferreira, A. S. Bretas and G. Cardoso	31	-			x							x		x	x	x				x	x	x					x	x								
A Methodology for Reclosers Allocation in Distribution Networks	KONDO, DV; Almeida, C. F. M.; Kagan, H.; Cunha, A. P.; Gouvea, M. R.; Felber, L. A.; Braga, M. F. Jr.; Nascimento, J. A. O	5	-			x									x						x	x		x												x	
Metodologia para a Redução dos Índices de Continuidade nas Redes de Distribuição Rurais de Energia Elétrica	RUTES, Marcelo	0	-			x									x						x	x		x	x		x										
Cost reduction of distribution network protection in presence of distributed generation using optimized fault current limiter allocation	S. A. A. Shahriari, A. Yazdian and M. R. Haghifam	42	A1			x												x	x						x	x				x	x						
Fault current limiter allocation and sizing in distribution system in presence of distributed generation	S. A. A. Shahriari, A. Yazdian and M. R. Haghifam	64	-			x												x	x						x	x			x	x							
Optimized allocation of sectionalizing switches and control and protection devices for reliability indices improvement in distribution systems	SILVA, Luis G. Wesz; PEREIRA, Rodrigo A. Fernandes; MANTOVANI, José R. Sanches.	50	-								x		x		x	x					x	x		x	x				x						x		
Alocação Otimizada de Dispositivos de Controle e Proteção em Redes de Distribuição	SILVA, Luis Gustavo W.; PEREIRA, Rodrigo A. F.; MANTOVANI, José R. Sanches	14	B1				x						x		x	x					x	x		x	x			x	x							x	
A Novel Nonlinear Programming Model for Distribution Protection Optimization	ZAMBON, Eduardo; Débora Z. Bossols ; Berilhes B. Garcia ; Elias F. Azeredo	36	A1			x		x	x				x		x	x					x	x									x		x	x			
Este Trabalho	CENTENARO, Lucas Knebel	0	-		x								x								x	x		x	x		x	x			x		x	x		x	

FONTE: O autor (2020).

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Dentre todos os trabalhos já desenvolvidos para alocação ótima tanto de religadores automáticos como outros elementos em redes de distribuição pesquisados, nenhum incluiu em sua metodologia, os requisitos referentes a compensações (penalidades, multas – coluna tarjada em verde na FIGURA 3). A utilização deste critério é relevante para o processo de decisão a fim de realizar uma alocação com menor custo, pois traz consigo, prejuízos significativos às concessionárias. Assim, este trabalho considera a compensação financeira feita pelas distribuidoras aos consumidores para mitigar os prejuízos, adequando diretamente os indicadores de qualidade.

Dentre as técnicas de otimização utilizadas pelos trabalhos pesquisados na literatura, observa-se bons resultados na aplicação de Algoritmos Genéticos na resolução dos mais diversos problemas propostos. Assim, como esta técnica traz um histórico positivo na sua aplicação, aliado à familiaridade que o autor possui com ela, este trabalho utiliza o AG para o problema de otimização que aloca religadores automáticos simplificados.

Todos os trabalhos selecionados, bem como, outros que foram descartados pelos critérios apresentados anteriormente, não desenvolveram um estudo de alocação com proposta que aborda os RASs, mas sim, propuseram modelos dedicados à alocação de dispositivos de seccionamento e proteção ou tornaram o critério de otimização genérico. Contudo, o conhecimento científico transferido para este trabalho leva em consideração os aspectos de otimização já desenvolvidos nos principais trabalhos, agregando-se o fator multas e, sob o aspecto de elemento de proteção, o RASs com suas peculiaridades de operação, instalação e benefícios técnicos quando de sua implementação utilizando a otimização inteligente.

3 RELIGADOR AUTOMÁTICO

Neste capítulo são descritas as classes e tipos de religadores, aplicações e características técnicas, bem como, formas de operação em eventos transitórios e permanente. É apresentado o RAS, as diferenças deste equipamento de proteção aos demais dispositivos religadores, efetuando uma análise e definições para a proposta deste trabalho.

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Na grande parcela das configurações de redes de distribuição de energia elétrica, os alimentadores são protegidos na saída de subestações por um disjuntor provido de relé microprocessado ou religador.

As barras ao longo do alimentador que contemplam ramais derivados do tronco, normalmente são protegidos pela atuação de fusíveis, adaptados ao corpo de uma chave manual. Já que o elo fusível tem a característica de atuação sob influência de temperatura em seu corpo metálico, sem possibilidade de reconstituição automática após a sua deterioração, este elemento não é capaz de distinguir as faltas permanentes de temporárias no sistema de distribuição. Assim, em qualquer atuação, o elemento fusível deve ser substituído localmente por uma equipe.

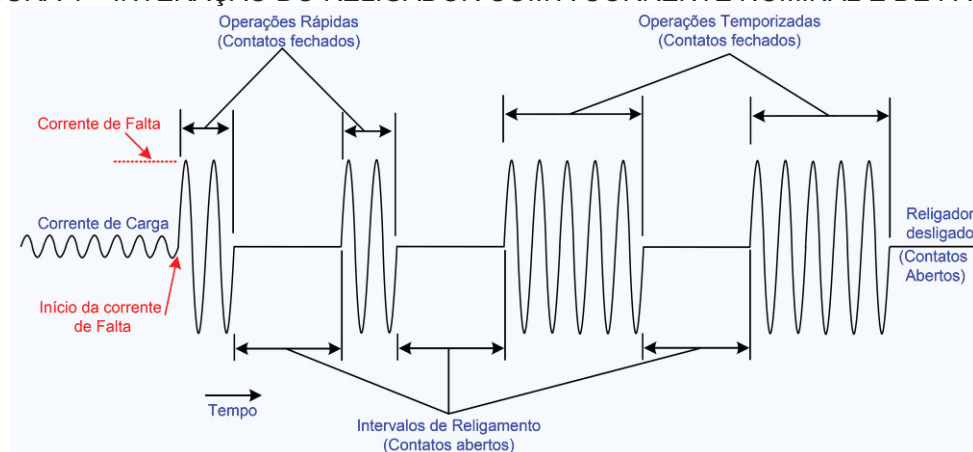
O trabalho de deslocamento e reparo pela equipe técnica, pode levar horas para restabelecer a alimentação elétrica. Isso onera em custos operacionais desnecessários para a concessionária, além de os clientes a jusante ficarem sem fornecimento por longos períodos.

Assim, a melhor forma de efetuar o restabelecimento de energia elétrica de forma automática em menor tempo, evitando custos de deslocamento é com a aplicação de religadores. Estes dispositivos são elementos essenciais para o cumprimento dos índices de confiabilidade, impostos pelo regulador no fornecimento de energia elétrica aos consumidores. São ideais na medida em que interrompe faltas transitórias, evitando a queima de elos fusíveis ou, se bem coordenado com os elos, seccionando apenas o trecho sob defeito, permanecendo os demais energizados (SILVA et al., 2002).

O religador é um equipamento de proteção controlado para mitigar problemas técnicos pelo acréscimo exponencial abrupto da corrente no sistema *versus* tempo.

Este dispositivo é utilizado em circuitos aéreos de distribuição, que opera quando detecta correntes de curto-circuito, desligando e religando automaticamente os circuitos baseado em uma sequência pré-determinada. O modo de operação para desligamento do circuito tem o objetivo de interromper a circulação de corrente com valores fora da curva de suportabilidade dos elementos que constituem as redes de distribuição, bem como, para preservar as cargas dos efeitos da sobrecorrente. Para faltas temporárias em que a sequência de religamentos é bem sucedida, o religador restaura a continuidade do circuito e em seguida é reiniciado. Se a falta que originou a operação do religador ainda persiste, então o religador permanece aberto após um número de operações pré-definidas, isolando a seção em falta do resto do sistema (LEÃO et al., 2003). A FIGURA 4 mostra os detalhes da operação de interrupção e sequências na tentativa de reativar o sistema.

FIGURA 4 – INTERAÇÃO DO RELIGADOR COM A CORRENTE NOMINAL E DE FALTA.



FONTE: FRITZEN (2020).

No período de desconexão (contatos abertos) e bloqueio do religador (religador desligado), a equipe da concessionária percorre o trecho da rede com o intuito de corrigir o problema que ocasionou a origem do evento detectado pelo religador.

3.2 APLICAÇÕES

A aplicação dos religadores automáticos é efetuada geralmente em redes de média tensão, com topologias monofásicas, bifásicas ou trifásicas, com a confecção

de fabricação direcionada a atender a especificidade do sistema que estará inserido, podendo ser, conforme Fritzen:

- ✓ Na saída de subestações alimentadoras, como um dispositivo de proteção principal, tendo na retaguarda o disjuntor;
- ✓ Ao longo de tronco alimentadores, prevendo a proteção seletiva;
- ✓ Em derivações do tronco alimentador, coordenando com elos fusíveis, religadores e outros dispositivos à jusante e montante.
- ✓ Na forma de providenciar retaguarda do elo fusível, em ramal derivado do tronco alimentador.

3.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS

Estes dispositivos têm uma classificação previamente padronizada comercialmente, propondo modelos o mais próximo possível das características e peculiaridades dos sistemas de distribuição conforme diferentes regiões do país. Assim, classificam-se de acordo com diversos tipos.

3.3.1 QUANTO AO NÚMERO DE FASES

3.3.1.1 MONOFÁSICOS

Protegem sistemas de uma única fase. Na ocorrência de faltas para a terra, é interrompida a circulação de corrente apenas na fase de atuação. Os ramais importantes, derivados do tronco alimentador, devem ser protegidos por este dispositivo, guardando a proteção principal de retaguarda. A característica estrutural para a instalação é pequena e com custo médio.

3.3.1.2 MONOFÁSICOS COM OPERAÇÃO BIFÁSICA OU TRIFÁSICA DE BLOQUEIO

Protegem sistemas bifásicos e trifásicos com a interrupção na circulação de corrente de forma simultânea nas fases aplicadas da linha, mesmo que o evento ocorra em apenas uma destas fases. A característica estrutural de instalação na rede

é pequena, porém, possui custo similar ao dispositivo trifásico, quando aplicado à sistemas superiores ao monofásico.

3.3.1.3 TRIFÁSICOS

Atuam com simultaneidade aos efeitos causados por qualquer evento em fases da linha que houve a instalação. Pela confiabilidade, vida útil e alto valor agregado de equipamentos e estrutura de instalação, sendo utilizado largamente em troncos alimentadores e saída de subestações.

3.3.1.4 TRIFÁSICOS COM OPERAÇÃO MONOFÁSICA E BLOQUEIO TRIFÁSICO

Possuem três religadores monofásicos, instalados em um único conjunto, com as três fases de comunicação no disparo por eventos, interconectadas para desarme simultâneo. A diferença deste modelo ao trifásico absoluto é o médio valor agregado de produção e aspectos técnicos de isolamento entre fases.

3.3.2 QUANTO AO TIPO DO CONTROLE

3.3.2.1 HIDRÁULICO

As correntes são detectadas por bobinas de disparo conectadas em série com a linha. Quando a corrente na bobina é igual ou superior à corrente mínima de disparo, o núcleo tem deslocamento no sentido de desconectar fonte e carga do alimentador protegido. Este controle é simples e possui vida útil prolongada, porém, a precisão é deficiente e a velocidade de interrupção em ocorrência é baixa.

3.3.2.2 ELETRÔNICO

Os sinais para ao controle eletrônico são obtidos a partir de corrente, montados internamente. O circuito eletrônico controla as funções de disparo e religamento do mecanismo do religador. As correntes são detectadas por um sistema microprocessado eletrônico para o disparo de interrupção da circulação de corrente. Devido as características operacionais e técnicas, possui vida útil mediana, maior

flexibilidade em ajustes operacionais às peculiaridades da rede que se deseja a instalação.

3.3.3 QUANTO AO MEIO DE INTERRUPÇÃO

A interrupção do sistema quando deflagrada alguma anormalidade de corrente é efetuada pelo religador, gerando, nos terminais de conexão interna deste dispositivo, um arco elétrico para cada fase. Este efeito, se não eliminado, pode danificar os contatos fonte/carga, provocando aquecimento, perdas elétricas, redução de vida útil do equipamento etc. Assim, para eliminar os efeitos causados por manobras conectivas é utilizado duas formas: a interrupção a vácuo ou a óleo.

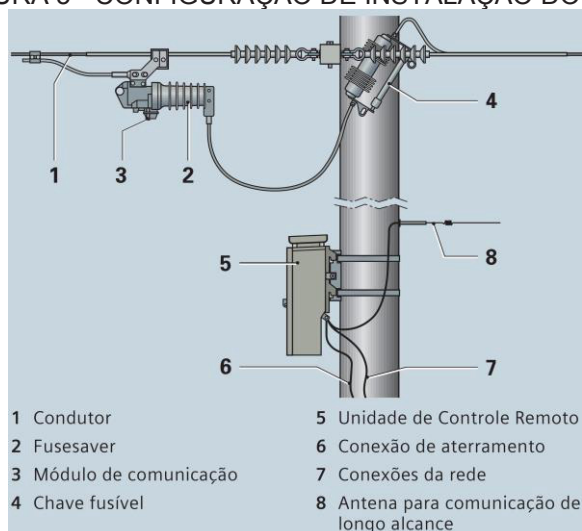
3.4 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA

Em estudos de planejamento da distribuição, a utilização do religador tradicional está diretamente relacionada a melhoria da qualidade da energia entregue aos consumidores, porém, nem sempre a instalação deste dispositivo traz um custo-benefício atrativo para as concessionárias – este custo têm relação direta ao valor monetário pago para a instalação do dispositivo de proteção, já o benefício é o retorno financeiro com a instalação deste. Com isso, as distribuidoras acabam por efetuar a projeção de proteções apenas nos principais alimentadores e ramificações, desprezando pequenas cargas e aceitando o pagamento de multas pela transgressão dos limites de continuidade aos consumidores prejudicados.

Muitas pesquisas foram efetuadas com a finalidade de reduzir o custo do equipamento religador tradicional para propor um benefício atrativo na expansão e melhoria de sistemas. Assim, foi desenvolvido uma nova classe de religadores automáticos monofásicos, também chamado neste trabalho de RAS (tendo como nome comercial, utilizado pelos fabricantes: Religador Modular Compacto) sendo este com controle eletrônico, interrupção a vácuo, com propostas de instalação em sistemas monofásicos, bifásicos e trifásicos – configurável para atuar com ou sem simultaneidade de disparo nas fases do sistema implementado e ainda, de baixo custo e de tamanho estrutural reduzido se comparado ao dispositivo automático de proteção tradicionalmente utilizado na distribuição.

O RAS foi desenvolvido para ser aplicado em qualquer local, onde uma das suas diferenças é permitir a instalação em série com uma chave fusível, onde ao detectar um evento de sobrecorrente, é acionado antes que o elo fusível que está na retaguarda entre em fusão e desligue permanentemente o ramal que está protegendo (FIGURA 5). Este aspecto é um potencial redutor de custos na instalação, pois não há necessidade de remodelação estrutural para comportar o equipamento no ponto de instalação, tão pouco, a necessidade de estudos na topologia de rede existente para determinar o ajuste do dispositivo. Simplesmente o religador é adaptado às condições da rede existente, através de simples configuração, sincronizada com a capacidade do elo fusível que é protegido.

FIGURA 5 - CONFIGURAÇÃO DE INSTALAÇÃO DO RAS



FONTE: Siemens *Fusesaver* e Unidade de Controle Remoto (2017).

3.5 ANÁLISE E DEFINIÇÕES

Na literatura, existem apenas trabalhos que contemplam a alocação de religadores automáticos de grande e médio porte com custos elevados de investimento, impossibilitando a aplicabilidade deste para mitigar problemas de qualidade em qualquer barra do sistema visto que, alguns sistemas se caso aplicado tal equipamento, o horizonte de retorno financeiro para a concessionária nunca iria acontecer. Além disso, nestes trabalhos faz-se a alocação de equipamentos tradicionais que requerem o cálculo de correntes de falta. Já neste trabalho, a aplicação de RAS tem a função de providenciar retaguarda do fusível, sendo assim

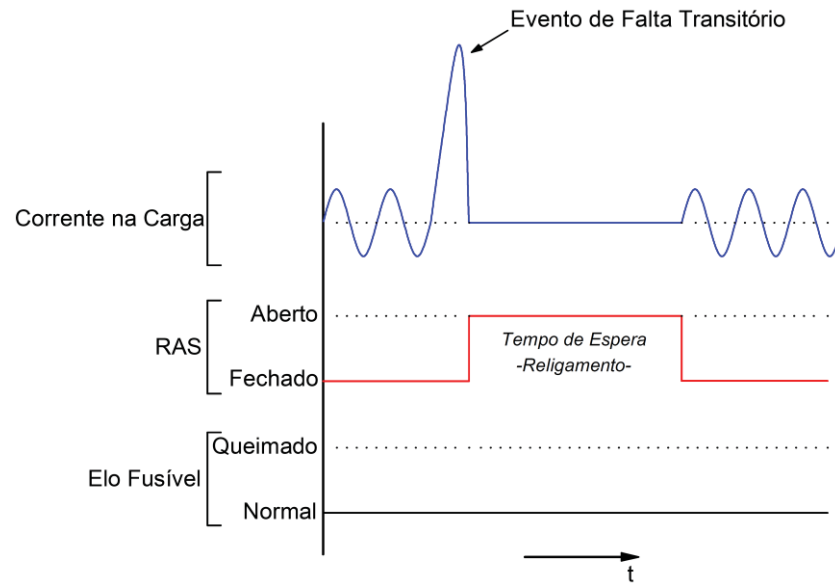
possível utilizar os mesmos ajustes de proteção do fusível, não necessitando realizar novos cálculos de correntes de curto-circuito.

Grande parcela das barras que possuem derivação do tronco alimentador contém chaves fusíveis instaladas. Isso se deve ao custo-benefício direto do fusível que, num primeiro momento, evita a aplicação de dispositivos mais caros em derivações com poucos clientes e retorno financeiro intangível. No contraponto, tem-se o RAS sendo um dispositivo que traz um custo reduzido de aplicação. Conforme informação contida em catálogo de fabricantes, este dispositivo pode ser instalado em qualquer barra do sistema possuindo um *payback* atrativo, pois melhora os indicadores de qualidade quando estes são incluídos em processos de otimização de alocação, com vistas a potencializar o custo-benefício.

Em estudos já mencionados na pesquisa literária, utilizam-se parâmetros e métricas de otimização que este trabalho também está considerando. Porém, em alguns trabalhos pesquisados, a alocação dos dispositivos se faz com a retirada completa dos equipamentos pré-existent, sendo que esta ação impacta em custo de instalação e, por fim, prejudica o *payback*. Como a proposta deste trabalho é minimizar custos e, considerando que grande parcela das linhas laterais ao tronco possuem proteção com chave fusível e ainda, a configuração mais simplificada e utilizada pelas distribuidoras na instalação do RAS é a projeção do dispositivo na guarda do elo fusível do ramal que está sendo protegido, evita-se a retirada dos dispositivos já instalados e apenas projeta-se o RAS como um elemento de proteção auxiliar à eliminação de faltas transitórias. Entende-se ainda, que a retirada de elementos da rede, geram passivos financeiros desnecessários uma vez que envolvem equipes maiores, com treinamento específico. Complementarmente, o custo técnico no estudo de coordenação/seletividade é descartado, pois neste formato o RAS é sincronizado em coordenação com o elo fusível já instalado.

Na FIGURA 6 é apresentado a atuação em uma falta transitória, onde observa-se a retaguarda do elo fusível e a guarda do RAS; sendo que as falhas na rede desaparecem durante o tempo de espera do RAS. Após o fechamento, o fornecimento de energia é restaurado. A chave fusível não opera e o RAS está pronto para a próxima falta. Apenas os clientes da linha afetada sentem a interrupção de energia durante o tempo de espera, todos os outros consumidores ligados ao alimentador, incluindo as linhas laterais adjacentes à montante do elo fusível, não percebem a operação.

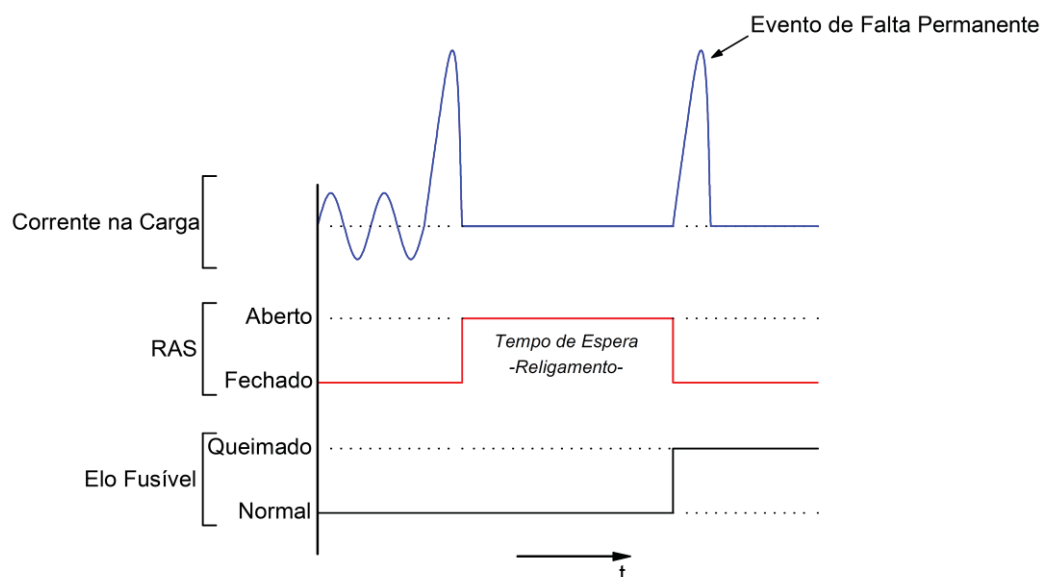
FIGURA 6 - DESEMPENHO DO RAS PARA FALTAS TRANSITÓRIAS



FONTE: O autor (2020).

Para as faltas com característica permanente (FIGURA 7), no fechamento do RAS após o tempo de espera, o distúrbio na linha ainda está presente, resultando em uma corrente de falta imediata. O RAS não opera novamente, permitindo que a corrente de falta queime o elo fusível à montante. Contudo, o RAS evita a queima de elos fusíveis em casos que o evento ocorrido seja de características claramente transitórias e não permanente, ou seja, o dispositivo automático efetua a leitura da corrente da linha para denotar os parâmetros da falha, coordenando com a curva de atuação do elo fusível posicionado na retaguarda.

FIGURA 7 - DESEMPENHO DO RAS PARA FALTAS PERMANENTES



FONTE: O autor (2020)

O tempo de espera e reconexão do RAS permitindo a passagem de corrente entre fonte e carga é ajustado conforme a determinação do planejador. No ANEXO II - TABELA 1 AN.2, é apresentado os tempos de atuação do RAS, contemplando a sequência nominal de operação e o tempo máximo de abertura e fechamento do dispositivo, sob a influência de eventos.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Com a crescente demanda na utilização dos RAS em ramais anteriormente não assistidos por proteção automática devido ao custo-benefício, aspectos técnicos favoráveis ao *payback* e, por ser um produto que está sendo difundido aos poucos entre concessionárias, existe a necessidade emergente na construção de critérios de alocação para estes dispositivos, considerando as suas peculiaridades e o conjunto de parâmetros já conhecidos de outros trabalhos registrados. Assim, promover a alocação ótima deste novo elemento na rede de distribuição propicia um arranjo que entrega resultados econômicos e redução dos problemas de qualidade da energia elétrica.

A quantidade de redes de distribuição no país é significativa, com grande dispersão pelo extenso território, tornando-se impossível a instalação de dispositivos em todas as barras prejudicadas do sistema. Assim, dentro do planejamento, deve-se encontrar a melhor localização de equipamentos ao longo dos alimentadores, avaliando os custos de operação, manutenção, instalação, histórico de índices de qualidade, ponderando os ressarcimentos efetuados aos consumidores pela transgressão dos limites de qualidade, erros de planejamento que podem não trazer retornos significativos, prejudicando o lucro e ao mesmo tempo a sustentabilidade financeira.

A aplicação de RAS em redes de distribuição, torna versátil a correção dos principais indicadores de qualidade, visto as suas características e benefício para as concessionárias e sistema. Porém, não se pode aplicar estes dispositivos de forma aleatória sem critérios matemáticos e determinísticos para uma solução otimizada possível. Assim, estratégias de planejamento da operação, manutenção e expansão dos sistemas de distribuição de energia elétrica devem usar metodologias matemáticas que auxiliem a tomada de decisão dos planejadores, a fim de ser obter

um ótimo local de instalação de RASs, que reduza custos e consequentemente melhore a qualidade da energia com retornos financeiros em menor tempo possível.

4 PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO PROPOSTO

Esta seção tem como objetivo apresentar a formulação matemática do problema de otimização que aloca RASs em redes de distribuição, considerando as analogias dos capítulos anteriores, bem como, a modelagem do AG.

4.1 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A alocação de RASs pode ser realizada em todas as barras da rede elétrica. Mas, devido ao grande número de possibilidades para solucionar o problema, seleciona-se previamente como barras candidatas à alocação, aquelas que já contém chaves fusíveis. Desse modo, não é necessário realizar ajustes de proteção do RAS, pois é utilizado a curva de atuação do próprio elemento fusível já instalado em conjunto com os ajustes propostos pelo fabricante, para cada tipo e capacidade da chave fusível.

Além disso, este trabalho considerou a não retirada das chaves fusíveis, com justificativas apresentadas no Capítulo 3. Desta forma, partiu-se do pressuposto que todas as linhas derivadas do tronco alimentador têm chave fusível, desejando-se aplicar a metodologia nestas que, por sua vez, correspondem a grande parcela dos problemas no cômputo do ressarcimento aos consumidores, devido a transgressão dos limites de qualidade da energia.

4.1.1 FUNÇÃO MUTIOBJETIVO

A função multiobjetivo (FO) a ser minimizada durante o processo de alocação é composta por alguns critérios de otimização, cujas premissas são:

- ✓ A topologia da rede é desconsiderada, pois a finalidade deste trabalho é alocar RAS como retaguarda dos elos fusíveis;
- ✓ A variável de otimização do problema de otimização é a localização dos RASs é o número de RASs;
- ✓ O histórico de dados são parâmetros de entrada do problema;
- ✓ As restrições do problema são consideradas no processo de aptidão, como descrito em tópico da codificação do indivíduo;

- ✓ A utilização de RASs em série foi desconsiderada, pois impactaria em uma análise paralela e com isso, a necessidade de incluir outras restrições ao problema, ao qual não é objetivo deste trabalho.

Assim:

$$FO = \min[w_c \cdot f_c - w_p \cdot f_p - w_m \cdot f_m + w_r \cdot f_r] \quad (1)$$

onde:

w_c : índice de ponderação da função f_c ;

w_p : índice de ponderação da função f_p ;

w_m : índice de ponderação da função f_m ;

w_r : índice de ponderação da função f_r ;

f_c : representa o custo da instalação, operação e manutenção do RAS;

f_p : representa a priorização da instalação de RAS em locais com taxas de falhas elevadas;

f_m : representa benefícios obtidos por custo evitado relativo às multas;

f_r : representa retorno de investimento.

4.1.1.1 FUNÇÃO CUSTO (F_c)

A parcela f_c da FO propõe que a solução para o problema tenha o menor custo associado aos RASs, definida por:

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^{nRASs} [CI_i + CM_i + CO_i]}{\sum_{i=1}^{nRASs} [CI_{imax} + CM_{imax} + CO_{imax}]} \quad (2)$$

onde:

$nRASs$: número de religadores alocados;

CI_i : custo de instalação do RAS conectado na barra i ;

CM_i : custo de manutenção do RAS conectado na barra i ;

CO_i : custo de operação do RAS conectado na barra i .

Os valores $(CI_{imax} + CM_{imax} + CO_{imax})$ correspondem aos maiores valores possíveis de custo referente a cada barra i , os quais são utilizados para normalizar a função f_c .

Sendo que:

$$CI_i = nf_i * (Ceq_i + CS_i) \quad (3)$$

onde:

nf_i : número de fases na barra i ;

Ceq_i : custo de um equipamento e acessórios conectados na barra i em R\$;

CS_i : custo do serviço de instalação de um equipamento conectado na barra i em R\$.

O custo de serviço é relacionado à equipe de trabalho que efetuará a instalação do RAS, sendo atribuído à unidade de serviço (US) o valor correspondente as despesas de pessoal para a instalação do dispositivo e suas ferramentas e materiais na barra de alocação. Este valor é variável e de acordo com os preços de mercado da região de localização da distribuidora. Assim:

$$CS_i = US + Cdesl_i \quad (4)$$

onde:

US : unidade de serviço para a instalação do RAS (R\$);

$Cdesl_i$: custo de deslocamento da equipe para realizar a instalação do equipamento conectado na barra i , o qual depende da sua localização, em R\$.

O custo de deslocamento é composto por valores monetários gastos com pessoal em trânsito, da base operacional da concessionária até o ponto de instalação e ainda, o retorno da equipe. Computa-se ainda os valores do combustível e depreciação das peças do veículo utilizado para o transporte.

Segundo Silva et al. (2002), os sistemas de distribuição de energia elétrica estão susceptíveis a faltas que podem ser temporárias ou permanentes. As faltas transitórias são aquelas cuja duração é limitada ao período necessário para restabelecer o serviço através de operação automática do equipamento de proteção que desligou o circuito ou parte dele. As faltas permanentes são todas as interrupções não classificadas como temporárias ou programadas. Contudo, a TABELA 5 apresenta as probabilidades na ocorrência de faltas em diferentes composições do sistema.

TABELA 5 – COMPOSIÇÃO PROBABILÍSTICA ENTRE OS TIPOS DE FALTAS E COMPOSIÇÃO DAS MESMAS

Faltas	%	Permanentes (%)	Transitórias (%)
Trifásicas	2	95	5
Bifásicas	11	70	30
Fase -Terra	79	20	80
Outros	8	-	-

FONTE: SILVA et al. (2002).

Efetuando a leitura na TABELA 5, tem-se que a grande maioria das falhas temporárias em redes de distribuição estão relacionadas ao sistema monofásico. Este sistema compõe uma parcela significativa de extensão em meios principalmente rurais, onde há poucos consumidores, distantes da base de operação e ainda, são protegidos apenas por chaves fusíveis. Porém, não se pode desconsiderar as faltas permanentes das outras configurações do sistema e muito menos a sua localização, visto que estes podem estar desassistidos de proteção eletrônica automática e colaborar para a probabilidade de incidências com longa duração.

Entre as faltas transitórias, o máximo percentual que contribui para o impacto nos custos de manutenção é ocasionado em 80% dos eventos, ou seja, a distribuidora terá benefícios se este percentual de faltas puder ser eliminado com a alocação de RAS, aumentando sensivelmente a relação custo-benefício. Em um cenário prejudicado, 20% são falhas permanentes, impactando em custos de manutenção inevitáveis. Assim, observando o contexto de custos de manutenção quanto às falhas e que os religadores simplificados possuem, conforme determinado pelos fabricantes, uma vida útil que supera a quantidade do período amostral de *payback* para atividades mecânicas sem que ocorram falhas, pode-se obter a equação:

$$CM_i = \left[\begin{array}{l} -(0,80 * N_{op} * (C_{fusei} + C_{desl_i})) + \\ (0,20 * N_{op} * (C_{fusei} + C_{desl_i})) \end{array} \right] \quad (5)$$

obtendo-se:

$$CM_i = -0,6 * N_{op} * (C_{fusei} + C_{desl_i}) \quad (6)$$

sendo:

N_{op} : número de fusíveis evitados devido a operação do RAS; relaciona-se diretamente a quantidade de eventos transitórios ocorridos na barra i .

C_{fusei} : custo do fusível a jusante do RAS que teve atuação evitada.

O sinal negativo da equação (6) representa o valor evitado de se fazer manutenção das chaves fusíveis.

O RAS tem em seu corpo um conjunto de baterias recarregáveis para o sistema de comunicação e atuação, necessitando periodicamente de monitoramento para verificar o estado de conservação de carga. Assim, há a necessidade de inserir o custo de operação quando da alocação do equipamento, pois tem-se para o monitoramento um deslocamento de equipe da concessionária para a realização do trabalho. A média de vida útil do equipamento é de 8 anos, sem falhas intermediárias neste período e ainda, a média de operações mecânicas é de 2000 operações (SIEMENS; S&C).

Para a composição do custo de operação, levou-se em consideração que a quantidade de operações do equipamento é desprezível, visto que a vida útil das baterias do RAS é elevada e, por mais que determinada barra apresente seguidas falhas, o religador é capaz de intervir sem necessitar de manutenções preventivas. Caso havendo a necessidade de substituição de baterias, estas são pontuais e o seu valor não impacta para a análise formulada. Porém, os custos de deslocamento para o monitoramento das condições do sistema têm a periodicidade de 6 meses, ou seja, 2 períodos no ano. Com isso, define-se o custo de operação:

$$CO_i = \frac{\text{Payback (Anos)}}{2 (\text{períodos}) * 2 (\text{Anos})} * C_{desl_i} = \frac{1}{2} * C_{desl_i} \quad (7)$$

Para a equação 7, o *payback* utilizado é de 2 anos, pois considera-se atrativo um retorno de investimento no tempo, menor ou igual a este intervalo.

4.1.1.2 FUNÇÃO PRIORIZAÇÃO DE INSTALAÇÃO (F_P)

Segundo Silva et al. (2002), deve-se inserir RASs de modo a impactar direta ou indiretamente nos índices de qualidade e confiabilidade da energia elétrica.

Suponha que o RAS seja instalado na barra i da rede e que existam: número de clientes instalados a jusante da barra i (N_{qi}) com taxa de faltas permanentes igual a λ_{qi} e temporárias igual a γ_{qi} .

O FEC, conforme PRODIST, pode ser definido como sendo o número de interrupções ocorrido em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado.

As faltas temporárias são as afetadas diretamente com a instalação dos RASs, assim, para o índice de confiabilidade do sistema e cálculo da taxa de falha do deste, apenas é considerado a média de interrupções (FEC) por aglomerado de consumidores, apresentando conforme SILVA et al. (2002):

$$FEC = \frac{\sum_{j=1}^k ca_j}{Cc} \quad (8)$$

onde:

ca_j : número de unidades consumidoras interrompidas em um evento j , no período de apuração;

j : índice de eventos ocorridos no sistema que provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;

k : número máximo de eventos no período considerado;

Cc : número total de unidades consumidoras, do conjunto considerado, no final do período de apuração.

Analisando a equação (8), o indicador FEC é modelado sob as condições de interrupção do sistema, podendo então ser tratado e relacionado ao índice de ocorrências de falhas da barra equivalente (ICR_i). O registro histórico de eventos na barra considerada está relacionado às taxas de falhas temporárias (γ_{qi}) ocorrida para uma população de consumidores ($ca_j = N_{qi}$). O índice de falhas então, precisa ser normalizado ao conjunto total de consumidores do alimentador ($Cc = N_T$) considerado. Assim, os RASs devem ser instalados em locais onde as taxas de falhas temporárias sejam maiores, pois são exatamente esses tipos de falhas que serão minimizadas pela substituição de chaves fusíveis por religadores simplificados:

$$ICR_i = \frac{\gamma_{qi} * N_{qi}}{N_T} \quad (9)$$

onde:

ICR_i : índice de ocorrências de faltas na barra i ;

γ_{qi} : taxas de falhas temporárias na barra i ;

N_{qi} : número de consumidores a jusante da barra i ;

N_T : número total de consumidores no alimentador.

Assim, a parcela f_p da FO propõe a maximização da soma dos índices de ocorrências de falta:

$$f_p = \frac{\sum_{i=1}^{nRAS} ICR_i}{\sum_{i=1}^{nRAS} ICR_{i_{max}}} \quad (10)$$

onde:

$ICR_{i_{max}}$: corresponde ao maior valor obtido, a partir da equação (9), calculado como se todas as barras candidatas à alocação tivessem a maior taxa de falha fornecida pelos dados históricos, a fim de normalizar a função f_p .

4.1.1.3 FUNÇÃO MULTAS (F_M)

O documento “Procedimento de Fiscalização da Apuração dos Indicadores de Qualidade do Serviço”, vigente pela ANEEL desde 2014, visa à uniformização dos procedimentos que devem ser adotados na fiscalização da apuração dos indicadores de continuidade coletivos e individuais, assim como do cálculo e pagamento da compensação por transgressão dos limites estabelecidos pelo regulador.

Assim, o valor de ressarcimento devido às falhas por duração para cada ponto de conexão i , conforme PRODIST (ANEEL, 2018) é dado como:

$$ValorDIC_i = \left(\frac{DICv_i}{DICp_i} - 1 \right) DICp_i \cdot \frac{EUSDmédio}{730} \cdot ke_i \quad (11)$$

$$ValorDMIC_i = \left(\frac{DMICv_i}{DMICp_i} - 1 \right) DMICp_i \cdot \frac{EUSDmédio}{730} \cdot ke_i \quad (12)$$

$$ValorDICRIC_i = \left(\frac{DICRIv_i}{DICRIp_i} - 1 \right) DICRIp_i \cdot \frac{EUSDmédio}{730} \cdot ke_i \quad (13)$$

onde:

$DICv_i$: duração de interrupção por ponto de conexão i , expresso em horas e centésimos de hora para intervalo de um ano;

$DICp_i$: limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de duração de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão i , expresso em horas e centésimos de hora;

$DMICv_i$: duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão i , conforme cada caso, verificada no período considerado, expressa em horas e centésimos de hora;

$DMICp_i$: limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão i , expresso em horas e centésimos de hora;

$DICRIv_i$: duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão i , expressa em horas e centésimos de hora.

$DICRIp_i$: limite de continuidade estabelecido para o indicador de duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão i , expresso em horas e centésimos de hora;

ke_i : 20 (vinte), fixado por PRODIST para ponto de conexão atendido em Média Tensão;

$EUSDmédio$: média aritmética dos encargos de uso do sistema de distribuição correspondentes aos meses do período de apuração do indicador.

O período de apuração considerado para os indicadores é anual, visto que os indicadores globais que a ANEEL publica, para cada distribuidora, mantêm este padrão.

O valor de compensação total por ponto de conexão ($C_{TDF,i}$), quanto à duração das faltas:

$$C_{TDFi} = ValorDIC_i + ValorDMIC_i + ValorDICRIC_i \quad (14)$$

Já o valor de ressarcimento devido a falhas por frequência para cada ponto de conexão i é:

$$ValorFIC_i = \left(\frac{FICv_i}{FICp_i} - 1 \right) DICp_i \cdot \frac{EUSDmédio}{730} \cdot ke_i \quad (15)$$

onde:

$FICv_i$: frequência de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão i , conforme cada caso, verificada no período considerado, expressa em número de interrupções;

$FICp_i$: limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de frequência de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão i , expresso em número de interrupções e centésimo do número de interrupções.

Assim, o valor ressarcimento por falhas para cada ponto de conexão i é:

$$Ressarcimento_i = C_{TDF,i} + ValorFIC_i. \quad (16)$$

Supondo que a taxa de falhas temporárias para cada ponto de conexão seja igual a γ_{qi} (%), pode-se propor que ao se poupar o desligamento em cada ponto de conexão i , devido à instalação de RAS_i, está sendo economizado um valor, nomeado como benefício pela instalação de RASs:

$$Beneficio_i = \gamma_{qi} \cdot \left(\frac{Ressarcimento_i}{100} \right) \quad (17)$$

Assim, o benefício total obtido pela instalação de cada RAS é:

$$f_m = \frac{\sum_{i=1}^{nRASs} Beneficio_i}{\sum_{i=1}^{nRASs} Beneficio_{i_{max}}} \quad (18)$$

onde:

$Beneficio_{i_{max}}$: corresponde ao maior valor obtido, dentre os elementos calculados a partir da equação (17), como se todas as barras candidatas à alocação assumissem os piores valores interrupções e duração dos eventos, a fim de normalizar a função f_m .

4.1.1.4 FUNÇÃO RETORNO DE INVESTIMENTO (F_R)

Para se analisar a taxa de retorno de investimento devido a instalação dos RASs, levando em consideração as parcelas da função multiobjetivo, foi utilizado o método *payback* simples.

Primeiramente, define-se que o período de recuperação do investimento (PRI), onde na literatura é designado como *payback*, é o intervalo compreendido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado, se iguala ao valor do investimento (RUTES, 2017).

O período de observação normalmente satisfeito para processos comerciais em relação ao retorno financeiro é de cinco anos. A simulação efetuada, considera a condição de retorno financeiro com o máximo de dois anos – limite de viabilidade econômica contida em catálogos dos equipamentos RASs, porém, é satisfeito ter um retorno financeiro de até cinco anos se considerar um bloco grande de RASs alocados. Assim, a função objetivo minimizará o *payback* até que este atenda ao limite máximo de dois anos e caso não seja encontrado a melhor solução dentro da quantidade de gerações propostas, apresenta-se o melhor cenário.

O investimento (custo de instalação, manutenção e operação), computado na função f_c e os benefícios relativos funções f_p e f_m , pode-se escrever a equação (19), para obter a função f_r :

$$f_r = \text{Payback} = \frac{f_c}{f_p + f_m} \quad (19)$$

A função de retorno é atributo adicional à função multiobjetivo onde as condições de seleção do conjunto de barras de alocação, que obedecem ao limite de dois anos, são propostas como método de resolução do problema, mais especificamente na FIGURA 11 e equação (23) da abordagem para análise dos resultados.

4.2 MÉTODO DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Dentro das diversas técnicas de programação computacional disponibilizadas na literatura, uma solução ótima de um problema de otimização, composto por vários critérios de otimização, pode ser obtida iterativamente até a obtenção da melhor resposta. Dentre esta classe de heurísticas disponíveis, este trabalho selecionou o Algoritmo Genético que, primeiramente, gera uma população inicial aleatória, dando origem a uma solução não ótima, para que, por meio de operadores aplicados repetidamente, busca o aprimoramento dos indivíduos de cada população gerada a cada geração, até a obtenção de um resultado ótimo. Para as iterações dentro das técnicas utilizadas, existem *softwares* computacionais eficientes que produzem respostas rápidas e com baixo custo operacional.

4.2.1 ALGORITMO GENÉTICO

A melhor solução para um determinado problema pode ser obtida através dos mais diversos métodos de otimização (OLIVEIRA, 2015). E, dentre eles, cita-se a técnica dos AG, que fornece um mecanismo de busca adaptativa que se baseia no princípio Darwiniano de reprodução e sobrevivência dos mais aptos. Os princípios da natureza nos quais os AGs se inspiram são simples. De acordo com a teoria de Darwin, o princípio de seleção privilegia os indivíduos mais aptos com maior longevidade e, portanto, com maior probabilidade de reprodução. Indivíduos com mais descendentes têm mais chance de perpetuarem seus códigos genéticos nas próximas gerações. Tais códigos genéticos constituem a identidade de cada indivíduo e estão representados nos cromossomos (PACHECO, 1999).

4.2.1.1 SÍNTESE

O AG foi inventado por John Holland no final da década de 60 buscando inspiração no que se conhece sobre o processo de evolução natural, conhecimento este iniciado solidamente com a teoria da evolução de Darwin e seu famoso *The Origin of Species* (BARBOSA, 1997).

Os AGs constituem uma classe de ferramenta muito versátil e robusta e que pode ser utilizada na solução de problemas de otimização embora devam ser

considerados estritamente minimizadores de funções (DE JUNG, 1992). Quando usado como algoritmo de minimização um AG se distingue das técnicas mais comuns de programação matemática basicamente por:

- ✓ Empregar uma população de indivíduos, ou soluções;
- ✓ Trabalhar sobre uma codificação das possíveis soluções (genótipos) e não sobre as soluções (fenótipos) propriamente ditas;
- ✓ Empregar regras de transição probabilísticas;
- ✓ Não requerer informações adicionais (derivadas, por exemplo) sobre a função a otimizar.

Desta forma, a busca de solução pode se dar em conjuntos não convexos (HAJELA, 1990) e mesmo disjuntos, com funções objetivo também não convexas e não diferenciáveis podendo-se trabalhar simultaneamente com variáveis reais, lógicas e inteiras. É de se ressaltar também que os algoritmos genéticos não são facilmente presos a mínimos locais como é o caso dos algoritmos usuais de programação matemática. Quando utilizado a técnica dos AGs, se pode obter resultados não projetados e planejados, visto que este produto é derivativo da forma não intuitiva de gerar propostas inovadoras.

Neste trabalho, com base no que foi exposto e a familiaridade do autor com a técnica, optou-se pela utilização do AG, considerando também, que o problema a ser compilado tem características discretas e combinacionais. No entanto, salienta-se que qualquer outra técnica de inteligência artificial poderia ser utilizada, pois o diferencial do trabalho é quanto a formulação do problema e não quanto aos comparativos entre técnicas.

Para aplicação dentro da técnica utilizada, existem diversos softwares computacionais eficientes que produzem respostas rápidas e com baixo custo operacional. Neste trabalho, é utilizado o software Matlab para a compilação do código e obtenção dos resultados ótimos.

4.2.1.2 MODELAGEM

Neste trabalho, o algoritmo para resolução do problema é capaz, a critério do planejador, de simular a alocação a partir da seleção das seguintes premissas:

quantidade de religadores disponíveis em estoque; valor máximo de investimento disponível pela distribuidora; modo autônomo, em que a alocação tende para a correção completa das transgressões dos limites coletivos e individuais de qualidade da energia elétrica em determinada barra, levando em consideração o menor *payback*. Então, este modo, poderá mitigar completamente os problemas oriundos de multas aplicadas pelo regulador à concessionária.

4.2.1.2.1 CODIFICAÇÃO DO INDIVÍDUO

Para cada equipamento de proteção instalado, é atribuído uma forma de identificação. Então, cada chave em derivação tem o número da barra que está protegendo, assim o nome da barra é Bxx, sendo que “xx” designa o número desta.

Todas as barras de uma rede são passíveis de receber a alocação dos religadores, porém, algumas restrições iniciais são computadas no processo de aptidão, tais como:

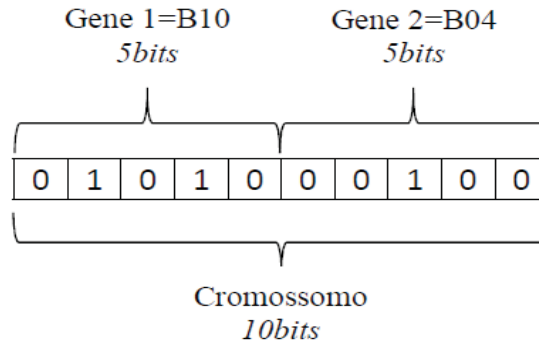
- ✓ Alocar RAS apenas em barra que tiver chave fusível instalada;
- ✓ Não alocar RAS no tronco alimentador;
- ✓ Não admitir alocação em série.

Os indivíduos são codificados em sequência binária, formando um cromossomo único para que o AG possa efetuar a compilação. A codificação implementada, possibilita que o planejador possa alocar n RASs para uma população conhecida de barras com chaves fusíveis do sistema. Assim, o número de *bits* de cada indivíduo é determinado conforme o número máximo de religadores a serem alocados, exceto na ocasião do planejador optar pelo modo autônomo, onde a codificação será de acordo à quantidade de barras escolhidas pelo algoritmo, tendo esta última, relação direta com as barras com maior percentual financeiro de multas.

Por exemplo, considere que o planejador deseja alocar dois equipamentos em um sistema que possui um conjunto de b chaves fusíveis (barras candidatas à alocação), a quantidade de *bits* por indivíduo necessária é igual a u , devendo ser $2^u \geq b$. Portanto, a quantidade de *bits*(u) necessário para este exemplo, é igual a quantidade de *bits* para construir o código de cada indivíduo.

Assim, supondo que haja 31 barras candidatas e dois RASs para alocação, a quantidade de *bits* por indivíduo deve ser igual a cinco, pois $2^5 \geq 31$. A FIGURA 9 apresenta o código genético total do cromossomo com 10 *bits*.

FIGURA 8 - CODIFICAÇÃO DO CROMOSSOMO



FONTE: O autor (2020).

Na FIGURA 8, do *bit* 1 ao 5 é representada a primeira barra candidata à alocação (que após decodificação decimal corresponde à décima posição da lista de barras candidatas com fusíveis instalados), já do *bit* 6 ao 10, é representada a segunda barra candidata à alocação (que após decodificação decimal corresponde à quarta posição da lista de barras candidatas com fusíveis instalados). O cromossomo decodificado, busca os dados registrados nas barras do sistema e calcula o *fitness* que corresponde à equação 1. Esta codificação permanece inalterada para os modelos ao qual o planejador possa optar, onde a quantidade de RASs a serem instalados dependendo do valor que se deseja investir é calculada diretamente pela equação 20.

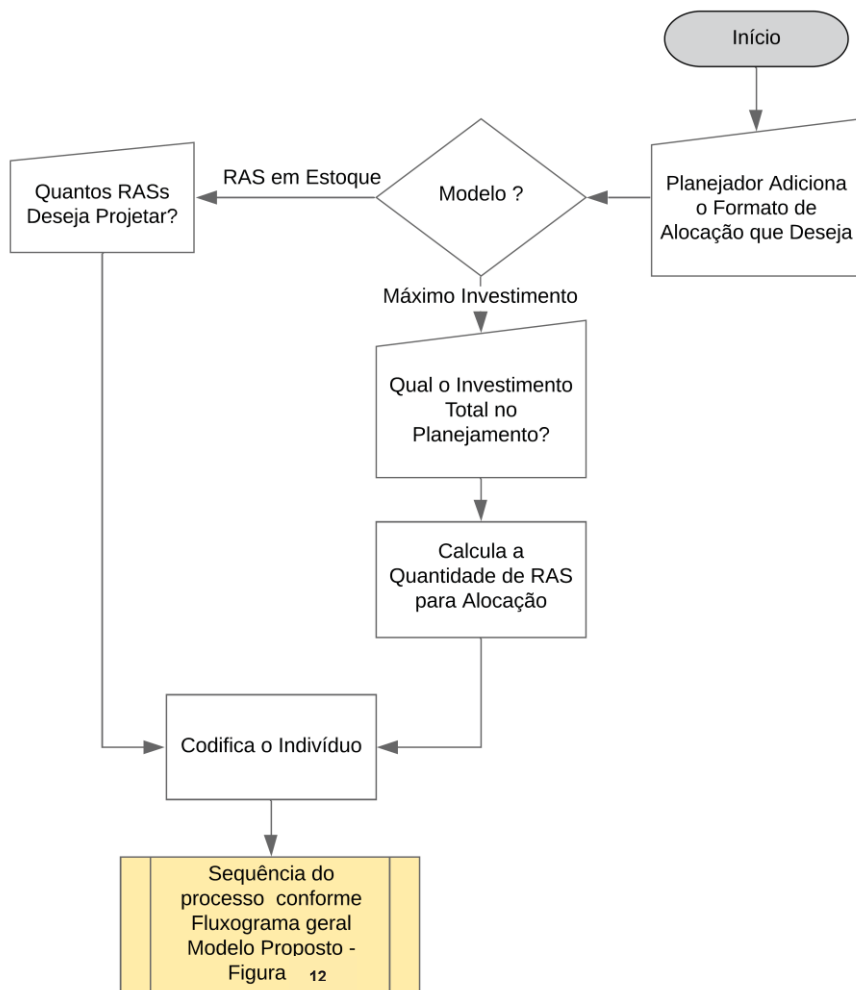
$$nRASs_i = \frac{V_i}{CM_i + CI_i + CO_i} \quad (20)$$

onde:

V_i : Valor em R\$ (Reais) a ser investido.

A FIGURA 9 apresenta o fluxograma do AG para os modos de operação de RASs em estoque e valor total do investimento.

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DE OPERAÇÃO MODELOS DE RELIGADORES EM ESTOQUE E MÁXIMO INVESTIMENTO



FONTE: O autor (2020).

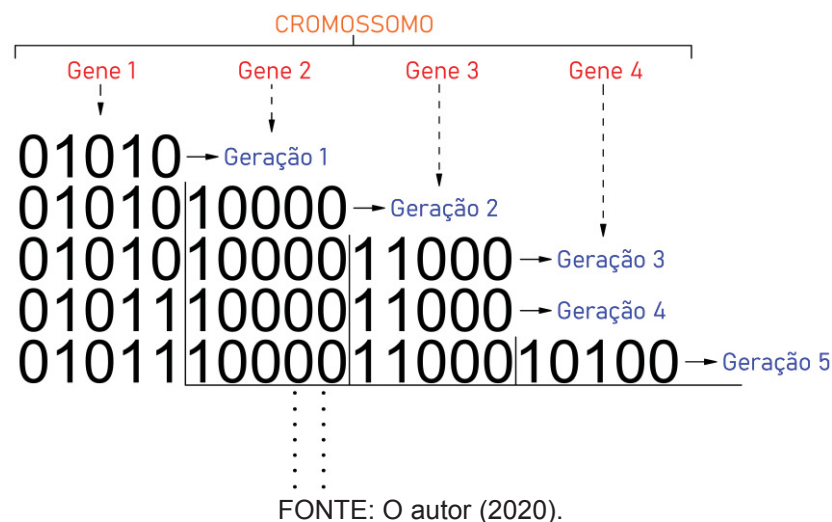
Na condição em que o planejador optar por deixar o sistema em modo autônomo, para que efetue as alocações necessárias de RASs, nRASs passa a ser volátil ao modo que progride as gerações. Os critérios de parada para este modelo são:

- ✓ Número de gerações;
- ✓ Atendimento das barras com maior índice de falhas, consequentemente multas;
- ✓ *Payback* menor ou igual a 2 anos.

O número de gerações é o critério majoritário, sendo que o índice de falhas e o *payback* são secundários e atuam em sincronia com o número de gerações, conforme mostra a FIGURA 11.

Nesse caso, a população inicial é de apenas uma barra, escolhida aleatoriamente, com o código genético em *bits*, igual ao total de barras candidatas para alocação. A cada geração, a população será acrescentada mais um gene, aumentando o tamanho do código genético para o próximo cálculo da função objetivo e assim sucessivamente. Para evitar que o número de gerações seja inferior ao número de barras com maior benefício, o número de gerações deve ser no mínimo igual ao número de barras que contém chaves fusíveis. A FIGURA 10 mostra a sequência lógica de apresentação do código genético a cada geração.

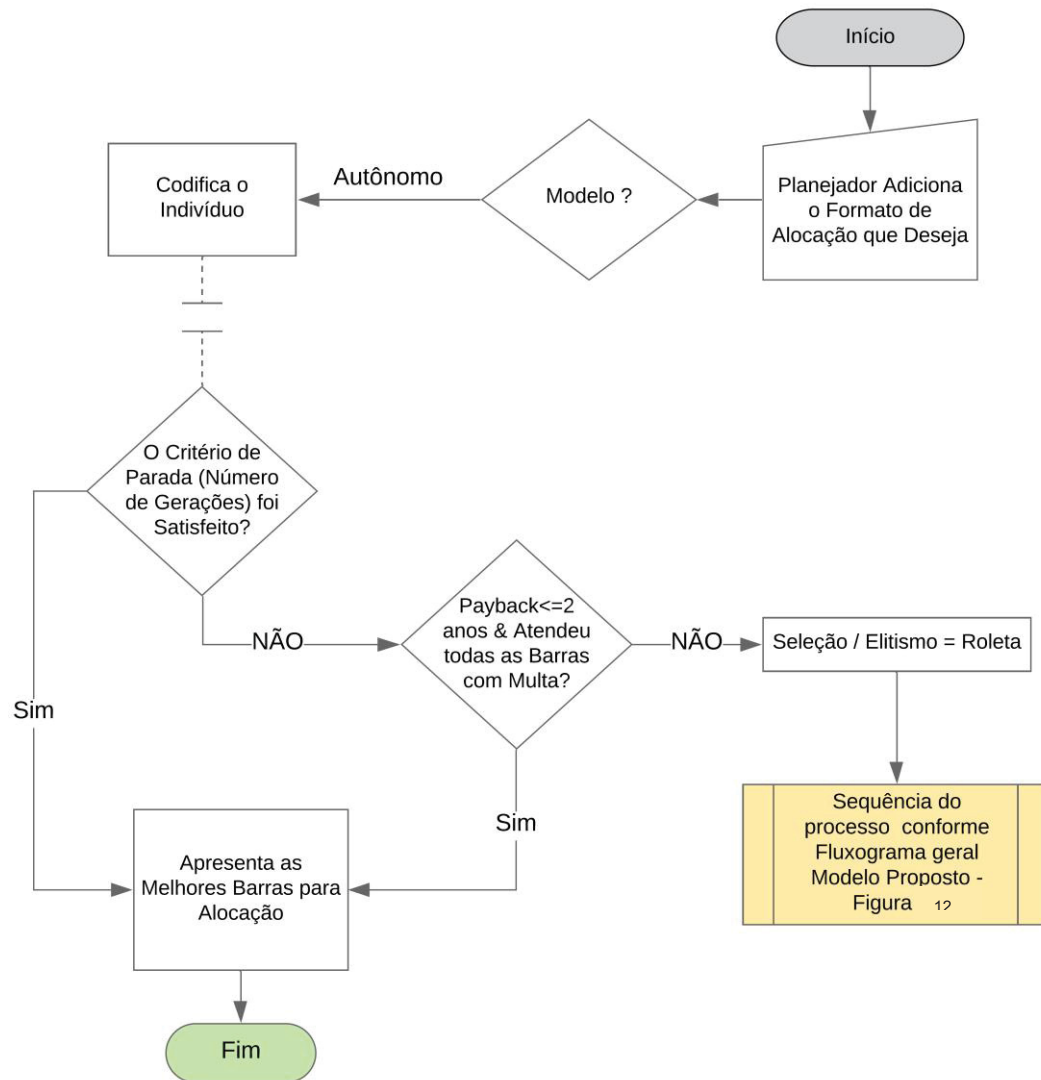
FIGURA 10 - SEQUÊNCIA DE CODIFICAÇÃO DO CROMOSSOMO MODO AUTÔNOMO



A partir da FIGURA 10, pode-se analisar que progressivamente a busca acontece de forma a produzir um código a ser analisado ao conjunto de genes anteriormente gravados na memória. Por exemplo, a partir de um sistema que tenha 31 barras disponíveis para alocação, tem-se a quantidade de *bits* por gene igual a 5. Assim, é alocado um RASs na barra 10, em uma escolha aleatória para a primeira geração; como a barra 10 teve um *payback* menor que 2 anos e ainda existem barras com índice de falhas prejudicadas com multas, a geração 2 é necessária e repetidamente o mesmo ciclo é executado, acrescentando sempre um gene a cada geração – caso permitido. Na geração 4, nota-se que a barra 10 é substituída pela 11 e não adicionado mais nenhuma barra, visto que para efetuar a geração 5, obedecendo os critérios de *payback* e apontar para as barras com maior benefício, houve a necessidade de alteração do gene 1, através dos operadores genéticos.

Contudo, a geração 5 é apresentada. O processo continua até satisfazer os critérios sincronizados, conforme apresentado por fluxograma (FIGURA 12) detalhado.

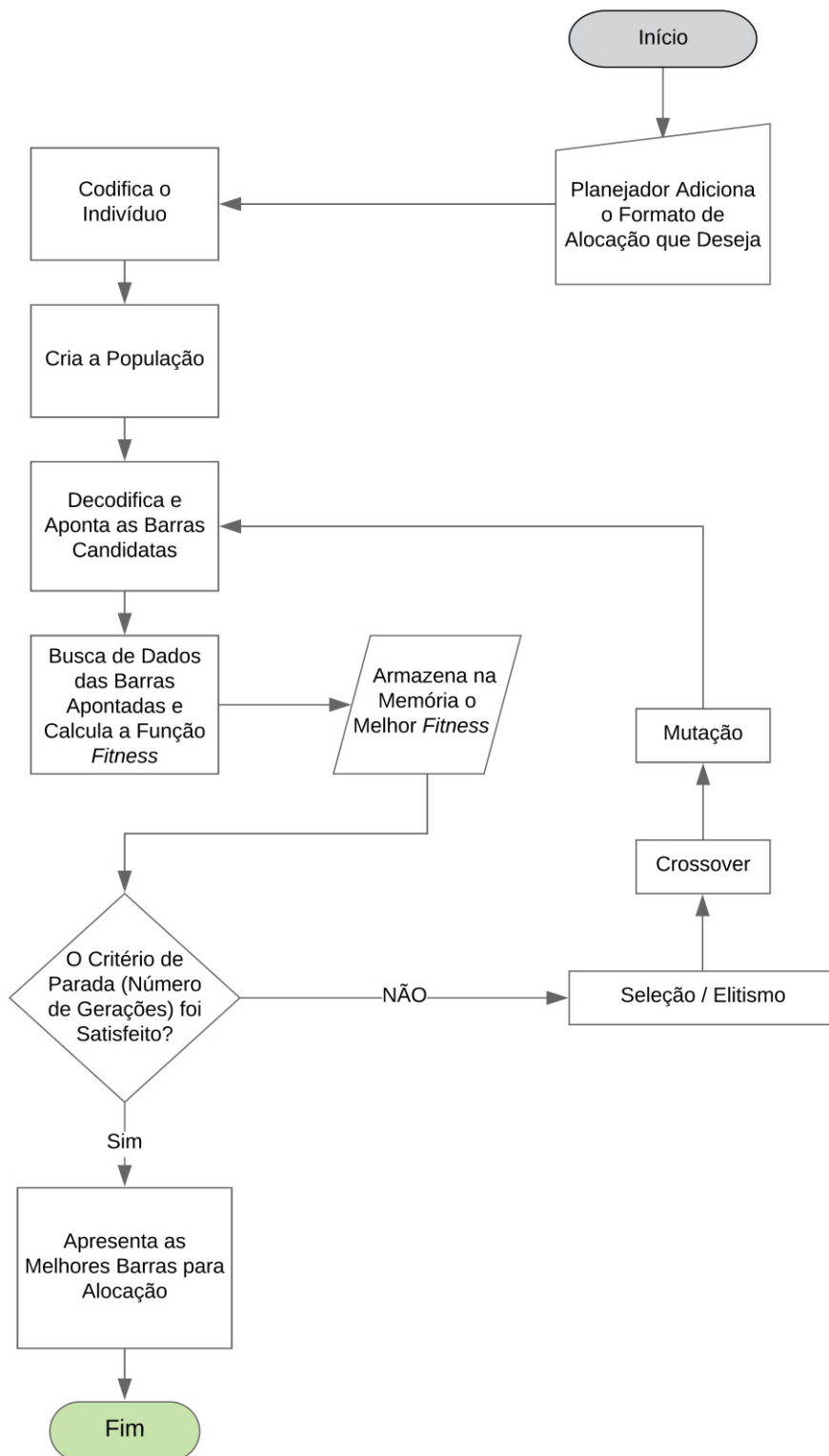
FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DO MODO 3, ESCOLHIDO PELO PLANEJADOR



FONTE: O autor (2020).

A FIGURA 12, apresenta o fluxograma universal do algoritmo para a alocação dos RASs. O algoritmo busca uma solução indicando a melhor localização para instalação dos religadores simplificados.

FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DO MODELO PROPOSTO



FONTE: O autor (2020).

4.2.1.3 PROCESSO DE SELEÇÃO E OPERADORES GENÉTICOS

Nesta etapa, o algoritmo é condicionado a algumas características de processamento como seleção e aplicação dos operadores genéticos para o laço de repetições tendendo sempre a gerar indivíduos mais aptos para otimizar o problema. As principais etapas dos operadores genéticos deste trabalho, estão representados a seguir.

4.2.1.3.1 SELEÇÃO

O mecanismo de funcionamento dos AGs é baseado no critério de selecionar os indivíduos mais aptos possíveis a cada geração, estruturando assim, o novo código genético do cromossomo com inteligência, adaptado às circunstâncias modeladas na função objetivo. Para que o processo privilegie os indivíduos mais aptos, a cada gene do cromossomo é atribuído um valor de aptidão que é diretamente relacionado ao valor da função objetivo parcial do código genético. Por exemplo, a partir do código genético apresentado na FIGURA 9, para cada gene é calculado a função objetivo e apontado a aptidão (um valor entre zero e 1) de acordo com o valor de cada parcial. Este valor de aptidão é calculado a partir da equação 21.

$$V_{ag} = \frac{FO_i}{MaxFO_i} \quad (21)$$

onde:

V_{ag} : valor de aptidão no gene do cromossomo;

FO_i : função objetivo na barra i;

$MaxFO_i$: máximo valor da função objetivo entre os genes do cromossomo.

Para selecionar os genes a partir dos valores de aptidão rankeados, tem-se diversos métodos para escolher preferencialmente indivíduos com maiores valores de aptidão, com o objetivo de manter a diversidade populacional e não excluir algum gene potencialmente atrativo para o código da próxima geração. O método utilizado para a resolução desta subseção é o da roleta, pois é de simples aplicação e um dos mais utilizados em AGs.

Neste método, cada indivíduo contido na relação de aptidão é representado na roleta proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Assim, aos indivíduos com alta aptidão é dada uma porção maior da roleta, enquanto os de aptidão mais baixa é dada uma porção relativamente menor da roleta. Finalmente, a roleta é girada um determinado número de vezes, dependendo do tamanho da população, e são escolhidos, como indivíduos que participarão da próxima geração, aqueles sorteados na roleta.

4.2.1.3.2 CROSSOVER

Um conjunto de operadores é necessário para que, dada uma população, seja possível gerar populações sucessivas que melhorem sua aptidão com o tempo. O operador primário é o cruzamento (*Crossover*) e o secundário a mutação. Ambos são aplicados para garantir que a próxima geração será nova e com traços de seus pais. Para prevenir que os melhores indivíduos desapareçam com o cruzamento e/ou mutação, o processo de elitismo é aplicado anteriormente aos operadores genéticos com o objetivo de direcionar estes, automaticamente para a próxima geração.

Como este operador é considerado predominante, é aplicado com probabilidade dada pela taxa de cruzamento ($0 \leq \text{Probabilidade de Cruzamento} \leq 1$), devendo o seu valor ser maior que o de mutação. Assim, a simulação do trabalho aplicou a taxa de 0,6 para o crossover.

4.2.1.3.3 MUTAÇÃO

O operador de mutação é necessário no princípio para manutenção da multiplicidade genética da população, alterando arbitrariamente em um ou mais componentes na estrutura escolhida e para fornecer meios de introduzir novos elementos na população. Desta maneira, a mutação assegura que a probabilidade de chegar a qualquer ponto no espaço de busca nunca será zero.

O operador de mutação é aplicado aos indivíduos com uma probabilidade dada pela taxa de mutação ($0 \leq \text{Probabilidade de Mutação} \leq 1$), onde geralmente é utilizado um valor de pequena expressão, visto que é aplicado secundariamente, após o operador de cruzamento. Assim, neste trabalho a taxa de mutação fica estabelecida em 0,05.

4.3 ABORDAGEM UTILIZADA PARA ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para analisar os resultados a serem apresentados no Capítulo 5, faz-se necessário definir algumas métricas e ferramentas as quais foram utilizadas para apresentar as respostas aos testes realizados, tanto na forma qualitativa quanto quantitativa, além de facilitar a leitura e interpretação nesta análise.

4.3.1 MÉTRICAS

Os valores mostrados na TABELA 6, utilizados para obtenção dos valores dos critérios de otimização que compõem a *FO*, tomam por base dados fornecidos de uma concessionária de energia elétrica, já que os sistemas que serão simulados devem traduzir a confiabilidade da metodologia ou ao menos aproximá-la da realidade. Estes dados contêm valores médios de mercado.

TABELA 6 - CUSTOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

C_{eq} (R\$)	US (R\$)	C_{Desl} (R\$/km)	C_{fuse} (R\$)	EUSDmédio (R\$)
7000	224	8,5	10	60

FONTE: O autor (2020).

Para o *EUSDmédio* – que corresponde ao custo de encargos de distribuição, é considerado 30% do valor de uma fatura de energia elétrica para um consumidor, que foi considerado a média de R\$ 200,00. Este valor, para cada barra, é multiplicado pela quantidade de consumidores (RUTES, 2017).

O custo de deslocamento inclui uma equipe com 2 pessoas, considerando custo de combustível, revisão e tempo de deslocamento em serviço. Assim, dependendo da localização dos RAS projetados no sistema, é calculado o somatório de deslocamentos de acordo com as distâncias das barras à base de operações da distribuidora. Já a unidade de serviço, contempla apenas o custo do tempo de serviço, para a instalação do equipamento no local.

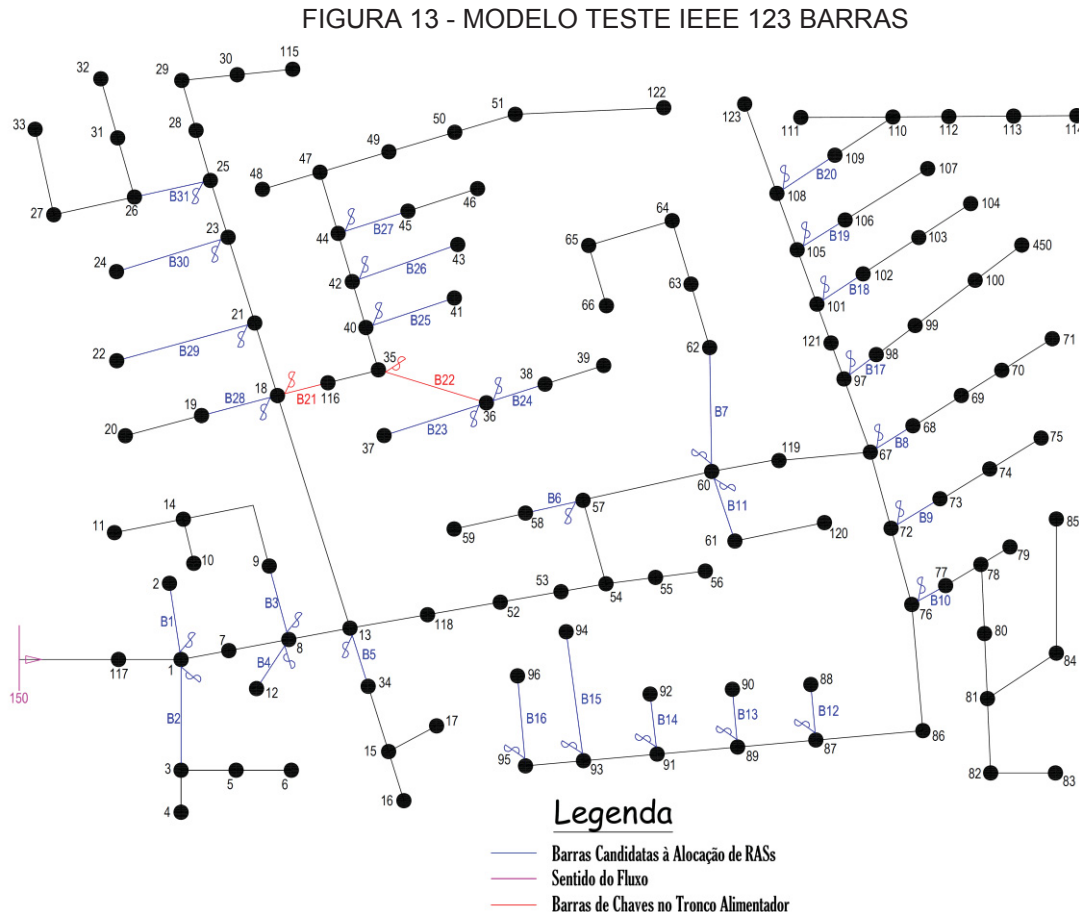
Os dados de entrada utilizados para a função multiobjetivo definidos nesta etapa como métricas do problema, contemplam um espectro amostral de 2 anos.

4.3.1.1 SISTEMAS UTILIZADOS PARA AS SIMULAÇÕES

Entendendo que toda e qualquer metodologia deve ser testada em diferentes modelos e o mais próximo possível da realidade para amplificar a confiabilidade da modelagem criada, este trabalho utiliza dois modelos de sistema para desenvolver as simulações: um que envolve sistema padrão de testes – IEEE 123 Barras, e o outro, que possui a configuração real de um alimentador de uma concessionária de energia elétrica com 182 Barras. Ambos os sistemas possuem interligações estruturais geográficas em anel, porém, não possuem conexões elétricas. Assim, os sistemas utilizados apresentam uma topologia radial.

4.3.1.1.1 SISTEMA IEEE 123 BARRAS

A FIGURA 13 apresenta o diagrama modelo do sistema IEEE 123 barras. Este sistema elétrico é um dos que serão utilizados para a realização de simulações e testes a serem apresentados no capítulo de resultados.



FONTE: MARQUES et al. (2018)/IEEE - Modificado pelo autor (2020).

O modelo IEEE-123-barras contém em sua configuração, diversas informações da topologia da rede, entre elas o posicionamento de dispositivos de seccionamento, bitola de condutores, valores da extensão de rede entre barras etc. Este sistema é genérico e foi desenvolvido para ser utilizado, aprimorado e modificado para as necessidades e peculiaridades de estudos e simulações ao qual se deseja. Assim, o sistema foi modificado pelo autor, de modo a inserir uma quantidade de chaves fusíveis nas derivações – barras candidatas à alocação, e ainda, um número de consumidores (N_{qi}), conectados à rede, conforme mostra a TABELA 7. Estes dados são necessários para a simulação. O número total de consumidores inseridos é de 279 e a quantidade de barras candidatas sem associação em série é de 31.

Cada chave fusível e barra no sistema está apresentada na cor azul exceto, as chaves instaladas em série, representadas na cor vermelha, as quais, não são chaves de barras candidatas à alocação, somando-se assim duas unidades. Respeitou-se a bitola do tronco alimentador do modelo IEEE e, a partir daí, selecionaram-se barras em derivação que receberam as chaves fusíveis. A fonte (subestação) do alimentador é representada pela barra de nº150, na cor magenta.

Os dados de indicação das barras com chaves fusíveis, das taxas de falha, do número de consumidores por barra e dos indicadores individuais por ponto de conexão utilizados estão apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 - DADOS ESTIMADOS PARA A SIMULAÇÃO

<i>Barra</i>	<i>n° Fases</i>	<i>N_{op}</i>	<i>y_{qi}</i>	<i>N_{qi}</i>	<i>N_T</i>	<i>dicv_i</i>	<i>dicp_i</i>	<i>dmicv_i</i>	<i>dmicp_i</i>	<i>dicriv_i</i>	<i>dicrip_i</i>	<i>f_{ic_i}</i>	<i>f_{icp_i}</i>
1	1	10	1,6666	6	279	35,1	5	10,53	6	10,21	9	10	22
2	1	5	0,4545	11	279	30,76	5	24,65	6	24,65	9	5	22
3	1	2	0,125	16	279	31,45	5	25,44	6	25,44	9	2	22
4	3	9	1	3	279	27,5	5	15,65	6	10,63	9	3	22
5	3	24	0,8	10	279	18,72	5	9,85	6	9,85	9	8	22
6	3	30	2	5	279	10,56	5	7,84	6	5,54	9	10	22
7	3	6	0,1538	13	279	11,56	5	6,87	6	6,65	9	2	22
8	1	9	1	9	279	36,6	5	11,35	6	8,84	9	9	22
9	3	15	1	5	279	55,1	5	26,56	6	8,89	9	5	22
10	1	6	0,2222	27	279	45,65	5	32,36	6	32,36	9	6	22
11	3	33	1,5714	7	279	48,8	5	23,06	6	23,06	9	11	22
12	1	4	0,8	5	279	35,4	5	17,96	6	17,96	9	4	22
13	1	4	0,5714	7	279	36,01	5	19,54	6	16,89	9	4	22
14	2	12	1	6	279	37,8	5	31,14	6	25,65	9	6	22
15	2	18	0,9	10	279	38,9	5	15,10	6	15,10	9	9	22
16	1	3	0,3333	9	279	36,8	5	16,28	6	16,5	9	3	22
17	1	15	3	5	279	12,64	5	11,78	6	11,78	9	15	22
18	1	6	1,5	4	279	43,54	5	34,69	6	22,69	9	6	22
19	1	22	3,1428	7	279	25,7	5	24,6	6	24,6	9	22	22
20	1	7	0,3684	19	279	26,1	5	22,3	6	14,61	9	7	22
21	3	18	0,2142	28	279	30,8	5	16,89	6	16,89	9	6	22
22	3	15	0,5555	9	279	37,65	5	28,64	6	13,25	9	5	22

<i>Barra</i>	<i>n° Fases</i>	<i>N_{op}</i>	<i>Y_{qi}</i>	<i>N_{qi}</i>	<i>N_T</i>	<i>dicv_i</i>	<i>dicip_i</i>	<i>dmicv_i</i>	<i>dmicp_i</i>	<i>dicriv_i</i>	<i>dicip_i</i>	<i>fic_i</i>	<i>ficp_i</i>
23	1	8	1,3333	6	279	8,15	5	5,61	6	0	9	8	22
24	3	39	4,3333	3	279	43,15	5	37,95	6	10,56	9	13	22
25	1	6	3	2	279	38,9	5	29,56	6	26,12	9	6	22
26	1	8	8	1	279	15,6	5	11,98	6	0	9	8	22
27	3	36	1,7142	7	279	32,1	5	23,1	6	3,32	9	12	22
28	1	6	0,6	10	279	6,52	5	2,31	6	1,15	9	6	22
29	1	8	0,6666	12	279	36,4	5	28,94	6	28,94	9	8	22
30	3	24	2,6666	3	279	56,89	5	40,78	6	6,58	9	8	22
31	1	4	0,2857	14	279	78,14	5	45,65	6	10,56	9	4	22

FONTE: O autor (2020).

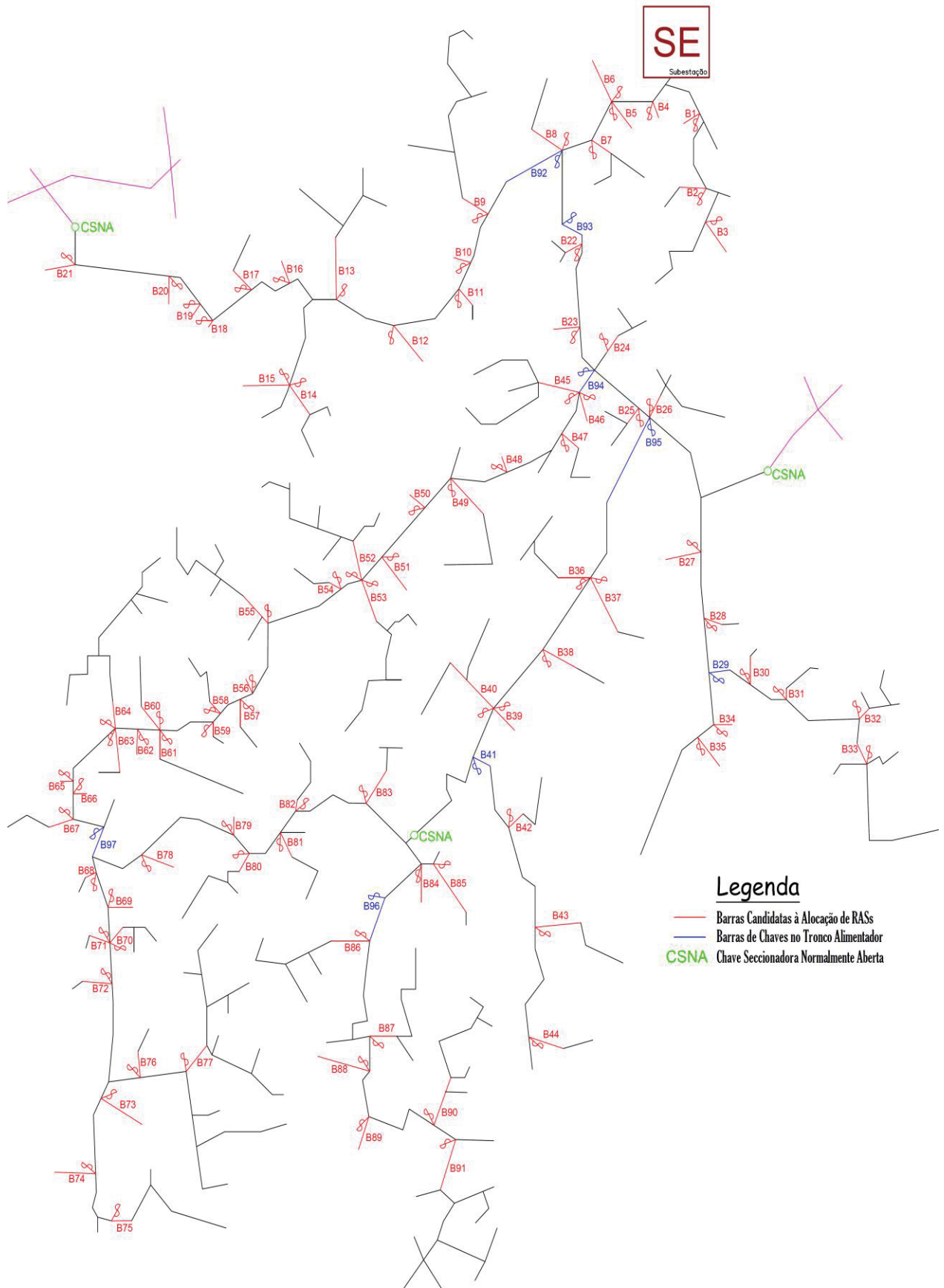
Na TABELA 7, a taxa de falha (γ_{qi}) é um índice que depende da quantidade de falhas e o número de consumidores na barra i . Já os valores dos indicadores individuais e quantidade de consumidores por barra, foram inseridos de forma aleatória respeitando a lógica de dados que propõe uma similaridade com um sistema real.

4.3.1.1.2 SISTEMA REAL 182 BARRAS

Na FIGURA 14, consta o diagrama modelo do sistema de uma distribuidora localizada no sul do país, mais especificamente um alimentador de área urbana e rural, com 182 barras e 97 delas candidatas ao recebimento da alocação de RAs. Este modelo apresenta a percepção de idealidade para a aplicação dos testes, visto a multiplicidade de elementos de proteção não automáticos (Chaves Fusíveis), tendo um total de 1028 consumidores e ainda contempla configurações das barras como monofásica, bifásica e trifásica. Assim, este sistema elétrico com as suas respectivas métricas será utilizado para as simulações e testes reais que serão realizados e apresentados no capítulo de resultados.

O sistema apresentado na FIGURA 14 possui, em todas as derivações de seu tronco, proteção efetuada por chaves fusíveis (na cor vermelha). As chaves representadas pela cor azul fazem referência aos dispositivos em série (oito barras) e que no processo de aptidão serão eliminadas do conjunto de barras candidatas à alocação. Em alguns pontos marcados em verde (CSNA) é localizado as chaves de seccionamento (em estado aberto), posicionadas para suprir alguma conexão de manobra do sistema, caso necessário. Para este trabalho, estas chaves permanecem no estado normalmente abertas, visto que na maioria das vezes em regime normal de funcionamento do alimentador, elas estão nesta condição.

FIGURA 14 - MODELO TESTE 182 BARRAS



FONTE: Cooperativa de Eletrificação - Modificado pelo autor (2020).

A indicação das barras com chaves fusíveis, das taxas de falha, do número de consumidores por barra e dos indicadores individuais por ponto de conexão fornecidos pela concessionária de energia elétrica estão apresentados na TABELA 8.

TABELA 8 - DADOS DO HISTÓRICO DE UMA CONCESSIONÁRIA PARA A SIMULAÇÃO

Barra	n° Fases	N_{op}	Y_{qi}	N_{qi}	N_T	$dicv_i$	$dicip_i$	$dmicv_i$	$dmicp_i$	$dicriv_i$	$dicip_i$	fic_i	$ficp_i$
1	3	81	3,8571	7	1028	35,3	47,79	1,24	6,59	14,53	16,6	31,05	34,16
2	3	66	1,8333	12	1028	36,35	47,79	1,56	6,59	15,85	16,6	29,15	34,16
3	2	40	2,8571	7	1028	32,47	47,79	1,52	6,59	15,85	16,6	23,40	34,16
4	3	33	2,75	4	1028	25,1	47,79	2,09	6,59	16,54	16,6	16,39	34,16
5	1	6	0,75	8	1028	10,15	47,79	1,65	6,59	17,25	16,6	9,63	34,16
6	2	10	1,6667	3	1028	29,6	47,79	5,54	6,59	16,24	16,6	11,30	34,16
7	3	15	0,1923	26	1028	47,57	47,79	8,41	6,59	14,65	16,6	16,43	34,16
8	1	4	0,3077	13	1028	36,41	47,79	9,55	6,59	16,67	16,6	15,00	34,16
9	1	6	0,1765	34	1028	28,87	47,79	4,33	6,59	8,88	16,6	16,32	34,16
10	1	12	1,2	10	1028	54,96	47,79	4,5	6,59	8,91	16,6	19,50	34,16
11	1	9	0,6	15	1028	54,97	47,79	5,65	6,59	9,43	16,6	28,24	34,16
12	1	9	0,9	10	1028	55,51	47,79	5,67	6,59	10,25	16,6	30,03	34,16
13	1	10	0,3846	26	1028	56,1	47,79	5,21	6,59	12,72	16,6	35,37	34,16
14	1	11	0,4783	23	1028	57,63	47,79	4,85	6,59	14,81	16,6	41,11	34,16
15	3	33	0,4231	26	1028	58,6	47,79	4,95	6,59	14,99	16,6	43,31	34,16
16	3	27	0,8182	11	1028	60,4	47,79	6,65	6,59	15,37	16,6	37,23	34,16
17	1	9	1,5	6	1028	61,33	47,79	6,4	6,59	16,65	16,6	39,03	34,16
18	1	8	2	4	1028	61,35	47,79	7,33	6,59	17,56	16,6	36,29	34,16
19	2	16	1,3333	6	1028	61,36	47,79	7,56	6,59	18,1	16,6	37,89	34,16
20	3	24	1,3333	6	1028	60,63	47,79	7,65	6,59	18,56	16,6	39,49	34,16
21	3	24	8	1	1028	64,24	47,79	7	6,59	18,03	16,6	41,09	34,16
22	3	9	0,25	12	1028	24,2	47,79	7,5	6,59	17,98	16,6	15,49	34,16
23	3	18	1,5	4	1028	34,73	47,79	5,56	6,59	18,65	16,6	33,72	34,16
24	1	4	0,2667	15	1028	28,26	47,79	6,87	6,59	14,54	16,6	22,64	34,16
25	1	8	0,7273	11	1028	28,27	47,79	3,21	6,59	15,65	16,6	47,06	34,16
26	1	9	0,5294	17	1028	29,67	47,79	3,22	6,59	14,54	16,6	54,68	34,16
27	1	9	1,125	8	1028	50,56	47,79	5,21	6,59	10,15	16,6	56,42	34,16
28	1	9	1,125	8	1028	53,65	47,79	5,32	6,59	11,23	16,6	58,16	34,16
29	3	24	0,1379	58	1028	54,66	47,79	6,54	6,59	14,15	16,6	53,24	34,16
30	3	24	1	8	1028	55,95	47,79	6,55	6,59	15,41	16,6	54,78	34,16
31	1	8	0,8889	9	1028	55,98	47,79	6,81	6,59	16,6	16,6	56,33	34,16
32	3	21	0,5385	13	1028	57,32	47,79	7,89	6,59	16,67	16,6	50,64	34,16
33	1	8	0,2857	28	1028	57,39	47,79	7,34	6,59	16,58	16,6	59,42	34,16
34	3	21	1,1667	6	1028	60,66	47,79	8,5	6,59	17,05	16,6	53,34	34,16
35	1	7	1	7	1028	63,55	47,79	9,34	6,59	17,93	16,6	54,70	34,16
36	3	33	1,8333	6	1028	60,56	47,79	5,12	6,59	7,81	16,6	56,79	34,16
37	1	12	2,4	5	1028	63,45	47,79	5,15	6,59	7,96	16,6	67,44	34,16
38	1	10	1,25	8	1028	67,59	47,79	6,45	6,59	8,41	16,6	56,60	34,16
39	1	10	3,3333	3	1028	68,66	47,79	6,66	6,59	8,69	16,6	58,82	34,16
40	1	8	0,8889	9	1028	68,99	47,79	8,54	6,59	9,45	16,6	49,05	34,16
41	3	24	0,2353	34	1028	70,56	47,79	8,55	6,59	13,21	16,6	50,10	34,16
42	3	24	1,6	5	1028	71,25	47,79	8,47	6,59	14,12	16,6	51,50	34,16
43	1	7	0,3889	18	1028	72,3	47,79	10,05	6,59	14,83	16,6	46,29	34,16
44	3	18	0,5455	11	1028	72,77	47,79	11,76	6,59	15,67	16,6	40,73	34,16
45	1	8	0,5	16	1028	65,61	47,79	7,85	6,59	10,05	16,6	37,89	34,16
46	1	8	1,3333	6	1028	67,95	47,79	7,89	6,59	10,24	16,6	39,49	34,16
47	1	8	2	4	1028	70,56	47,79	8,65	6,59	11,22	16,6	41,09	34,16
48	1	7	1,4	5	1028	68,71	47,79	8,94	6,59	11,45	16,6	36,14	34,16
49	1	6	0,5	12	1028	66,61	47,79	9,81	6,59	12,65	16,6	33,72	34,16
50	1	7	0,875	8	1028	62,32	47,79	8,32	6,59	12,66	16,6	39,62	34,16
51	1	6	3	2	1028	58,79	47,79	8,44	6,59	12,66	16,6	35,27	34,16
52	1	6	0,1579	38	1028	63,54	47,79	9,23	6,59	12,41	16,6	36,42	34,16
53	1	6	0,1463	41	1028	69,59	47,79	10,24	6,59	11,05	16,6	37,56	34,16
54	1	5	0,4167	12	1028	51,5	47,79	10,78	6,59	13,45	16,6	32,26	34,16
55	1	4	0,1538	26	1028	53,5	47,79	10,97	6,59	13,87	16,6	26,57	34,16
56	1	5	2,5	2	1028	56,59	47,79	11,55	6,59	14,56	16,6	34,17	34,16

<i>Barra</i>	<i>n° Fases</i>	<i>N_{op}</i>	<i>Y_{qi}</i>	<i>N_{qi}</i>	<i>N_r</i>	<i>dicv_i</i>	<i>dicip_i</i>	<i>dmicv_i</i>	<i>dmicp_i</i>	<i>dicriv_i</i>	<i>dicip_i</i>	<i>fic_i</i>	<i>ficp_i</i>
57	1	5	1,25	4	1028	59,68	47,79	12,54	6,59	15,47	16,6	35,13	34,16
58	1	4	0,4	10	1028	58,13	47,79	12,59	6,59	15,24	16,6	28,87	34,16
59	1	4	0,6667	6	1028	59,34	47,79	12,41	6,59	16,32	16,6	29,63	34,16
60	1	5	1	5	1028	60,67	47,79	10,45	6,59	16,64	16,6	38,00	34,16
61	1	5	0,5556	9	1028	62,32	47,79	12,61	6,59	16,64	16,6	38,96	34,16
62	1	5	0,625	8	1028	64,87	47,79	11,99	6,59	16,87	16,6	39,91	34,16
63	1	5	0,5	10	1028	72,32	47,79	12,06	6,59	17,45	16,6	40,87	34,16
64	1	5	0,1220	41	1028	70,05	47,79	13,74	6,59	17,12	16,6	41,83	34,16
65	1	5	0,8333	6	1028	76,3	47,79	14,65	6,59	17,03	16,6	42,78	34,16
66	1	5	2,5	2	1028	80,63	47,79	14,88	6,59	18,32	16,6	43,74	34,16
67	1	5	0,8333	6	1028	81,64	47,79	15,02	6,59	18,33	16,6	44,70	34,16
68	1	5	1,25	4	1028	70,47	47,79	13,58	6,59	15,65	16,6	45,65	34,16
69	3	12	1	4	1028	66,71	47,79	14,54	6,59	16,41	16,6	37,29	34,16
70	1	4	0,6667	6	1028	69,58	47,79	15,54	6,59	16,87	16,6	38,05	34,16
71	3	12	1	4	1028	76,76	47,79	15,67	6,59	17,81	16,6	38,82	34,16
72	1	5	0,5	10	1028	79,61	47,79	15,82	6,59	17,83	16,6	49,48	34,16
73	3	15	1,25	4	1028	80,62	47,79	16,62	6,59	18,98	16,6	50,43	34,16
74	1	5	2,5	2	1028	82,74	47,79	17,63	6,59	19,01	16,6	51,39	34,16
75	1	4	0,2	20	1028	82,3	47,79	19,01	6,59	19,37	16,6	41,88	34,16
76	1	4	0,8	5	1028	84,95	47,79	20,54	6,59	20,66	16,6	42,64	34,16
77	1	4	0,0870	46	1028	99,15	47,79	20,56	6,59	21,43	16,6	43,41	34,16
78	1	7	1,75	4	1028	69,66	47,79	9,6	6,59	14,23	16,6	77,30	34,16
79	1	7	7	1	1028	70,59	47,79	9,87	6,59	14,24	16,6	78,64	34,16
80	1	7	0,5833	12	1028	75,23	47,79	10,23	6,59	15,77	16,6	79,98	34,16
81	1	6	1	6	1028	76,63	47,79	11,85	6,59	15,66	16,6	69,70	34,16
82	1	5	0,5	10	1028	68,64	47,79	12,33	6,59	16,6	16,6	59,04	34,16
83	1	5	0,4167	12	1028	64,78	47,79	12,49	6,59	16,64	16,6	60,00	34,16
84	1	5	1	5	1028	59,1	47,79	11,2	6,59	17,71	16,6	60,96	34,16
85	1	5	0,3571	14	1028	63,47	47,79	12,05	6,59	18,45	16,6	61,91	34,16
86	3	15	0,2778	18	1028	65,56	47,79	12,67	6,59	18,46	16,6	62,87	34,16
87	1	5	0,1667	30	1028	67,96	47,79	12,43	6,59	19,31	16,6	63,83	34,16
88	3	15	1,25	4	1028	67,05	47,79	12,74	6,59	19,78	16,6	64,78	34,16
89	1	5	1,6667	3	1028	75,59	47,79	13,41	6,59	19,94	16,6	65,74	34,16
90	1	5	0,25	20	1028	77,55	47,79	13,62	6,59	20,31	16,6	66,70	34,16
91	1	5	0,1389	36	1028	79,76	47,79	14,76	6,59	20,21	16,6	67,65	34,16
92	3	27	0,0429	210	1028	47,090	47,79	5,2052	6,59	14,849	16,6	34,43	34,16
93	3	21	0,0354	198	1028	45,484	47,79	6,1938	6,59	15,323	16,6	29,79	34,16
94	3	18	0,02	300	1028	65,270	47,79	11,113	6,59	14,421	16,6	31,56	34,16
95	3	24	0,0964	83	1028	68,458	47,79	7,8611	6,59	11,127	16,6	41,20	34,16
96	3	15	0,0909	55	1028	72,245	47,79	13,271	6,59	19,668	16,6	63,00	34,16
97	3	15	0,0316	158	1028	74,499	47,79	14,396	6,59	17,406	16,6	58,50	34,16

FONTE: O autor (2020).

Analisando a TABELA 8, observa-se que os valores dos indicadores individuais, contêm um arranjo com diversos pontos críticos e estão transgredindo os limites estabelecidos pela ANEEL no período de apuração.

Os parâmetros computacionais utilizados para os operadores genéticos foram compostos conforme Barbosa (1997) e estão apresentados na TABELA 9.

TABELA 9 – PARÂMETROS COMPUTACIONAIS

Características	Parâmetro	Configurado
Indivíduo	Codificação	Binária
	Número de <i>bits</i>	<i>nbits_local</i>
População	Tamanho	10 indivíduos
	Inicial	Aleatória
Seleção	Elitismo	2 indivíduos
	Método	Roleta
Cruzamento	Tipo	Disperso
	Taxa	60%
Mutação	Tipo	Uniforme
	Taxa	5%
Parada	Critério	100 gerações

FONTE: Adaptado de Barbosa (1997)

4.3.2 FERRAMENTAS

Para a apresentação de resultados, os critérios de otimização da formulação matemática foram reestruturados para se facilitar a análise e mensuração dos impactos obtidos pela metodologia proposta, principalmente em relação aos quesitos de economia e *payback*. Para tanto, algumas estratégias foram estruturadas para se compor as análises quantitativa e qualitativa dos testes efetuados.

Uma das estratégias é quanto a definição do valor de economia produzida pelo processo de alocação otimizada, que evita o pagamento de multas e o custo de manutenção com a substituição de elos fusíveis, que é calculado por:

$$economia (ano) = \frac{\sum_{i=1}^{nRAS} Comp_i + CM_i}{2 (anos)} \quad (22)$$

onde

$Comp_i$: computa as compensações (multas) evitadas em R\$ na barra i e CM_i , que são os custos evitados na substituição de elos fusíveis nas faltas transitórias, ambos acumulados em dois anos.

Deve-se considerar também que este trabalho visa a economia dentro do período de *payback*, pois é considerado um intervalo crítico de benefícios relativos ao investimento, porém a economia é ainda maior se contemplar todo o período de vida útil do RAS.

Já o *payback* é:

$$\text{payback (anos)} = \frac{\sum_i^{nRAS} [CI_i + CO_i]}{\text{economia} * 2 \text{ (anos)}} \quad (23)$$

sendo:

CI_i, CO_i os custos de instalação e operação em R\$ do RAS na barra i em um período acumulado de 2 anos.

Com o intuito de ter resultados próximos à prática das concessionárias quando de estudos de expansão e melhorias no sistema de distribuição, é necessário criar algumas diretrizes das opções que o algoritmo computacional pode propiciar ao planejador. Então, as premissas da formulação permitem ao operador produzir resultados na otimização da alocação, nas condições que a concessionária necessitar, podendo optar por simular:

- i. Modo – RAS em estoque: tendo uma quantidade de RAS em estoque, poderá entrar com dados deste quantitativo para a simulação ser baseada em um número estático de posições na alocação;
- ii. Modo – Máximo Investimento: tendo um valor máximo de investimento a ser utilizado em expansão do sistema, o operador poderá deixar o algoritmo definir qual a quantidade de RAS que deverá instalar, sem ultrapassar o limite do valor a ser investido;
- iii. Modo – Autônomo: tendo estoque ilimitado e valor financeiro sem limites, este modo interage no sistema propondo a alocação inteligente em locais com taxas elevadas, pautado pelo máximo período de *payback*.

Para que o processo utilize uma quantidade de gerações que resulte em resultados confiáveis, foi primeiramente rodado o programa várias vezes com um monitoramento contínuo para observação de comportamento. Neste quesito observou-se a tendência de o algoritmo se estabilizar e atender às barras mais prejudicadas do sistema ou na grande parcela delas, com maior benefício, em 100 gerações. Isso mostrou que se pode ter resultados apropriados e dentro da região

factível utilizando este número de gerações. Assim se concluiu que o número de gerações adequadas ao percurso de produzir bons resultados é de 100 gerações.

Para qualificar a metodologia produzida, foi efetuada uma análise qualitativa, onde para isso, definiram-se alguns requisitos, pois a manipulação de dados de forma exploratória a partir de uma amostra induz a ajustes necessários que se fazem necessários ao problema ou mesmo à modelagem do AG.

Yin (1984) apresenta alguns requisitos importantes para potencializar a qualidade dos resultados de uma pesquisa qualitativa, sendo eles:

- ✓ mostrar que a análise qualitativa está baseada em todas as evidências relevantes;
- ✓ incluir as principais comparações nos resultados de análise qualitativa;
- ✓ analisar a qualificação da metodologia sob o aspecto mais significativo do estudo realizado.

Desta forma, propõe-se neste trabalho uma análise visual dos resultados a partir de gráficos de dispersão tipo mapa de cores, onde pode-se obter analogias e conclusões variadas, dentro do espaço de busca intitulado, contendo os requisitos recomendados por Yin.

Para identificação e praticidade na exposição das figuras e tabelas, bem como da analogia da análise qualitativa, definiu-se propor um modelo para cada opção do planejador, conforme mostra a TABELA 10.

TABELA 10 - SIGLAS DOS MODELOS

Modelo	Sigla
RASs em Estoque	RASE
Máximo Investimento	MAXI
Autônomo	AUTO

FONTE: O autor (2020).

Ainda, para identificar cada sistema, utilizou-se a sigla IE para IEEE e RE para o sistema real de uma distribuidora de energia elétrica. Assim, para cada gráfico é utilizado um código de identificação conforme a FIGURA 15.

FIGURA 15 - CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DOS GRÁFICOS



FONTE: O autor (2020).

onde:

∞ : Sistema simulado, podendo ser IE ou RE;

∂ : Opção do planejador, podendo ser RASE ou MAXI ou AUTO;

μ : Valor de ponderação para W_c e W_p e W_m e W_r , respectivamente – dado de entrada do sistema de acordo com a importância pretendida para cada função parcial, em cada simulação.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo apresentou primeiramente a formulação matemática para a resolução do problema de otimização considerando as diversas funções parciais, entre elas a principal que considera o pleno benefício com tendência de alocação considerando as multas aplicadas pelo regulador à concessionária. Em sequência, é demonstrada a abordagem para resolver a metodologia com a aplicação do processo de modelagem do AG, com as estruturas e configurações necessárias à simulação. Ainda, é elaborado uma compilação de métricas e ferramentas que subsidiam a obtenção de resultados para as hipóteses apresentadas. Contudo, a modelagem matemática e do AG para alocação otimizada de RASs constrói condições de entender os passos de todo o processo, como material fundamental à resolução computacional objetivando a obtenção de resultados pretendidos nesta dissertação e apresentados no Capítulo 5.

5 RESULTADOS

A construção do trabalho até esta etapa consolida uma estrutura teórica que apresenta resultados logicamente analisados sob a ótica da pesquisa de literatura reconstituída e agregada à proposta desta dissertação. As etapas anteriormente dissertadas apenas terão sentido se colocados em uma estrutura prática de resolução que se possa efetuar a leitura de sucesso ou as justificativas de insucesso do método aplicado. Assim, este capítulo expõe os resultados obtidos computacionalmente para a alocação de RAS em redes de distribuição, analisando estes de forma quantitativa e qualitativa.

5.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

Este perfil de análise aponta no sentido de verificação de resultados numéricos de operação da modelagem matemática e algoritmo produzidos neste trabalho. Os melhores cenários que serão apresentados em seguida foram selecionados dentre 30 simulações sucessivas.

5.1.1 SISTEMA IEEE-123 BARRAS

A TABELA 11 apresenta os resultados para os três modelos de otimização que podem ser selecionados pelo planejador. Para cada um dos modos, apresentam-se os valores da função objetivo e suas parciais, a economia anual, as barras de alocação dos RASs, e o retorno de investimento no tempo. No modelo em que o *payback* for maior de 2 anos na geração 100 (G100) é apresentado o melhor resultado na geração que o produziu. A simulação foi realizada utilizando-se índices de ponderação unitários ($w_c, w_p, w_m, w_r = 1$).

TABELA 11 - RESULTADO DA SIMULAÇÃO IEEE 123 BARRAS (W1111)

MODELO	N° DE RASs ALOCADOS	FO	FUNÇÕES PARCIAIS	ECONOMIA ANUAL (R\$)	BARRAS ALOCADAS	PAYBACK (ANOS)	
RASS ESTOQUE	11	1,798	fc=11,099 fp=5,590 fm=5,400 fr=1,690	67.169,59	19-24-11-27-17-1-29-30-8-15-10-25-18	G85	G100
						1,52	2,14
MÁXIMO DE INVESTIMENTO (R\$) 100.000,00	13	3,155	fc=13,316 fp=6,136 fm=6,169 fr=2,145	141.876,74	19-24-11-27-17-1-29-30-8-15-10-25-18	G100	
						1,11	
AUTÔNOMO	18	7,484	fc=18,800 fp=7,681 fm=7,213 fr=3,579	176.557,90	19-24-11-27-17-1-29-30-8-15-10-25-18-20-31-26-2-6	G100	
						1,18	

FONTE: O autor (2020).

Segundo a TABELA 11, observa-se que, quanto mais se investe, maior a economia e mais rápido é o retorno do investimento, sendo que a estratégia a ser escolhida depende de diretriz orçamentária da empresa. Observa-se também que a maioria das barras selecionadas estão localizadas na parte central ao extremo do alimentador, além de que também possuem índice de falhas maior do que as barras em que não houve alocação.

Entre os valores das funções parciais, se destaca a importância de incluir a função multas, visto que o seu valor tem um grau de importância de aproximadamente 40% na função custo, colaborando diretamente para a tomada de decisão com alocação em barras de maior prejuízo financeiro devido ao ressarcimento efetuado aos consumidores. Por ser um modelo de implementação baseado em dados estimados, a função multas pode ter um grau de importância maior ou menor em um modelo real.

Para a visualização dos valores normalizados no conjunto de barras selecionadas a partir da TABELA 11, apresenta-se a TABELA 12.

TABELA 12 – VALORES DAS FUNÇÕES PARCIAIS NORMALIZADAS

Barra	fc	fp	fm	fr
1	0,944	0,455	0,299	0,169
2	1,059	0,227	0,248	0,301
6	1,142	0,091	0,103	0,794
8	1,630	0,136	0,084	1,000
10	1,271	0,364	0,129	0,348
11	1,130	0,455	0,061	0,296
15	1,753	0,091	0,012	0,944
17	1,037	0,409	0,274	0,205
18	1,539	0,227	0,291	0,400

Barra	fc	fp	fm	fr
19	1,127	0,273	0,447	0,211
20	1,061	0,500	0,680	0,121
24	1,207	0,182	0,172	0,460
25	1,213	0,182	0,173	0,461
26	1,322	0,273	0,369	0,278
27	1,156	0,409	0,364	0,202
29	1,258	0,136	0,123	0,655
30	0,882	0,682	0,200	0,135
31	1,134	0,273	0,400	0,227

FONTE: O autor (2020).

Na TABELA 12, os valores da função custo são os únicos com um intervalo de valores que supera 1 unidade, visto que são parciais normalizadas nas suas bases (custo de instalação, instalação e operação) individualmente para então serem somadas entre si.

5.1.2 SISTEMA REAL 182 BARRAS

A TABELA 13 apresenta resultados obtidos pelos três modos de otimização aplicados ao sistema de 182 barras.

TABELA 13 - RESULTADO DA SIMULAÇÃO 182 BARRAS (W1111)

MODELO	N° DE RASs ALOCADOS	FO	FUNÇÕES PARCIAIS	ECONOMIA ANUAL (R\$)	BARRAS ALOCADAS	PAYBACK (ANOS)
RASS ESTOQUE	30	-7,847	fc=13,171 fp=10,963 fm=12,962 fr=2,906	130.176,07	36-37-42- 39-34-38- 32-1-88-80- 44-73-86- 79-14-28- 78-3-27-40- 10-33-26-2- 47-31-15- 17-46-13	G100
						0,94
MÁXIMO DE INVESTIMENTO (R\$) 300.000,00	41	-6,114	fc=19,395 fp=14,074 fm=16,206 fr=4,771	175.095,51	36-37-42- 39-34-38- 32-1-88-80- 44-73-86- 79-14-28- 78-3-27-40- 10-33-26-2- 47-31-15- 17-46-13- 43-35-45- 81-30-18- 12-11-48- 25-50	G100
						1,06
AUTÔNOMO	54	0,484	fc=29,398 fp=16,185 fm=20,788 fr=8,059	231.614,76	36-37-42- 39-34-38- 32-1-88-80- 44-73-86- 79-14-28- 78-27-40- 10-33-26-2- 47-15-17- 46-13-43- 35-45-81- 30-18-11- 48-25-50- 71-19-21- 53-74-69- 16-91-67- 49-66-72- 20-89-65-51	G100
						1,08

FONTE: O autor (2020).

Analisando e interpretando a TABELA 13, tem-se que quanto maior é quantidade de RASs alocados, os valores de economia e *payback* tornam-se mais atrativos para a concessionária. Ainda, no modo autônomo, o AG efetuou alocação de 54 RASs entendendo que em um limite de 100 gerações o retorno de investimento obtido foi de 1,08 anos com máximo benefício.

Quanto aos valores lidos na função multiobjetivo da TABELA 11, observam-se valores negativos, que são fruto da soma algébrica que minimiza e máxima os critérios de otimização que compõem a função objetivo.

Os valores dos critérios de otimização foram normalizados a fim de equalizar suas ordens de grandeza. Com a normalização, os valores de cada parcela ficam

entre 0 e 1, sendo que no processo de simulação, assim o valor da FO que encerra a soma de todas as parcelas normalizadas e pode vir a apresentar valores negativos devido ao equacionamento e à normalização necessária. Entende-se que quanto maior a amplitude negativa, maior o grau de importância da aplicação de RAS nas barras selecionadas devido à tendência de maior benefício e retorno financeiro em menor tempo além do atendimento aos ramais mais prejudicados pelos indicadores de qualidade no alimentador.

Em trabalhos avaliados na literatura, apenas utilizou-se um conjunto de funções parciais como o custo, priorização e até mesmo o retorno de investimento. Analisando a função multas na TABELA 13, observa-se que em um modelo real, a função multas tem equivalência próxima da função custo, ou seja, esta função deve compor a base fundamental para uma tomada de decisão inteligente na alocação de RAS. Ainda pode ser afirmado que a não utilização da função multas leva a concessionária a perdas financeiras proporcionalmente ao ressarcimento efetuado aos clientes somados ao custo de manutenção em ramais não selecionados pelo AG e, que continuam a ter uma proteção não automática.

Para a visualização dos valores normalizados no conjunto de barras selecionadas a partir da TABELA 13, apresenta-se a TABELA 14.

TABELA 14 – VALORES DAS FUNÇÕES PARCIAIS NORMALIZADAS

Barra	fc	fp	fm	fr	Barra	fc	fp	fm	fr
1	0,6012	1,0000	0,0000	0,1027	40	0,5442	0,2963	0,4712	0,1211
2	0,6436	0,8148	0,0000	0,1350	42	0,0244	0,2963	0,5315	0,0050
3	0,5131	0,7407	0,0000	0,1184	43	0,5944	0,2593	0,4214	0,1492
10	0,3596	0,4444	0,1152	0,1098	44	0,2169	0,2222	0,3162	0,0688
11	0,4276	0,3333	0,0865	0,1740	45	0,4974	0,2963	0,2604	0,1527
12	0,4333	0,3333	0,0931	0,1736	46	0,5041	0,2963	0,3098	0,1421
13	0,4207	0,3704	0,1340	0,1426	47	0,5108	0,2963	0,3699	0,1310
14	0,4062	0,4074	0,2882	0,0998	48	0,5382	0,2593	0,2441	0,1827
15	0,6202	0,4074	0,3478	0,1403	49	0,5848	0,2222	0,1771	0,2503
16	0,7289	0,3333	0,2038	0,2319	50	0,5575	0,2593	0,2241	0,1971
17	0,4617	0,3333	0,2459	0,1362	51	0,5962	0,2222	0,1157	0,3014
18	0,4907	0,2963	0,1955	0,1705	53	0,6129	0,2222	0,2428	0,2252
19	0,6304	0,2963	0,2278	0,2056	65	0,7576	0,1852	0,3286	0,2520
20	0,7537	0,2963	0,2498	0,2358	66	0,7669	0,1852	0,3767	0,2332
21	0,7440	0,2963	0,2998	0,2133	67	0,7763	0,1852	0,3934	0,2293
25	0,5358	0,2963	0,1934	0,1870	69	0,4593	0,1481	0,1674	0,2487
26	0,5110	0,3333	0,3460	0,1285	71	0,4643	0,1481	0,2452	0,2017
27	0,5165	0,3333	0,4087	0,1189	72	0,8232	0,1852	0,4267	0,2299
28	0,5220	0,3333	0,4753	0,1103	73	0,3135	0,1852	0,4554	0,0836
30	0,6605	0,2963	0,3966	0,1629	74	0,8419	0,1852	0,4856	0,2145
31	0,5747	0,2963	0,4224	0,1366	78	0,7657	0,2593	0,7992	0,1236
32	0,0972	0,2593	0,3184	0,0288	79	0,7731	0,2593	0,8280	0,1215
33	0,5876	0,2963	0,4896	0,1278	80	0,7805	0,2593	0,8924	0,1158

Barra	fc	fp	fm	fr	Barra	fc	fp	fm	fr
34	0,0844	0,2593	0,3944	0,0221	81	0,8477	0,2222	0,6736	0,1617
35	0,6408	0,2593	0,4554	0,1532	86	0,3074	0,1852	0,4412	0,0839
36	-0,1524	0,4074	0,6545	-0,0245	88	0,3064	0,1852	0,4784	0,0789
37	0,4113	0,4444	1,0000	0,0487	89	0,9825	0,1852	0,5501	0,2283
38	0,4701	0,3704	0,6857	0,0761	91	1,0012	0,1852	0,6068	0,2160
39	0,4753	0,3704	0,7426	0,0730					

FONTE: O autor (2020).

5.2 ANÁLISE QUALITATIVA

Para explorar ainda mais os resultados, além de uma análise quantitativa, é necessário efetuar outra análise sob o aspecto subjetivo, observando qualitativamente os números e o comportamento do AG. Para que isso ocorra, é efetuado comparações e cruzamentos visando qualificar e registrar o comportamento da função multiobjetivo e suas peculiaridades sob um conjunto de manipulações realizadas. Para tanto, diferentes pesos foram atribuídos aos índices de ponderação, variando as aplicabilidades do AG visualizando a atuação na economia e benefícios gerados, o retorno do investimento no tempo, locais de alocação, persistência de alocação etc.

Os gráficos apresentados propõem um *layout* tipo mapa de cores, que apresentam variações das cores com o intuito de determinar os locais de maior ou menor incidência de determinado parâmetro que está sendo analisado. Quanto mais quente a cor, maior é a persistência na alocação (gradiente de alocação), beneficiando o conjunto de parâmetros analisados. Para os gráficos do tipo bolha – dispersão, quanto maior a bolha apresentada, maior a persistência na alocação. Ainda, o gráfico é composto tanto no eixo X como também Y, por resultados a partir de valores de base entre 0 e 1 para cada parâmetro de análise.

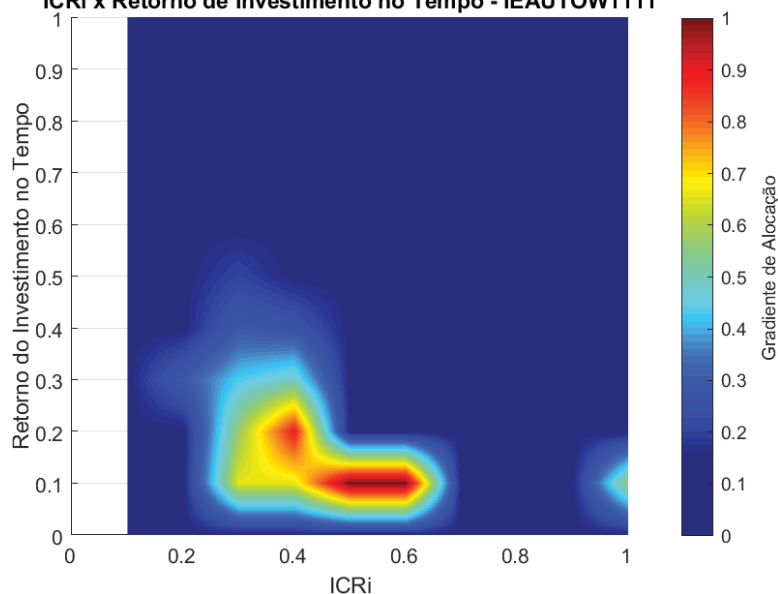
Para gerar resultados satisfatórios, efetuaram-se 30 simulações sucessivas para então gerar os gráficos. Com isso, a seguir são apresentados os testes e análises em ambos os sistemas de distribuição estudados neste trabalho, utilizando apenas o modelo autônomo, visto ser completo para este teste universal. O conjunto numérico para uma visualização quantitativa de cada gráfico desta análise qualitativa, é apresentado no ANEXO III - TABELA 2 AN.3.

5.2.1 ÍNDICE DE FALHAS E RETORNO DE INVESTIMENTO

Para todas as situações que prevêm o planejamento de instalação de RAS, espera-se que estes supram os problemas dos indicadores de qualidade da energia elétrica, apontando diretamente para locais com maior índice de falhas com um *payback* mais atrativo possível.

As FIGURAS 16 e 17 apresentam o cruzamento de informações entre índice de falhas e o retorno de investimento. O grau de repetibilidade dos resultados, após a execução do problema por 30 vezes, é apresentado em uma barra lateral direita com gradiente entre 0 e 1, e que apresenta os locais com maior incidência para a alocação dos RASs. Os fatores de ponderação para o sistema fictício e real foram considerados equitativos.

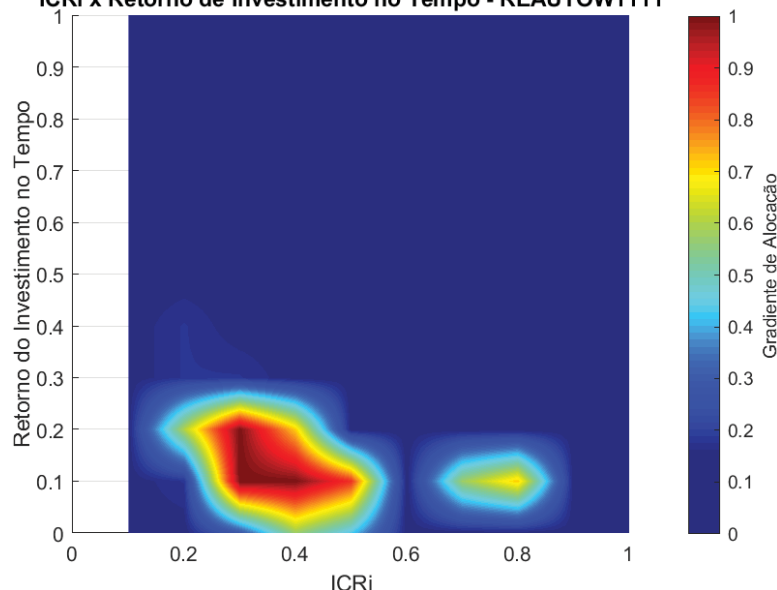
FIGURA 16 - ICRI X RETORNO DE INVESTIMENTO (IEAUTOW1111)
ICRI x Retorno de Investimento no Tempo - IEAUTOW1111



FONTE: O autor (2020).

A partir da FIGURA 16, pode-se observar que a grande maioria das barras selecionadas possuem os maiores índices de falhas do sistema, e ainda, que o gradiente de alocação é elevado para os locais com taxas de falhas relacionadas a retorno de investimento em menor tempo possível.

FIGURA 17 - ICRI X RETORNO DE INVESTIMENTO (REAUTOW1111)
ICRI x Retorno de Investimento no Tempo - REAUTOW1111



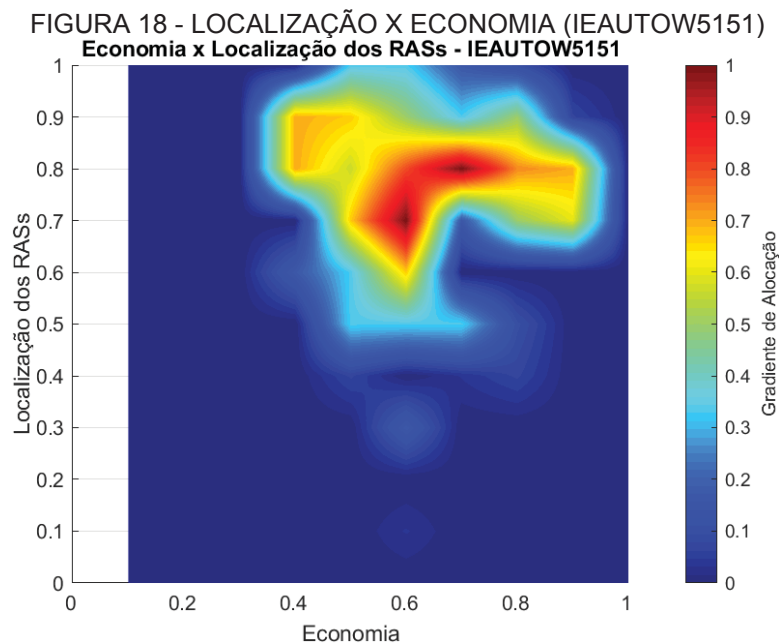
FONTE: O autor (2020).

A FIGURA 17 mostra que o alimentador do sistema real tem na grande maioria um índice de falhas intermediárias e que o gradiente é maior sobre este quantitativo significativo de barras prejudicadas, alocando RASs relacionadas a barras que possibilitam um menor retorno de investimento.

Para estes parâmetros analisados pelas FIGURAS 16 e 17 observa-se que o sistema real apresenta uma maior concentração e menor dispersão na projeção dos RASs, visto os valores utilizados tratam de dados baseado no histórico da distribuidora, concluindo na fidelidade da metodologia utilizada.

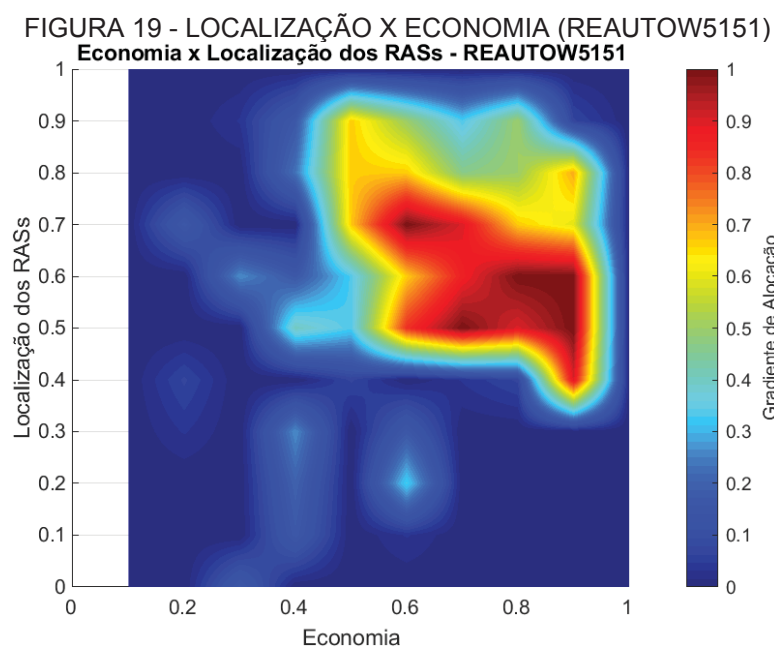
5.2.2 LOCALIZAÇÃO DAS BARRAS E ECONOMIA

Em alimentadores reais, a dificuldade de acesso para corrigir falhas acaba por determinar a baixa qualidade da energia fornecida aos consumidores, visto que ramais com distância ampla em relação à base de operação tendem a aumentar o custo de manutenção, quando de um evento de falta no sistema. Assim, as FIGURAS 18 e 19 apresentam graficamente o cruzamento de informações de alocação ao longo do alimentador e a verificação de posicionamento dos RASs propondo maior economia. Contudo, os fatores de ponderação W_c e W_m são alterados para 5, sendo que os restantes dos índices foram mantidos unitários (para realçar a busca por barras com menor custo e maior benefício de acordo com o cruzamento proposto).



FONTE: O autor (2020).

Observando a FIGURA 18, a alocação dos religadores é predominante da parte central do alimentador para o seu fim, ou seja, mais distante da base operacional, partindo do pressuposto de que a localização zero é a base operacional da concessionária e o “um”, o lugar mais distante desta. Assim, a economia é significativa se for efetuada a alocação de religadores na parte do sistema que está distante da base operacional, visto as complicações de se efetuar um atendimento imediato em ocorrências de falta.



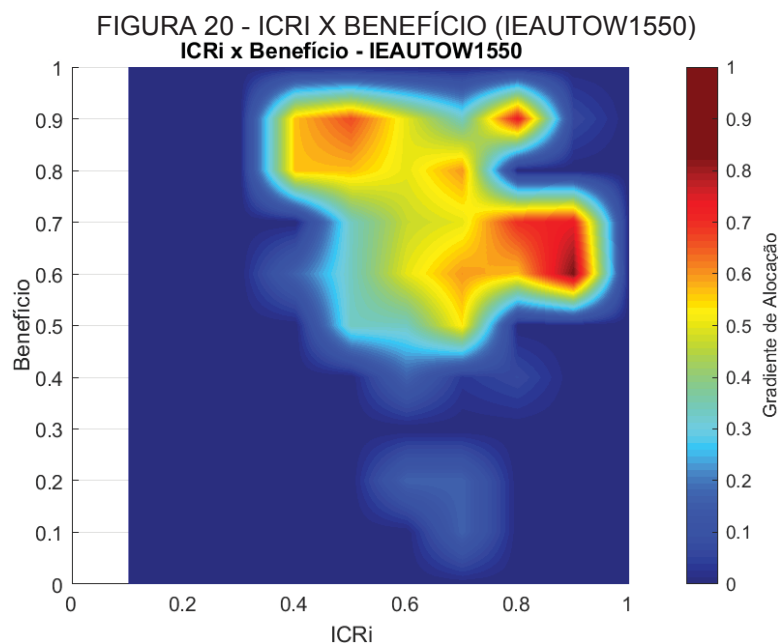
FONTE: O autor (2020)

Da mesma forma que ocorreu para o alimentador fictício, a partir da FIGURA 19 é apresentado a amostra gráfica do resultado para o sistema real. O gradiente de alocação apresenta ainda mais propriedade no sentido de que a alocação buscou barras mais distantes da base operacional pois estas traduzem uma maior economia para a distribuidora. Houve também a alocação de barras em quantidades não significativas tendendo uma menor economia, isto devido aos índices de ponderação de priorização e retorno e investimento estarem ativas para a busca relacionada.

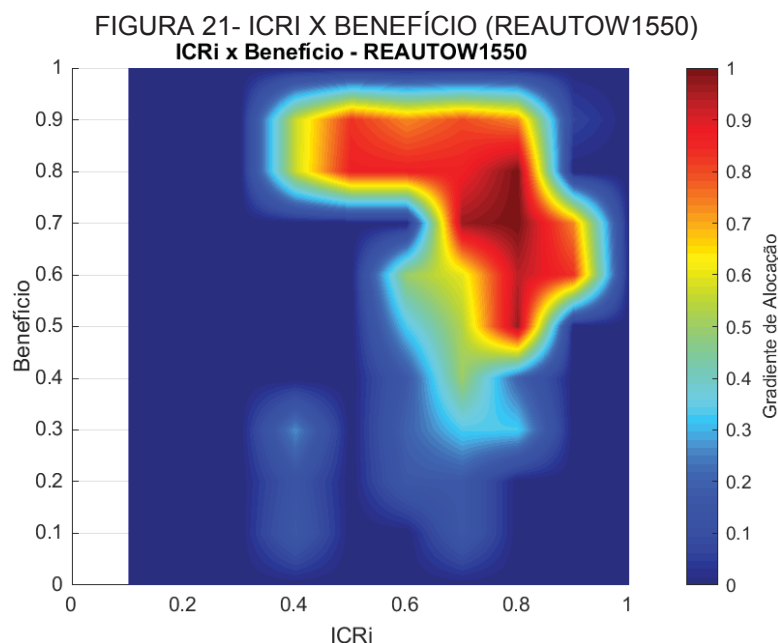
A busca ativa para os dois sistemas foi conclusiva e aponta para a maior economia projetada para o sistema real, visto a quantidade de barras distantes da base operacional, porém, ambos os sistemas testados apresentam um resultado de que quanto maior a distância da barra alocada em relação à base operacional da concessionária, maior é a economia na aplicação de religadores.

5.2.3 ÍNDICE DE FALHAS E BENEFÍCIO

Os benefícios gerados para a concessionária, envolve a redução no ressarcimento de consumidores devido à transgressão dos limites de qualidade estabelecidos pelo órgão regulador. Nas FIGURAS 20 e 21, tem-se o cruzamento do índice de falhas nas barras do alimentador com o benefício esperado.



FONTE: O autor (2020).



FONTE: O autor (2020).

Observando as FIGURAS 20 e 21, verifica-se que foi condicionado os valores de W_p e W_m para um valor de 5, visando realçar a procura por barras com maior índice de falhas levando-se em consideração as multas aplicadas por barra. Ambas figuras apresentam uma dispersão com maior gradiente de alocação tendendo um maior benefício em barras com índices de falha significativo. Ainda pode-se concluir que o sistema real apresenta uma concentração maior de barras alocadas se comparado ao fictício.

Por fim, o AG atuou com qualidade, onde, a alocação aconteceu com maior frequência em barras com maior índice de falhas tendendo ao maior benefício, sem condicionar o sistema ao retorno financeiro no tempo, mas apenas os indicadores de qualidade e as multas aplicadas pelo regulador. Aqui também pode-se concluir que este trabalho tem permeabilidade nos trabalhos já registrados na literatura.

5.3 COMPARATIVO QUALITATIVO DO CASO MULTAS

A partir dos diferentes trabalhos referenciados na pesquisa literária, existe uma lacuna nos quesitos sobre o tratamento de multas na aplicação da otimização, pois os trabalhos apenas aplicam a formulação sobre o aspecto dos indicadores de qualidade. Neste contexto, entende-se que o melhor resultado para a concessionária em termos financeiros é a aplicação de técnicas com vistas a reduzir os gastos devido

à transgressão dos indicadores de qualidade, considerando o maior benefício com a instalação em barras que contém os maiores índices de falhas. Assim, um comparativo qualitativo sobre o aspecto de multas é efetuado, apresentando-se um caso novo neste trabalho a fim de demonstrar o diferencial na aplicação da função multas. As FIGURAS 22 e 23 efetuam a comparação no sistema fictício, e as FIGURAS 24 e 25 no modelo real.

Como o intuito é analisar a importância da adição do critério de otimização relacionado a multas, o índice de ponderação W_m é manipulado. Primeiramente deixa-se este peso igual a zero (para a simulação de inexistência da função multas) e posteriormente considera-se o valor unitário (para simular inserção da função multas). Os gráficos levam em consideração o cruzamento de informações de economia, benefício e quantidade de falhas no sistema – ICRI, parâmetros melhor arranjados para observar o comportamento do processo de otimização, na questão analisada.

Assim, as FIGURAS 22 e 23 apresentam a quantidade de alocações que o algoritmo efetuou para o quantitativo de 30 simulações em sequência. Quanto maior o círculo no gráfico de dispersão, maior a quantidade de vezes que houve a instalação de RASs na respectiva barra candidata.

FIGURA 22 - CENÁRIO SEM A FUNÇÃO MULTAS (IEAUTOW1101)

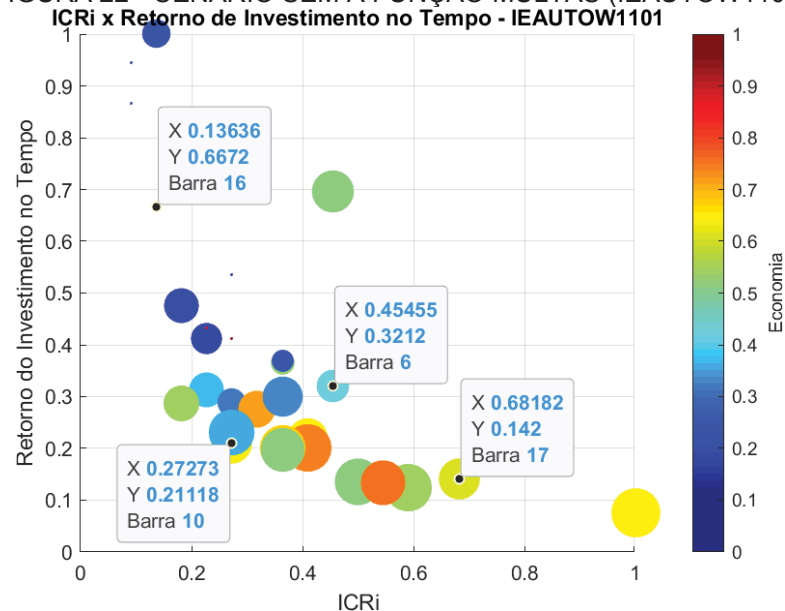
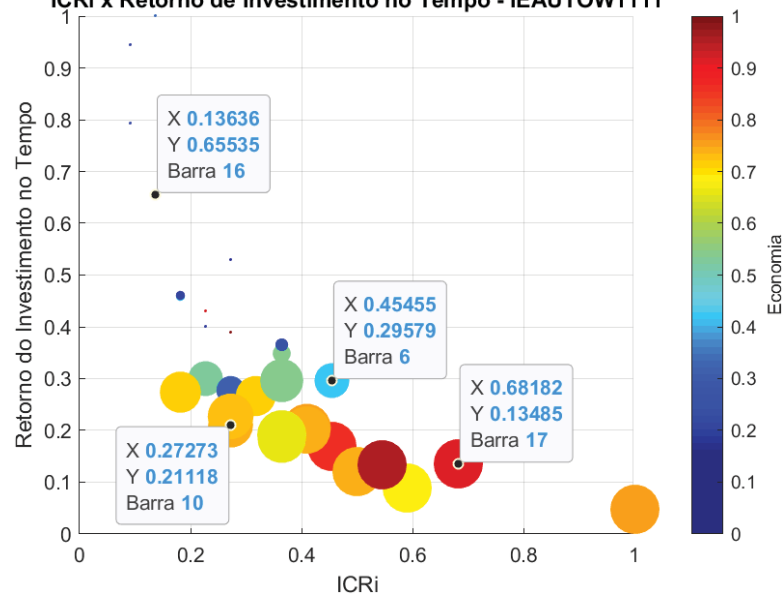


FIGURA 23 - CENÁRIO COM A FUNÇÃO MULTAS (IEAUTOW1111)
ICRi x Retorno de Investimento no Tempo - IEAUTOW1111



FONTE: O autor (2020).

Analisando a FIGURA 22, tem-se a conclusão que para o sistema fictício, a não utilização da função multas mantém a tendência em alocar barras que visem a uma menor economia e consequentemente maior retorno financeiro no tempo, se comparado com a FIGURA 23 – em que a parcial de multas é considerada.

A repetibilidade dos resultados que não considera multas se faz no sentido de não apontar para a maior economia, mas apenas tendendo ao retorno de investimento e maiores índices de falhas. Conclui-se então que a função multas (benefício) incluída na formulação, apresenta uma solução versátil e aprimorada em relação aos outros trabalhos que não a utilizaram. Nas barras 6, 10, 16 e 17, observa-se que quando a função multas não é considerada, apresenta-se uma modificação na alocação, menor economia e consequentemente maior tempo para o retorno do investimento no tempo.

Nas FIGURAS 24 e 25 é apresentado a relação da função de multas para o sistema real onde a quantidade de barras é maior que o sistema fictício.

FIGURA 24 - CENÁRIO SEM A FUNÇÃO MULTAS (REAUTOW1101)
ICRi x Retorno de Investimento no Tempo - REAUTOW1101

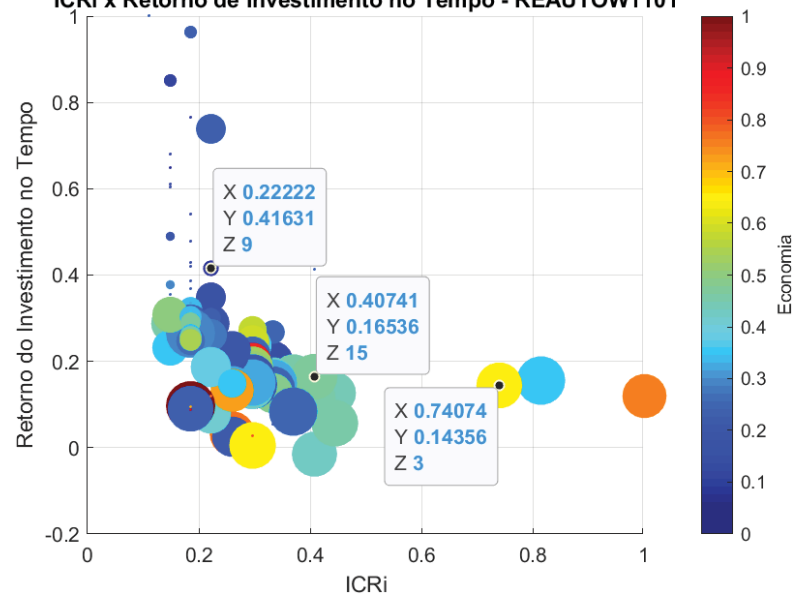
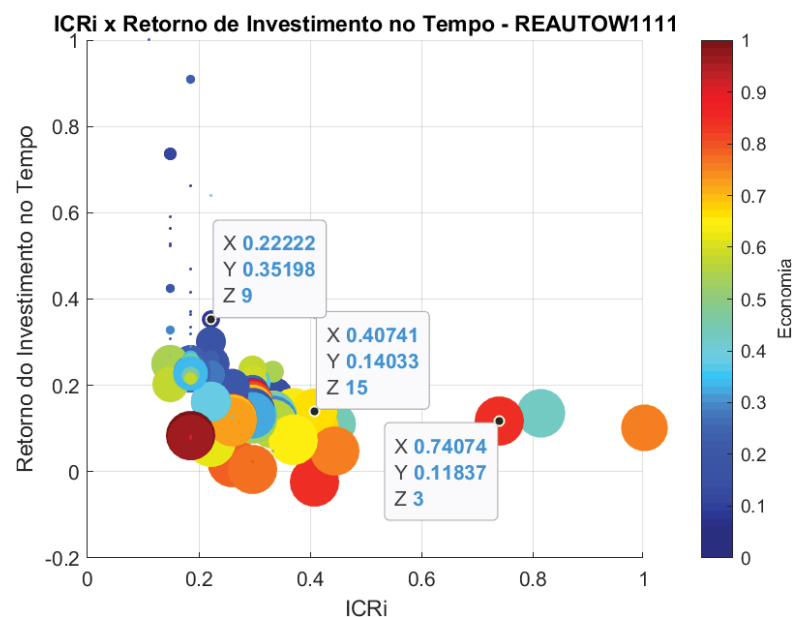


FIGURA 25 - CENÁRIO COM A FUNÇÃO MULTAS (REAUTOW1111)
ICRi x Retorno de Investimento no Tempo - REAUTOW1111



Primeiramente, observando as FIGURAS 24 e 25, o entendimento é que a economia é maior quando é considerado a função multas e ainda, que o retorno do investimento é em menor tempo (observado pelos valores das barras 3, 9 e 15), tendo em vista a relação entre custo e benefício. Quando o fator multas deixa de ser considerado, a FO deixa de computar valor para a tomada de decisão tendendo a maior economia e assim, acaba por projetar religadores com menor persistência em pontos de maior economia.

Num segundo momento, a análise mostra uma progressão diferenciada quando o índice W_m é evidenciado no conjunto, podendo afirmar que f_m possui um gradiente de persistência maior que os demais modelos apresentados na literatura ao qual levam em consideração diversos fatores, exceto as multas.

5.4 CUSTO COMPUTACIONAL

Na resolução de algoritmos via procedimentos computacionais há a recorrente preocupação dos custos relacionados ao processamento dispendido para a execução. Assim, este trabalho tomou por base analisar os tempos computacionais nos dois sistemas apresentados em conjunto com os três modelos de opção ao planejador com o intuito de verificar a real necessidade de incluir este custo na função multiobjetivo.

Diante da compilação computacional (configuração operacional da máquina utilizada para a simulação é apresentada no ANEXO IV - FIGURA 2 AN.4) envolvendo os dois sistemas em 30 execuções sucessivas para as opções RASE, MAXI, AUTO, o maior tempo verificado para o teste no sistema 123 barras (31 barras candidatas) é no modo autônomo: 125,233 segundos. Já o tempo verificado na compilação com um sistema maior, aplicado em alimentador real de concessionária com 182 barras (97 barras candidatas) à alocação, o tempo foi de 194,427 segundos. Considerando essas informações e a perspectiva de que não existam alimentadores reais com a quantidade de barras candidatas muito superior às simuladas e, cada rodada de simulação é executada separadamente para cada alimentador, o algoritmo não demanda recursos tecnológicos aprimorados, ou seja, os custos computacionais são insignificantes.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

No conjunto de simulações efetuadas, levando em consideração a alternância dos fatores e o cruzamento dos elementos contidos nas parciais da função objetivo, conclui-se que os cenários apresentados demonstram claramente que o AG efetuou alocação de RASs em barras com maior índice de falhas, maior benefício, menor custo com tendência a um intervalo de retorno do investimento com tempo atrativo para a concessionária. Quanto ao arranjo dos sistemas simulados, o sistema de 123 barras (que contém dados estimados para uma realidade próxima de um alimentador real)

apresentou resultados quantitativos e qualitativos que indicam de que a função multas pode gerar benefícios significativos, se incluída na formulação registrada na literatura. Quando aplicado ao sistema real, a função *fitness* e suas parciais apresentam valores operacionalmente factíveis à condição de escolher as melhores barras para a instalação dos RAS. Ainda, os critérios de otimização apresentados na FO são necessários para que a concessionária possa interagir com uma tomada de decisão levando em consideração valores principalmente relacionados ao ressarcimento repassado aos clientes (multas), do que apenas atender a transgressão dos limites de qualidade, visto que isso pode limitar os investimentos quando da tomada de decisão na expansão e melhoria dos sistemas.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

Este trabalho propôs uma formulação matemática para alocação ótima de religadores automáticos simplificados (RASs) em redes de distribuição via aplicação da técnica de algoritmos genéticos.

Para o sistema de 123 barras e principalmente o sistema de distribuição real de 182 barras, percebe-se que uma conveniente instalação de RASs implica em economia para a empresa distribuidora de energia, principalmente devido à redução de multas e deslocamento de equipes de manutenção. Neste viés, conclui-se que apenas considerar para a alocação critérios tradicionais como os custos operacionais ou mesmo apenas os indicadores de qualidade sem algum critério de otimização, pode-se levar a concessionária de energia elétrica a aplicar uma quantidade indevida de recursos na rede por longos períodos para o retorno financeiro atrativo, sendo que em alguns casos pode nem haver a necessidade de instalação de RAS em algumas barras com indicadores prejudicados, visto que o retorno financeiro é aquém do necessário.

Para as três estratégias de alocação propostas: indicação de número máximo de RASs a serem instalados, ou valor máximo em reais que se deseja investir ou deixando o programa escolher a melhor forma de alocação (autônomo), houve economia e obtenção de *paybacks* atrativos, que são tão mais atrativos quanto mais se investe. Nestas opções que o planejador do sistema pode interagir, é importante considerar que é flexível propor diferentes cenários e ponderá-los de acordo ao momento econômico da própria concessionária. Assim, a formulação proposta por esse trabalho pode ser aplicada em diversos arranjos utilizados por distribuidoras a fim de propiciar adequado gerenciamento da alocação de RASs de forma a aplicar adequadamente os recursos.

Os indicadores de qualidade, não analisados diretamente, podem sofrer significativa melhora com a metodologia apresentada. Isso deve-se aos aspectos propriamente da tecnologia do RAS em barras de alocação e pela dispersão e abrangência inteligente na aplicação destes equipamentos de forma otimizada nos pontos prejudicados, considerando o benefício máximo para a concessionária. A colaboração na redução dos indicadores que qualificam o fornecimento de energia vai além das questões técnicas, traduzindo um resguardo financeiro para possíveis

investimentos futuros e uma componente positiva para o acréscimo no valor da energia comercializada quando das revisões tarifárias efetuadas pela ANEEL.

As literaturas referenciadas e as principais utilizadas para as propostas de formulação da função multiobjetivo deste trabalho podem adaptar as suas próprias metodologias para então incluir a formulação apresentada como o diferencial neste projeto que é a função de multas e a de retorno de investimento. O conjunto de equações e metodologias apresentadas neste trabalho compõem subsídios para trabalhos já desenvolvidos e futuros trabalhos, pois analisa os aspectos sob o ponto de vista de custos, alvo principal das concessionárias para qualquer tomada de decisão em investimento, manutenção ou expansão do sistema.

Para futuros trabalhos, entende-se que a formulação e metodologia proposta pode contemplar a alocação de RAS temporalmente, ou seja, existindo uma variável de sistema para controlar quais os anos que se deseja efetuar a aplicação dos dispositivos e os seus quantitativos, observando o *payback* e as ponderações económicas naquele tempo. Ainda, poderá ser acrescentado o processo de realocação de RAS, observando em breve, a crescente aplicação destes dispositivos, com a necessidade eventual de redistribuir os equipamentos já instalados, como parte do planeamento da expansão.

A metodologia proposta contemplou apenas a utilização da configuração de instalação do RAS na retaguarda do elo fusível, a fim de evitar custos adicionais de retirada. Como as chaves fusíveis possuem determinada vida útil e que em algumas décadas devem ser retiradas de algumas barras do sistema, pode-se propor em um futuro trabalho, considerar o modelo de instalação do religador automático simplificado diretamente na rede, coordenando com as proteções já existentes no sistema; sendo que isso impactaria em um modelo que analise a topologia da rede. Ainda pode se propor em conjunto, restrições para o problema quando objetiva-se a alocação de RAS em série.

Por fim, com a imersão crescente de geração distribuída (GD) nos sistemas elétricos do país, este trabalho pode ser incrementado no sentido de propor uma metodologia que aborda os impactos e soluções na otimização da alocação de RAS considerando a GD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Procedimento de Fiscalização da Apuração dos Indicadores da Qualidade do Serviço**, 2014.

ANEEL – PRODIST: **Módulo 8 (Qualidade da Energia Elétrica)**, 2015. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 20 de novembro de 2018.

ANEEL. **Indicadores Coletivos de Continuidade no Brasil**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>. Acesso em: abril de 2019. Acesso em: 25 de março de 2019.

ANEEL. **Compensação de Continuidade**, 2018. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/Compensacao_de_Continuidade_Conformidade_v2/pesquisaGeral.cfm. Acesso em 10 de novembro de 2018.

BARBOSA, Helio Jose Correia. **Introdução aos Algoritmos Genéticos**. XX Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional – CNMAC, Gramado, RS. LNCC Rio de Janeiro, 1997.

CAMPITELLI, E. M.; L. G. W. Da Silva; R. A. F. Pereira; J. R. S. Mantovani. **Interactive System for Placement and Coordination of Overcurrent Protective Devices**. 2006. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, Caracas, 2006*, pp. 1-6.

DARABI, F.; Shooshtari, A.T.; Babaei, E.; Darabi, S. **Reability Cost Allocation Of Protective Devices Using Binary Programming**. 2011 *IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA)*

De Jong, K.A. **Genetic Algorithms are NOT Function Optimizers**. In *FOGA-92, Foundations of Genetic Algorithms, Vail, Colorado, 24-29, July 1992*.

EDISON, T. (1890). **Fuse Block**. Patente nº438,305. Washington, Outubro de 1890. Disponível em: <<http://edison.rutgers.edu/patents/00438305.PDF>>. Acesso em 15 de março de 2019.

ELMITWALLYIT, A., GOUDA, E., ELADAWY, S. **Restoring recloser-fuse coordination by optimal fault current limiters planning in DG-integrated distribution systems**. 2016. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol.77, pp.9-18. Qualis Capes, ISSN: 0142-0615, Classificação A1.

ESMAEILI, A., ESMAEILI, S., HOJABRI, H. **Short-circuit level control through a multi objective feeder reconfiguration using fault current limiters in the presence of distributed generations**. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Volume: 10, Issue: 14, 11 4, 2016. Qualis Capes, ISSN: 1751-8695, Classificação A1.

FRITZEN, Paulo Cícero. **Proteção de Alimentadores**. UFTPR. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/pcfritzen/protecao-de-sistemas-de-distribuicao-de-energia-eletrica->

et7el/aula_1_introducao/Aula_4_PROTECAO_ALIMENTADORES_Prot_Sist_Distr.pdf/view. Acessado em 08/10/2020.

G. D. Ferreira, A. S. Bretas and G. Cardoso. ***Optimal distribution protection design considering momentary and sustained reliability indices***. 2010. *Modern Electric Power Systems*, Wroclaw, 2010, pp. 1-8.

HAJELA, P. ***Genetic Search – na Approach to the Nonconvex Optimization Problem***. *AIAA Journal*, 28(7):1205-1210, July 1990.

HARZING (Software: *Publish Or Perish*). <https://harzing.com/> Acessado de Agosto de 2019 à setembro de 2020.

KONDO, DV; Almeida, C. F. M.; Kagan, H.; Cunha, A. P.; Gouvea, M. R.; Felber, L. A.; Braga, M. F. Jr.; Nascimento, J. A. O. ***A Methodology for Reclosers Allocation in Distribution Networks***. IEEE PES 2nd Latin American Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America). 2013.

KONDO, DV. ***Alocação de Religadores Automatizados em Sistemas de Distribuição***. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2015.

LEÃO, Ruth P.S.; Eudes B. de Medeiros; José Giordane Silveira; Marcus S. Medeiros; Thelma M.M. Pinheiro. ***Avaliação do Compromisso no Uso de Religadores em Alimentadores com Cargas Sensíveis***. V SBQEE Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Aracaju, 2003.

MARQUES R. C., H. S. Eichkoff and A. P. C. de Mello. ***Analysis of the distribution network reconfiguration using the OpenDSS® software***. Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), Niteroi, 2018.

PACHECO, Marco Aurélio Cavalcanti. ***Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações***. ICA: Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada Departamento de Engenharia Elétrica Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 1999.

RUTES, Marcelo. ***Metodologia para Redução dos Indicadores de Continuidade nas Redes de Distribuição Rurais de Energia Elétrica***. Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Área de Concentração Sistemas Energéticos Convencionais e Alternativos, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná. 2017.

S. A. A. Shahriari, A. Yazdian and M. R. Haghifam. ***Fault current limiter allocation and sizing in distribution system in presence of distributed generation***. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/PES.2009.5275298.

S. A. A. Shahriari, A. Yazdian and M. R. Haghifam. ***Cost reduction of distribution network protection in presence of distributed generation using optimized fault***

current limiter allocation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Volume 43, Issue 1, December 2012, Pages 1453-1459.

SILVA, L.G.W., Pereira, R.A.F., Mantovani, J.R.S. **Optimized allocation of sectionalizing switches and control and protection devices for reliability indices improvement in distribution systems.** *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America 2002-2004*, Pages 51-56.

SILVA, L.G.W., Pereira, R.A.F., Mantovani, J.R.S. **Alocação otimizada de dispositivos de controle e proteção em redes de distribuição.** *Sba Controle & Automação* [online]. 2010, vol.21, n.3, pp.294-307. ISSN 0103-1759. Qualis Classificação B1.

SIEMENS. **Fusesaver e Unidade de Controle Remoto 3AD8.** Siemens HG 11.43, 2017. Disponível em: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:313151ab-ee42-41cc-8db6-af385191bfb8/version:1604928572/catalog-hg-1143-2017-fusesaver-pt.pdf>. Acessado em 15/08/2020.

S&C, *Eletric Company*. **Tripsaver II – Religador montado em Chave Fusível.** Disponível em: <https://www.sandc.hk/globalassets/sac-electric/documents/sharepoint/documents---all-documents/boletim-descritivo-461-32p.pdf?dt=637434775491425738>. Acessado em 16/08/2020.

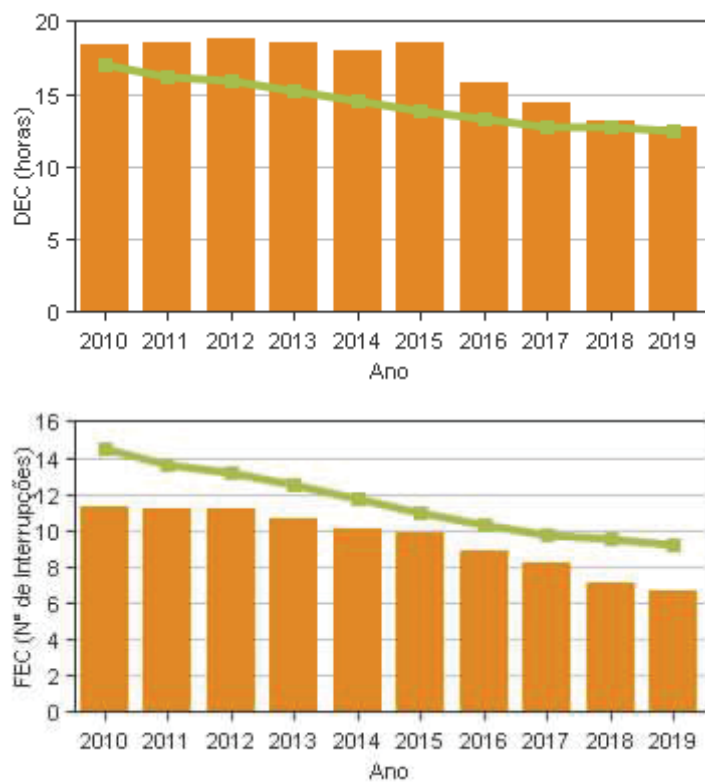
ZAMBON, Eduardo; D. Z. Bossois, B. B. Garcia and E. F. Azeredo. **A Novel Nonlinear Programming Model for Distribution Protection Optimization.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1951-1958, Oct. 2009. Qualis Capes, ISSN: 0885-8977, Classificação A1.

ZAMBON, Eduardo. **Otimização de Índices de Confiabilidade em Redes de Distribuição de Energia Elétrica.** Dissertação Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal do Espírito Santo. 2006.

YIN, R. **Case Study Research: Design and Methods.** Beverly Hills, CA, Sage Publishing, 1984.

ANEXO I – GRÁFICOS DO HISTÓRICO DE INDICADORES DE QUALIDADE NO BRASIL

FIGURA 1 AN.1 – INDICADORES DE CONCESSIONÁRIAS NO BRASIL



FONTE: ANEEL (2019).

ANEXO II – DADOS TÉCNICOS DE ATUAÇÃO / OPERAÇÃO DO RAS

TABELA 1 AN.2 – DADOS TÉCNICOS DE ATUAÇÃO / OPERAÇÃO DO RAS

Fabricante	Tempo de Abertura / fechamento	Sequência Nominal de Operação	Tempo no estado “O”	Legenda
1	t≤20ms	O – 1s – C/O – 2s – CO Padrão. Pode ser configurado de 0,5 a 5s	Configurável de 1 a 30s	O: Open C: Close s: Unidade de tempo em segundos t=tempo
2		Até 3 com intervalos de C/O configurável de 0,5 a 5s		

FONTE: Siemens / S&C (2020).

ANEXO III – DISPERSÃO QUANTITATIVA DA PERSISTÊNCIA DO AG

TABELA 2 AN.3 – DISPERSÃO QUANTITATIVA DA PERSISTÊNCIA DO AG

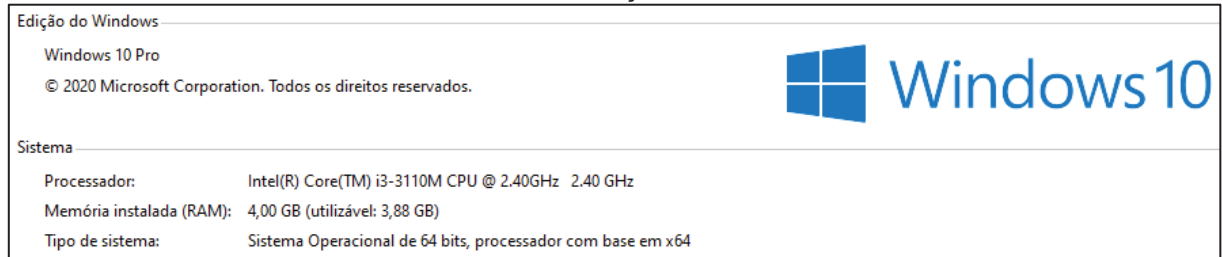
Barra	FIGURA 16	FIGURA 17	FIGURA 18	FIGURA 19	FIGURA 20	FIGURA 21	FIGURA 22	FIGURA 23	FIGURA 24	FIGURA 25
	AUTO W1111		AUTO W5151		AUTO W1550		AUTO W1101	AUTO W1111	AUTO W1101	AUTO W1111
	IE	RE	IE	RE	IE	RE	IE		RE	
1	30	30	5	3	27	0	22	30	24	27
2	10	30	0	7	23	0	15	15	29	29
3	0	0	0	0	0	0	0	0	26	30
4	0	0	2	9	0	0	10	0	0	0
5	1	9	8	0	4	0	7	4	4	4
6	6	0	15	0	0	0	13	13	0	0
7	0	0	0	10	0	0	0	0,1	2	1
8	28	0	17	0	25	0	20	29	0	0
9	0	3	30	0	26	0	12	8	3	4
10	26	30	23	0	30	1	21	25	22	22
11	30	25	30	0	30	0	27	30	20	16
12	2	0	0	0	1	0	8	5	20	20
13	2	28	0	0	2	2	15	10	25	25
14	3	30	19	5	30	24	10	10	22	30
15	27	28	19	7	30	30	28	28	26	26
16	0	26	0	9	0	16	0	0	7	6
17	30	28	30	1	10	21	21	30	25	26
18	20	25	5	0	30	10	19	24	20	15
19	30	25	30	29	30	17	30	30	18	16
20	15	22	30	30	24	21	17	20	10	10
21	0	26	0	30	0	23	0	0	14	10
22	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0
23	3	0	4	30	0	0	6	6	11	0
24	30	0	30	0	30	0	28	30	2	2
25	22	23	0	12	30	10	26	26	16	13
26	10	30	25	21	0	30	20	20	29	29
27	30	30	30	30	30	30	25	30	24	30
28	0	30	0	25	0	30	0	0	20	30
29	30	0	25	0	29	0	26	30	17	17
30	30	26	25	30	30	30	24	29	21	21
31	15	0	2	19	30	30	16	21	27	27
32	-	30	-	30	-	27	-	-	25	29
33	-	30	-	30	-	30	-	-	30	30
34	-	30	-	30	-	30	-	-	20	30
35	-	26	-	15	-	30	-	-	23	23
36	-	30	-	30	-	30	-	-	25	30
37	-	30	-	23	-	30	-	-	27	30
38	-	30	-	28	-	30	-	-	25	29
39	-	30	-	30	-	30	-	-	29	30
40	-	30	-	13	-	30	-	-	23	30
41	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
42	-	30	-	30	-	30	-	-	27	30
43	-	29	-	13	-	30	-	-	25	25
44	-	30	-	30	-	24	-	-	20	30
45	-	26	-	3	-	21	-	-	22	22
46	-	28	-	1	-	23	-	-	25	25
47	-	30	-	3	-	30	-	-	27	27
48	-	23	-	0	-	21	-	-	13	13
49	-	24	-	0	-	8	-	-	17	17
50	-	23	-	2	-	16	-	-	17	15
51	-	19	-	0	-	0	-	-	11	11
52	-	9	-	12	-	3	-	-	5	4
53	-	24	-	30	-	21	-	-	13	10
54	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
55	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
56	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
57	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
58	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0

Barra	FIGURA 16	FIGURA 17	FIGURA 18	FIGURA 19	FIGURA 20	FIGURA 21	FIGURA 22	FIGURA 23	FIGURA 24	FIGURA 25
	AUTO W1111		AUTO W5151		AUTO W1550		AUTO W1101	AUTO W1111	AUTO W1101	AUTO W1111
	IE	RE	IE	RE	IE	RE	IE		RE	
59	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
60	-	0	-	1	-	1	-	-	0	0
61	-	0	-	3	-	9	-	-	0	0
62	-	0	-	2	-	15	-	-	0	0
63	-	3	-	0	-	22	-	-	6	1
64	-	2	-	20	-	22	-	-	7	0
65	-	21	-	30	-	30	-	-	16	16
66	-	20	-	20	-	30	-	-	16	16
67	-	25	-	11	-	30	-	-	20	20
68	-	2	-	9	-	23	-	-	2	2
69	-	28	-	30	-	1	-	-	18	18
70	-	0	-	15	-	10	-	-	1	1
71	-	22	-	30	-	19	-	-	16	16
72	-	20	-	13	-	30	-	-	30	15
73	-	30	-	30	-	30	-	-	30	30
74	-	28	-	11	-	30	-	-	10	6
75	-	0	-	30	-	29	-	-	1	1
76	-	0	-	6	-	30	-	-	0	0
77	-	2	-	30	-	30	-	-	16	0
78	-	30	-	30	-	30	-	-	21	30
79	-	30	-	30	-	30	-	-	23	30
80	-	30	-	30	-	30	-	-	23	30
81	-	26	-	30	-	30	-	-	20	20
82	-	1	-	30	-	30	-	-	6	3
83	-	4	-	30	-	30	-	-	0	0
84	-	0	-	25	-	30	-	-	0	0
85	-	3	-	30	-	30	-	-	0	0
86	-	30	-	30	-	30	-	-	30	30
87	-	8	-	30	-	30	-	-	5	5
88	-	30	-	30	-	30	-	-	26	26
89	-	20	-	23	-	30	-	-	5	15
90	-	14	-	30	-	30	-	-	6	4
91	-	26	-	30	-	30	-	-	6	2
92	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
93	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
94	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
95	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
96	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0
97	-	0	-	0	-	0	-	-	0	0

FONTE: Autor (2020).

ANEXO IV – INFORMAÇÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL UTILIZADO PARA AS SIMULAÇÕES

FIGURA 2 AN.4 – INFORMAÇÕES DO SISTEMA COMPUTACIONAL UTILIZADO PARA AS SIMULAÇÕES



FONTE: O Autor (2020).