

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GIOVANE ANGELO CARNIO

**ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE SENSORES INDICADORES DE FALTA EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO
ALGORITMO IMUNE**

Ilha Solteira
2022

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GIOVANE ANGELO CARNIO

**ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE SENSORES INDICADORES DE FALTA EM
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO
ALGORITMO IMUNE**

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – UNESP como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C289a Carnio, Giovane Angelo.
Alocação otimizada de sensores indicadores de falta em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmo imune / Giovane Angelo Carnio. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
79 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Fábio Bertequini Leão
Inclui bibliografia

1. Alocação otimizada de sensores indicadores de Falta. 2. Sistemas de distribuição de energia elétrica. 3. Algoritmo imune.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e um dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e dois, o discente *Giovane Angelo Carnio*, matriculado sob o nº 151050554, tendo como banca examinadora seu orientador, o *Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão*, o *Doutor Ricardo Fonseca Buzo* e o *Mestre Henrique Molina Barradas*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "Alocação Otimizada de Sensores Indicadores de Falta em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando Algoritmo Imune" obtendo a nota 10 (dez) e conceito aprovado.

Fábio Bertequini Leão

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão
- orientador -

Giovane Carnio

Giovane Angelo Carnio
- discente -

Ricardo Buzo

Doutor Ricardo Fonseca Buzo
- Membro da Banca -

Henrique M Barradas

Mestre Henrique Molina Barradas
- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio Carlos e Silvia. Sem vocês nada seria possível, obrigado por tudo, meus tesouros mais valiosos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, em especial meus pais Antonio Carlos e Silvia, por todo o carinho e amor de sempre. Obrigado pela educação, pelos ensinamentos e pelas oportunidades oferecidas, sem vocês essa conquista não seria possível.

Agradeço também a minha companheira de vida Beatriz, por toda cumplicidade, amor e determinação em todos estes anos vivendo à distância. Você sempre me deu muitas forças para seguir lutando e essa conquista também é sua.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Fábio Bertequini Leão, pela grande oportunidade oferecida com o projeto de iniciação científica que viria não só a se tornar meu trabalho de conclusão de curso, mas também me abriria portas no mercado de trabalho. Obrigado por todo apoio e confiança que sempre depositou em mim.

Agradeço aos colegas do LaPSEE, com os quais tive o privilégio de compartilhar experiências e aprender muito durante a realização do projeto.

Agradeço aos meus ex-companheiros de república em Ilha Solteira e de classe, pela amizade e pelas experiências compartilhadas durante estes longos anos. Levarei para sempre comigo as boas lembranças dessa família.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processos 2017/14556-1 e 2015/21972-6 pelo apoio financeiro desta pesquisa.

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin.

RESUMO

A manutenção e melhoria dos índices de confiabilidade das redes de distribuição sempre foram objetivos a serem alcançados pelas concessionárias de energia elétrica devido, principalmente, a manutenção de qualidade de energia aos consumidores e aos limites pré-estabelecidos pelas agências reguladoras. Para alcançar esses objetivos considerando a expansão e modernização da rede as concessionárias devem investir em tecnologias que possibilitem condições de monitorar e operar a rede de forma estratégica. Por outro lado, é necessário reduzir ao máximo os custos operacionais e de investimento na rede. Uma das tecnologias disponíveis para o monitoramento e operação da rede são os Sensores Indicadores de Falta (IF). Estes podem ser utilizados para reduzir o tempo para localização da falta e o tempo de reparo da rede e, portanto, reduzir o Custo da Energia Não Suprida (CENS) melhorando a confiabilidade da rede. Por outro lado, deve-se considerar que existe um Custo de Investimento para alocação desses sensores (CINV), e não é aceitável que se instale sensores em todos os ramais do sistema devido ao alto custo de investimento. Neste projeto de pesquisa será abordado o problema de alocação de sensores IF em sistemas de distribuição como um problema de otimização combinatória, considerando dois objetivos conflitantes: CENS e custo de investimento na alocação de sensores. Para resolução do modelo matemático será desenvolvido e implementado um Algoritmo Imune. O algoritmo é baseado no princípio da Seleção Clonal e utiliza os operadores de seleção, clonagem, hipermutação somática, hipermacromutação e substituição de células B de modo a manter a diversidade da população de anticorpos. Foram realizados testes experimentais com o método proposto utilizando um sistema teste da literatura de 19 barras de carga. Os resultados mostram que o AI é uma técnica de solução promissora em termos da velocidade de decaimento para a melhor solução na alocação de sensores indicadores de faltas em redes de distribuição de energia elétrica. A principal desvantagem observada em relação as técnicas já propostas é a quantidade de parâmetros e o maior esforço computacional no processo de clonagem e no cálculo dos operadores imunes.

Palavras-chave: Sensores Indicadores de Falta. Custo da Energia Não Suprida. Custo de Investimento.

ABSTRACT

The maintenance and improvement of the reliability indices of the distribution networks have always been goals to be achieved by the electric energy concessionaires, mainly due to the maintenance of energy quality for consumers and the limits pre-established by regulatory agencies. In practice, considering the expansion and modernization of the network, concessionaires must invest in technology that enables them to monitor and operate the network in a strategic way. On the other hand, it is necessary to reduce operating and investment costs in the network as much as possible. One of the technologies available for monitoring and operating the network are Fault Indicator Sensors (IF). These can be used to reduce fault location time and network repair time and therefore reduce Unsupplied Energy Cost (CENS) by improving network reliability. However, one must consider that there is an Investment Cost for the allocation of these sensors (CINV), and it is not acceptable to install sensors in all branches of the system due to the high investment cost. In this research project, the problem of allocating IF sensors in distribution systems will be addressed as a combinatorial optimization problem, considering two conflicting objectives: CENS and investment cost in sensor allocation. To solve the mathematical model, an Immune Algorithm will be developed and implemented. The algorithm is based on the principle of Clonal Selection and uses the operators of selection, cloning, somatic hypermutation, hyper macromutation and B cell substitution in order to maintain the diversity of the antibody population. Experimental tests were carried out with the proposed method using a 19 bars literature test system. The results show that the AI is a promising tool in terms of decay speed when finding the best solution in the allocation of fault indicator sensors in distribution networks. The most significant disadvantage when compared to other techniques is the elevated number of parameters and the high computational effort in the cloning process and in the immune operators calculation.

Keywords: Fault Indicator Sensors. Unsupplied Energy Cost. Investment Cost.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SENSOR INDICADOR DE FALTA GENÉRICO.....	19
FIGURA 2: IF SEL AUTORANGER AR360.	21
FIGURA 3: IF SEL AUTORANGER AR-OH.	22
FIGURA 4: IF GRIDSENSE LINEIQ.....	22
FIGURA 5: IF GRIDSENSE LINEIQ.....	22
FIGURA 6: SISTEMA TESTE DE CINCO BARRAS DE CARGA COM ALOCAÇÃO DE 4 SENSORES IF ALEATORIAMENTE.	25
FIGURA 7: SISTEMA IMUNOLÓGICO.	28
FIGURA 8: CODIFICAÇÃO DO PROBLEMA E PROCESSO DE HIPERMUTACÃO.	31
FIGURA 9: DIAGRAMA DE BLOCOS DO AI.....	33
FIGURA 10: SDEE TESTE UTILIZADO PARA ALOCAÇÃO DOS INDICADORES DE FALTA.....	35
FIGURA 11: CODIFICAÇÃO PARA O AI – SOLUÇÃO PARA O CASO DA FIGURA 6.....	36
FIGURA 12: SISTEMA TESTE DE 19 BARRAS DE CARGA.	42
FIGURA 13: RESULTADO IMPRESSO PELO AI PARA OS PESOS $w_1=0,2$ E $w_2=0,8$ PARA A MELHOR SOLUÇÃO.....	45
FIGURA 14: GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DA FUNÇÃO OBJETIVO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE GERAÇÕES PARA O AI E O AGA QUANDO $w_1 = 0,2$ E $w_2 = 0,8$	47
FIGURA 15: RESULTADO IMPRESSO PELO AI PARA OS PESOS $w_1=0,5$ E $w_2=0,5$ PARA A MELHOR SOLUÇÃO.....	48
FIGURA 16: GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DA FUNÇÃO OBJETIVO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE GERAÇÕES PARA O AI E O AGA QUANDO $w_1 = 0,5$ E $w_2 = 0,5$	49
FIGURA 17: RESULTADO IMPRESSO PELO AI PARA OS PESOS $w_1=0,8$ E $w_2=0,2$ PARA A MELHOR SOLUÇÃO.....	51
FIGURA 18: GRÁFICO DO COMPORTAMENTO DA FUNÇÃO OBJETIVO EM RELAÇÃO AO NÚMERO DE GERAÇÕES PARA O AI E O AGA QUANDO $w_1 = 0,8$ E $w_2 = 0,2$	52
FIGURA 19: SDEE TESTE PARA A SEGUNDA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA...60	
FIGURA 20: CÉLULA B CODIFICADA PARA A SEGUNDA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.	60
FIGURA 21: SDEE TESTE PARA A TERCEIRA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA. .62	
FIGURA 22: CÉLULA B CODIFICADA PARA A TERCEIRA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.	62
FIGURA 23: SDEE TESTE PARA A QUARTA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA....63	
FIGURA 24: CÉLULA B CODIFICADA PARA A QUARTA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.....	64
FIGURA 25: SDEE TESTE PARA A QUINTA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.65	
FIGURA 26: CÉLULA B CODIFICADA PARA A QUINTA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.	65
FIGURA 27: SDEE TESTE PARA A SEXTA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.....67	
FIGURA 28: CÉLULA B CODIFICADA PARA A SEXTA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.	67
FIGURA 29: SDEE TESTE PARA A SÉTIMA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.68	
FIGURA 30: CÉLULA B CODIFICADA PARA A SÉTIMA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.	69

FIGURA 31: SDEE TESTE PARA A OITAVA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.	70
FIGURA 32: CÉLULA B CODIFICADA PARA A OITAVA CONFIGURAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA.	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: VALORES DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA CADA UMA DAS OITO SOLUÇÕES ESTUDADAS.....	37
TABELA 2: VALORES DA FUNÇÃO OBJETIVO PARA CADA UMA DAS OITO SOLUÇÕES ESTUDADAS VARIANDO-SE O COMPRIMENTO DAS SEÇÕES.....	41
TABELA 3: TRÊS MELHORES ALOCAÇÕES PARA OS PESOS $w_1=0,2$ E $w_2=0,8$ PARA O AI. ...	44
TABELA 4: FO EM FUNÇÃO DA GERAÇÃO NG PARA OS PESOS $w_1=0,2$ E $w_2=0,8$	46
TABELA 5: TRÊS MELHORES ALOCAÇÕES PARA OS PESOS $w_1=0,5$ E $w_2=0,5$ PARA O AI. ...	48
TABELA 6: DADOS DA MELHOR SOLUÇÃO PARA OS PESOS $w_1=0,5$ E $w_2=0,5$	49
TABELA 7: MELHORES ALOCAÇÕES PARA OS PESOS $w_1=0,8$ E $w_2=0,2$ PARA O AI.	50
TABELA 8: DADOS DA MELHOR SOLUÇÃO PARA OS PESOS $w_1=0,8$ E $w_2=0,2$	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
2	MÉTODO PARA ALOCAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	18
2.1	SENSORES INDICADORES DE FALTA (IFS)	18
2.1.1	Tipos de IFS existentes e princípio de funcionamento	18
2.1.2	Fabricantes e exemplos práticos de Sensores Indicadores de falta	21
2.2	MODELAGEM MATEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO DE SENSORES IF EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO.....	23
2.2.1	Estudo da alocação de sensores IF em uma rede teste de distribuição 25	
2.2.2	Exemplo de alocação de sensores IF na rede teste de distribuição	26
2.3	ALGORITMO IMUNE (AI) PARA SOLUÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO.....	27
2.3.1	Sistema Imunológico e AI	27
2.3.2	Operadores Imunes	29
2.3.2.1	Seleção	29
2.3.2.2	Hipermutação somática	29
2.3.2.3	Manutenção da diversidade da população de memória	30
2.3.2.4	Substituição das células B	31
2.3.3	Algoritmo Imune proposto, Diagrama de Blocos e Critério de Parada ..	31
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1	ESTUDO DA ALOCAÇÃO DE IFS PARA O SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS DE CARGA.....	35
3.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS DADOS DE ENTRADA	35
3.2.1	Primeira alocação realizada	36
3.3	DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DAS ALOCAÇÕES.....	37
3.4	ESTUDO DA ALOCAÇÃO DE IFs PARA O SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS DE CARGA COM COMPRIMENTOS DIFERENTES DAS SEÇÕES.....	39
3.4.1	Primeira Alocação Realizada	40
3.5	DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DAS ALOCAÇÕES.....	41
3.6	TESTES E RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 19 BARRAS DE CARGA EMPREGANDO O AI.....	42
3.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS DADOS DE ENTRADA	42
3.8	SIMULAÇÕES.....	44
3.8.1	Pesos $w_1=0,2$ e $w_2=0,8$	44
3.8.2	Pesos $w_1=0,5$ e $w_2=0,5$	47
3.8.3	Pesos $w_1=0,8$ e $w_2=0,2$	50
3.9	DISCUSSÃO SOBRE AS SIMULAÇÕES	53
4	CONCLUSÃO	56

5	REFERÊNCIAS.....	58
	APÊNDICE A – CÁLCULOS PARA O SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS DE CARGA.....	60
A.1	CÁLCULOS PARA PRIMEIRA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA 60	
A.1.1	Segunda Alocação Realizada	60
A.1.2	Terceira Alocação Realizada.....	61
A.1.3	Quarta Alocação Realizada	63
A.1.4	Quinta Alocação Realizada	65
A.1.5	Sexta Alocação Realizada	67
A.1.6	Sétima Alocação Realizada	68
A.1.7	Oitava Alocação Realizada.....	70
A.2	CÁLCULOS PARA SEGUNDA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA 71	
A.2.1	Segunda Alocação Realizada	71
A.2.2	Terceira Alocação Realizada.....	72
A.2.3	Quarta Alocação Realizada	74
A.2.4	Quinta Alocação Realizada	75
A.2.5	Sexta Alocação Realizada	76
A.2.6	Sétima Alocação Realizada	77
A.2.7	Oitava Alocação Realizada.....	78

1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) é uma parte importante da rede de abastecimento de energia nacional, pois promove a ligação entre as linhas de transmissão (LT) e os consumidores. Como destacam Ogura e Leão (2017), devido ao crescimento acelerado e à inserção de geração distribuída nas redes, as agências reguladoras de energia têm pressionado cada vez mais as concessionárias visando investimentos em tecnologias que proporcionem a manutenção e melhorias nos índices de confiabilidade da rede, para que sempre busquem fornecer energia elétrica de maneira eficiente e segura aos seus clientes. Neste sentido, quando possível, as concessionárias devem prever eventuais defeitos no SDEE, para que na ocorrência de uma falta os consumidores fiquem sem abastecimento de energia pelo menor tempo possível. Nem sempre é possível prever todos os contratempos que possam levar ao desligamento temporário de consumidores, como por exemplo na ocorrência de fenômenos naturais, tempestades ou até mesmo acidentes por contato direto ou indireto de pessoas ou animais com a rede. Se não houver tecnologias que auxiliem na detecção deste ponto defeituoso, os únicos meios para que as concessionárias descubram tal ocorrência e solucionem o problema é através de ligações recebidas por parte dos próprios clientes, as quais são repassadas ao Centro de Operação da Distribuição (COD) que contata as equipes de manutenção para realização dos reparos necessários. Isto pode demandar muito tempo para a detecção e solução do defeito e conseqüentemente elevados custos à concessionária devido às multas impostas pela agência reguladora (Custo de Energia Não Suprida – CENS).

Segundo Luan, Teng e Chen (2011), em muitos países têm-se aplicado conceitos de distribuição automatizada e redes inteligentes visando maiores índices de confiabilidade à rede e melhoria da confiabilidade da energia suprida. Geralmente, a distribuição automatizada inclui funções como automação de subestações, automação dos alimentadores, leitura automática dos medidores e criação de sistemas de informações geográficas dos locais de abastecimento dos consumidores. Já as redes inteligentes são dotadas de recursos de tecnologia da informação (TI) e automação para implementação de um avançado sistema de energia com monitoramento automático, diagnósticos e reparos, fazendo com que estas sejam mais eficientes, confiáveis e sustentáveis do que as redes convencionais.

Com o aumento do investimento em alocação de tecnologia para manutenção e proteção do SDEE, destacam-se os sensores indicadores de falta (IF) ou do inglês FPI (Fault Passage Indicators). Como explicam Muench e Wright (1984), estes sensores indicam, através de um sinal luminoso no próprio sensor ou através do envio de um sinal remoto em tempo real para o COD, quando uma corrente de curto-circuito superior a corrente de carga (corrente nominal de operação) está fluindo através deles. Teng, Huang e Luan (2014) afirmam que avanços tecnológicos estão proporcionando novos sensores (*smart sensors*) cada vez mais acessíveis para o monitoramento e proteção em sistemas de distribuição.

Se os sensores apresentam baixo custo em relação aos dispositivos já instalados na rede, como por exemplo religadores, é possível então alocar uma grande quantidade de IFs no SDEE, principalmente em pontos críticos da rede (regiões que apresentem elevadas taxas de falhas, ramos com maior concentração de cargas etc.) Deste modo, com as informações fornecidas pelos sensores ao COD de maneira remota (através de plataformas de comunicação remota como o ZigBee por exemplo), é possível mapear de maneira eficiente e rápida em qual ramo da rede se encontra a falta e assim reduzir o tempo de localização e de reparo desta, o que contribui para a redução dos custos operacionais e para o aumento da confiabilidade da rede do SDEE.

1.1 JUSTIFICATIVA

Fica visível a necessidade da implementação de sensores indicadores de falta no sistema de distribuição de energia elétrica por parte das concessionárias de energia para que os custos operacionais da rede devido ao Custo da Energia Não Suprida – CENS sejam minimizados. Em contrapartida, a alocação deve ser realizada de forma eficiente e estratégica, pois um elevado investimento em sensores também pode aumentar consideravelmente o custo operacional da rede devido aos Custos de Investimento (CINV). Assim, nota-se que a alocação de sensores IF em SDEE se torna um problema de otimização combinatória, de modo que seja modelado matematicamente através de uma função objetivo que leve em consideração o CENS, e o CINV, ponderando-se os pesos destes dois custos conflitantes de acordo com os objetivos da concessionária. Na modelagem da função objetivo, muitos parâmetros são levados em consideração (números de zonas do sistema, taxa de falha da seção, tempo de localização da falta, custo de manutenção do sensor etc), o que configura

esta função como de difícil solução. Para resolver esse problema alguns métodos têm sido propostos na literatura, que em sua maioria são baseados em técnicas de otimização combinatória como Algoritmos Genéticos (AG) apresentados em Cong et al. (2005), Almeida et al. (2011) e Usida e Coury (2012), Algoritmos Genéticos Adaptativos propostos por Ogura e Leão (2017) e Cruz (2016), Lógica Fuzzy (LF) vista em De Souza et al. (2009) e Algoritmos Imunes (AI) idealizados por Ho, Lee e Lin (2011) e Leão, Pereira e Mantovani (2010).

1.2 OBJETIVOS

Tendo em vista a problemática exposta, neste trabalho busca-se resolver o problema de alocação de sensores indicadores de falta em SDEE como um problema de otimização combinatória. A função objetivo do problema é a mesma apresentada por Ogura e Leão (2017) e Cruz (2016). Como já dito anteriormente, a função objetivo apresenta dois problemas conflitantes: minimizar o CENS (aumentando a confiabilidade da rede) e minimizar o custo de investimento (CINV) em sensores, para que o custo total de operação da rede (modelado matematicamente como a função objetivo) seja o mínimo possível. A técnica utilizada para solução é a meta-heurística baseada em Algoritmo Imune (AI) proposta por Leão, Pereira e Mantovani (2010). O algoritmo é baseado no princípio da seleção clonal como mostram De Castro e Von Zuben (2002) e emprega os operadores de seleção clonal, clonagem, hipermutação somática, hipermacromutação e substituição de células B de modo a manter a diversidade da população de anticorpos.

2 MÉTODO PARA ALOCAÇÃO DE INDICADORES DE FALTA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo será explicado de maneira geral o funcionamento dos IFs, como é realizada sua instalação e serão apresentados alguns modelos existentes, dando enfoque maior aos aéreos, tendo em vista que são os mais utilizados no Brasil. Também será apresentada a formulação matemática bem como a técnica de solução proposta para resolução do problema.

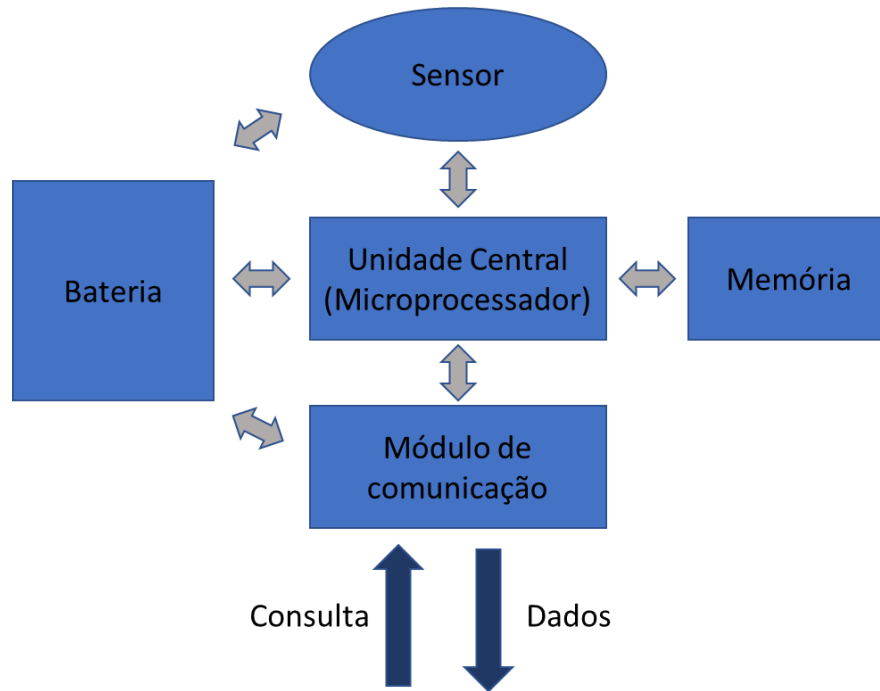
2.1 SENSORES INDICADORES DE FALTA (IFS)

No âmbito de aumentar os índices de confiabilidade da rede e a qualidade de energia suprida aos consumidores, os sensores indicadores de falta apresentam-se como uma importante ferramenta para o monitoramento do SDEE pois são equipamentos eficientes, acessíveis, e relativamente de fácil instalação e manutenção. Os IFs detectam a passagem de uma corrente de curto-circuito superior à corrente nominal de carga estabelecida para determinado ramo da rede em que este se encontra instalado, sinalizando de diversas formas (por luz, bandeirola, envio remoto de informações ao COD, etc). Sua instalação de maneira adequada permite a detecção de faltas na rede de maneira mais rápida, o que pode levar a uma diminuição dos custos de operação da rede para a concessionária devido à minimização do CENS.

2.1.1 Tipos de IFS existentes e princípio de funcionamento

Sensores indicadores de falta buscam converter grandezas do mundo físico em sinais elétricos que possibilitam a realização de medições e análise de dados. Na Figura 1 é ilustrado simplificada o diagrama de blocos de um sensor IF genérico.

Figura 1: Diagrama de Blocos de um sensor Indicador de Falta genérico.



Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser visualizado pelo diagrama da Figura 1, os IFs mais completos são compostos por cinco principais blocos:

- A. Sensor ou transdutor, responsável pela conversão da corrente elétrica ou grandeza física a ser medida em sinal elétrico;
- B. Alimentação por bateria, responsável pelo fornecimento de energia elétrica para a operação do sensor, o que torna o dispositivo autônomo no caso de desligamento do ramo em monitoramento. Ressalta-se que alguns IFs indicam por luminosidade quando apresentam baixo nível de carga da bateria;
- C. Microprocessador, responsável por processar as informações relevantes e gerenciar o IF;
- D. Memória, responsável por armazenar as informações processadas;
- E. Módulo de comunicação. Responsável pelo interfaceamento entre o COD e o sensor para caso de monitoramento remoto por exemplo. Vale ressaltar que nem todos IFs possuem este bloco de operação.

Os sensores IF podem existir tanto para redes aéreas quanto para redes subterrâneas. No caso das redes aéreas, podem ser instalados tanto em condutores

quanto em postes. O princípio de funcionamento para detecção da corrente de falta pode variar de acordo com a tecnologia empregada pelo fabricante dos sensores. Para IFs instalados nos condutores por exemplo, a medição é baseada na leitura de campo magnético ou campo magnético e elétrico. Se o IF detectar que o valor da corrente é maior do que o valor nominal estabelecido, ele sinaliza a falta. Outra maneira de detecção é a partir da taxa de variação da corrente que flui por seus terminais (di/dt). Geralmente os sensores IFs detectam um desbalanceamento do campo magnético das correntes de falta em relação à terra (fase-terra) ou em relação à fase (fase-fase). Podem existir também sensores com capacidade de indicar a direção da corrente de falta, aumentando ainda mais a eficiência da localização de pontos de falta. Nestes dispositivos, a direção é determinada pela comparação da tensão de operação com a corrente residual transitória.

Após a detecção da corrente de falta, os sensores podem sinalizar esta ocorrência, sendo sinalizada a ocorrência de falta permanente ou temporária, através de diversas maneiras como bandeirola, lâmpada LED, lâmpada de Gás Xeon, etc. Alguns IFs podem possuir indicação remota através de radiofrequência por exemplo. Assim, a informação de uma falta pode ser encaminhada ao COD através de um sistema de rádio de longo alcance, linha telefônica, GSM (Global System for Mobile Communications), ZigBee, entre outros.

Como ressaltam Ferreira e Sau (2016), os parâmetros para operação dos IFs devem ser bem ajustados para um funcionamento eficiente e, além disto, recomenda-se que os IFs sejam instalados juntos a dispositivos de seccionamento da rede, o que permite, na detecção do local de uma falta, a possibilidade de restabelecimento parcial da rede enquanto o reparo é feito no ramo danificado.

Ainda segundo Ferreira e Sau (2016), comumente os IFs apresentam três principais modos de operação:

- Modo normal, no caso da corrente que circula pelo sensor se apresentar dentro da faixa nominal de operação pré-estabelecida para aquele ramo do SDEE. Neste caso os sensores permanecem sem sinalização o que deixa implícito a não ocorrência de falta;
- Modo de falta, no caso da corrente que circula pelo sensor excede a faixa nominal de operação indicando a existência de uma corrente de curto-

circuito no trecho (ocorrência de falta). Neste caso os IFs piscam uma luz (LED da cor âmbar ou vermelho por exemplo) a cada período de tempo indicando a ocorrência de uma falta. Os sensores ainda podem emitir cores diferentes para faltas permanentes ou temporárias;

- Modo de reparo. Após a atuação do IF, a localização da falta e o reparo da rede, este necessita passar pelo processo de rearme, em que o sensor passará do estado de atuação (falta) para o estado de operação normal (não falta). Neste ponto diz-se que o sensor se apresenta no modo reparo e o processo pode ser realizado automaticamente por presença de tensão, por presença de corrente de carga, por tempo ou pode ser efetuado manualmente por técnicos de manutenção.

2.1.2 Fabricantes e exemplos práticos de Sensores Indicadores de falta

Nesta seção são apresentados alguns modelos de Sensores Indicadores de Falta disponíveis no mercado pelos fabricantes GridSense e SEL (Schweitzer Engineering Laboratories).

Nas figuras 2, 3 e 4 são ilustrados os modelos de Indicadores de Falta AutoRANGER SEL AR360, AutoRANGER SEL AR-OH e GridSense LineIQ típicos para aplicações em linhas aéreas.

Figura 2: IF SEL AutoRANGER AR360.



Fonte: Adaptado de Selinc (2021).

Figura 3: IF SEL AutoRANGER AR-OH.



Fonte: Adaptado de Selinc (2021).

Figura 4: IF GridSense LineIQ.



Fonte: Adaptado de GridSense™ Line IQ Data Sheet (2017).

A Figura 5 ilustra o modelo de indicador de Falta SEL autoRANGER AR-URD para linhas subterrâneas.

Figura 5: IF GridSense LineIQ.



Fonte: Adaptado de Selinc (2021).

2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA ALOCAÇÃO DE SENSORES IF EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Na modelagem matemática da função objetivo para a alocação de Sensores IF no SDEE levam-se em consideração dois parâmetros conflitantes: CENS – Custo da energia não suprida, que leva em consideração o tempo para a localização de uma falta na rede na presença ou não de Indicadores de Falta; e o CINV – Custo de Investimento, que leva em consideração o custo para alocação dos sensores na rede.

Assim, pode-se escrever a função objetivo como sendo:

$$\text{Min}F = w_1 \times \text{CENS} + w_2 \times \text{CINV} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} N &\leq N_{MAX} \\ w_1 + w_2 &= 1 \end{aligned}$$

Sendo:

w_1 e w_2 : pesos para refletir a importância de cada parâmetro de acordo com a necessidade da concessionária;

N : Número de sensores a serem instalados;

N_{MAX} : Número máximo possível de sensores a serem instalados;

O CENS da equação (1) pode ser modelado como:

$$\text{CENS} = Ce \times \sum_{z=1}^{nz} \sum_{i \in NL_z} Li \times \left(\sum_{j \in NS_z} \lambda_j \times t_j^m \right) \quad (2)$$

Sendo:

CENS : Custo da Energia Não Suprida anual (R\$/ano);

Ce : Custo da energia (R\$/kWh);

nz : Número de zonas do sistema;

NL_z : Conjunto de cargas dentro da zona z ;

NS_z : Conjunto de seções/ramos dentro da zona z ;

Li : Potência da barra i (kW);

λ_j : Taxa de falha da seção/ramo j (falhas/ano);

t_j^m : Tempo para localização e reparo da falta na seção j com sensor $m=1$ ou sem sensor $m=0$ (horas). Leva em consideração o tempo que o sensor demora para enviar sinal para o COD mais o tempo médio de reparo gasto pelas equipes de

manutenção. Assim, quando existe sensor alocado $m=1$ e quando não existe sensor alocado $m=0$.

A taxa de falha da seção j é dada por:

$$\lambda_j = \bar{\lambda} \times C_j \quad (3)$$

Sendo:

$\bar{\lambda}$: Taxa de falha média (falhas/ano-km)

C_j : Comprimento da seção j em quilômetros (km);

E o tempo para a localização da falta é escrito como:

$$t_j^0 = t_{ss} \times D_j \quad (4)$$

$$t_j^1 = t_{cs} \times D_j \quad (5)$$

Sendo:

t_{ss} : tempo sem sensor (horas/km);

t_{cs} : tempo com sensor (horas/km);

D_j : distância total em quilômetros da S/E até a seção j conectada na barra em que será ou não instalado o sensor (km);

O CINV da equação (1) pode ser modelado como:

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) \quad (6)$$

Sendo:

$CINV$: Custo de investimento total anual com a instalação dos sensores no sistema (R\$/ano);

CFI : Preço de compra de cada sensor (R\$);

$CIFI$: Custo de instalação do sensor (R\$);

$IDFI$: Tempo de vida útil média do sensor (anos);

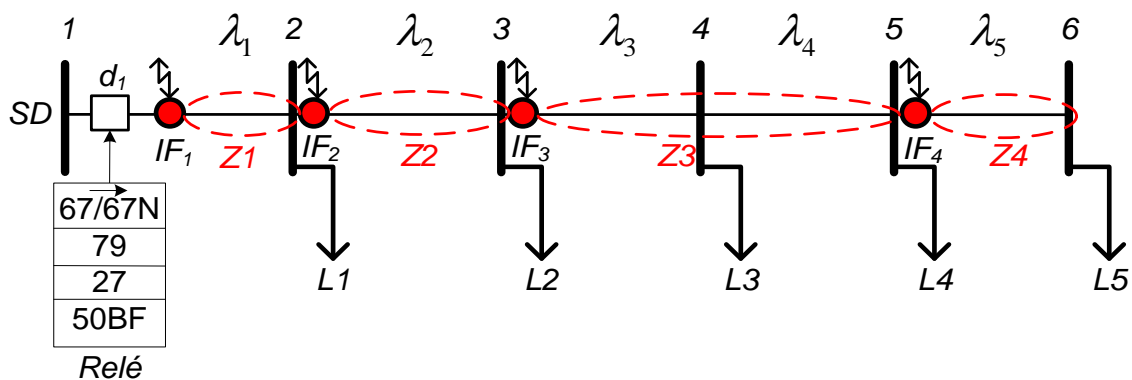
$CMFI$: Custo de manutenção do sensor (R\$/ano);

Assim é possível modelar a função objetivo do problema de alocação otimizada de sensores Indicadores de Falta através da equação (1) sendo o CENS e o CINV dados pelas equações (2) e (6), respectivamente. Além disso, de acordo com o interesse da concessionária, no cálculo da função objetivo mínima ($MinF$) pode-se priorizar uma maior confiabilidade da rede (CENS mínimo, cujo $w_1 > w_2$), ou um menor investimento em alocação de sensores (CINV mínimo, cujo $w_2 > w_1$). Caso $w_2 = w_1$, então da-se mesma prioridade aos dois parâmetros conflitantes da equação (1).

2.2.1 Estudo da alocação de sensores IF em uma rede teste de distribuição

Nesta seção, estuda-se o sistema teste de cinco barras de carga da Figura 6 para a compreensão do funcionamento dos sensores IFs na rede. Neste sistema, são alocados quatro sensores de forma aleatória como é ilustrado.

Figura 6: Sistema teste de cinco barras de carga com alocação de 4 sensores IF aleatoriamente.



Fonte: Autoria Própria.

Como pode-se observar, a presença dos sensores cria quatro zonas de proteção: a zona Z1 é delimitada entre os sensores IF1 e IF2; a zona Z2 delimitada entre os sensores IF2 e IF3; a zona Z3 entre os sensores IF3 e IF4 e a zona Z4 após o sensor IF4. Deste modo, na ocorrência de uma falta, todos os IFs a montante da zona de ocorrência devem atuar e sinalizar ou enviar um sinal de atuação (trip) ao COD indicando que a falta existe. Assim, caso a falta seja permanente, é possível enviar a equipe de manutenção e localizar a falta mais rapidamente com o auxílio dos Indicadores de Falta. Por exemplo, na ocorrência de uma falta na zona Z2, os sensores IF1 e IF2 devem atuar e os sensores IF3 e IF4 não. Isto indica que a falta deve ter ocorrido entre os sensores IF2 e IF3, ou seja, na zona Z2.

O tipo de falta pode ser identificado pela atuação da proteção da subestação (SD), sendo temporária se a proteção da SD atuar (67/67N) e após o religamento do disjuntor através da função 79 o sistema permanecer em estado normal. Ou será permanente se após as tentativas de religar o sistema o disjuntor permanecer aberto, indicando que deve haver intervenção para reparo da falta no sistema. Nesta condição as informações dos sensores atuados são de grande importância para indicar com maior precisão e menor tempo o local da falta.

É relevante observar que na zona Z3 somente no trecho de IF3 até L3 (ramo 3-4) um sensor IF3 é alocado, já no trecho de L3 até IF4 (ramo 4-5), não há presença de IF. Isto torna difícil localizar em qual dos dois ramos ocorreu a falta. Deve-se notar ainda que se a falta ocorrer no ramo 3-4 leva-se um tempo t_3^1 para localizar-se a falta, e se esta ocorrer no ramo 4-5 leva-se um tempo t_4^0 . Contudo a presença do sensor no ramo 3-4 torna $t_3^1 < t_4^0$.

Logo o problema se torna a alocação dos sensores de maneira otimizada, considerando a quantidade de carga, a taxa de falha e o tempo de reparo de cada trecho do circuito referente às zonas de proteção criadas pelos sensores de modo a minimizar o CENS com mínimo investimento em sensores (CINV).

2.2.2 Exemplo de alocação de sensores IF na rede teste de distribuição

Baseando-se na Figura 6 é possível extrair-se os seguintes dados:

$$n_z = 4$$

$$NL_1 = \{1\};$$

$$NL_2 = \{2\};$$

$$NL_3 = \{3,4\};$$

$$NL_4 = \{5\};$$

$$NS_1 = \{1\};$$

$$NS_2 = \{2\};$$

$$NS_3 = \{3,4\};$$

$$NS_4 = \{5\}.$$

O que possibilita a formulação da equação (2) do CENS como sendo:

$$\begin{aligned}
CENS &= Ce \times \left[\sum_{z=1}^4 \sum_{i \in NL_z} L_i \times \left(\sum_{\substack{j \in NS_z \\ m \in [0,1]}} \lambda_j \times t_j^m \right) \right] \\
&= Ce \\
&\times \left[\sum_{i \in NL_1} L_i \times \left(\sum_{j \in NS_1} \lambda_j \times t_j^m \right) + \sum_{i \in NL_2} L_i \times \left(\sum_{j \in NS_2} \lambda_j \times t_j^m \right) \right. \\
&\quad \left. + \sum_{i \in NL_3} L_i \times \left(\sum_{j \in NS_3} \lambda_j \times t_j^m \right) + \sum_{i \in NL_4} L_i \times \left(\sum_{j \in NS_4} \lambda_j \times t_j^m \right) \right] \\
CENS &= Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^1 + L_2 \times \lambda_2 \times t_2^1 + (L_3 + L_4) \times (\lambda_3 \times t_3^1 + \lambda_4 \times t_4^0) \\
&\quad + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1] \quad (7)
\end{aligned}$$

O cálculo do CINV é feito de maneira mais simples, bastando substituir N=4 na equação (6), considerando-se os custos para alocação e manutenção para todos os sensores Indicadores de Falta.

Com esta formulação, é possível observar que quanto maior for o número de sensores alocados no sistema teste, menor será o tempo de localização da falta de cada ramo, o que leva a uma minimização do CENS e conseqüentemente maior será a confiabilidade da rede. Por outro lado, aumenta-se o CINV com a alocação de mais sensores, o que torna os dois objetivos conflitantes. Nota-se então a necessidade da utilização de uma técnica de otimização combinatória para resolução do problema.

2.3 ALGORITMO IMUNE (AI) PARA SOLUÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO

Nesta seção apresenta-se o Algoritmo Imune, técnica de otimização combinatória que será utilizada para a solução da função objetivo dada pela equação (1). O AI é baseado na proposta de Leão, Pereira e Mantovani (2010).

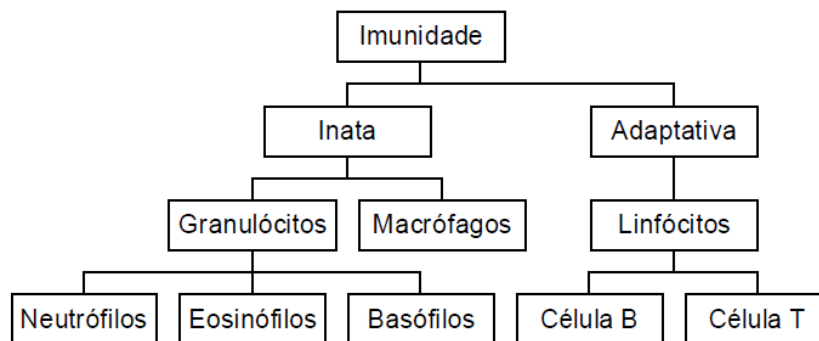
2.3.1 Sistema Imunológico e AI

A palavra imunologia é derivada do Latim *immunis* ou *immunitas* cujo significado é “isento de carga”, sendo que a carga pode referir-se a uma taxa monetária imposta ao cidadão, uma regra ou lei de restrição de direitos e liberdade, ou uma enfermidade. Indivíduos que não sucumbem a uma doença quando infectados

são ditos imunes e o status de uma resistência específica a uma determinada doença é chamado de imunidade.

O sistema imunológico representa a principal barreira do hospedeiro contra as infecções, e tem a capacidade de realizar uma resposta rápida e efetiva contra os patógenos invasores. Além disso, pode elaborar um outro tipo de resposta igualmente eficaz, porém mais lenta e duradoura. Estes dois tipos de respostas são efetuados pelos sistemas imunes inato e adaptativo, respectivamente. Ambos os sistemas (inato e adaptativo) dependem da atividade das células brancas, ou leucócitos. A imunidade inata é mediada principalmente pelos macrófagos e granulócitos, enquanto a imunidade adaptativa é mediada pelos linfócitos. Na Figura 7 é ilustrado de maneira genérica o comportamento do sistema imunológico como apresentado em De Castro (2001).

Figura 7: Sistema Imunológico.



Fonte: Adaptado de De Castro (2001).

O sistema imune inato corresponde pela primeira resposta do corpo humano a antígenos (Ag) e como o próprio nome apresenta, nasce com a pessoa. Já o sistema imune adaptativo corresponde pela resposta adquirida ao longo do tempo com a produção de anticorpos (linfócitos B e linfócitos T).

No desenvolvimento do Algoritmo Imune, direcionam-se estudos sobre as respostas do sistema imune adaptativo, onde na ocorrência de um estímulo, resulta-se em um processo conhecido como expansão clonal, que sugere a proliferação de clones dos linfócitos B com capacidade de detectar o antígeno ou agente externo.

Segundo Leão (2010), o AI baseado na seleção clonal é caracterizado por seleção, clonagem de células B com maior afinidade antigênica, maturação de afinidade e inserção de novas células B na população. No problema de alocação otimizada de sensores Indicadores de Falta, busca-se encontrar as células B capazes

de fornecer, de acordo com os interesses da concessionária de energia, as barras da rede para a alocação dos sensores que resultem no valor mínimo para a equação (1).

2.3.2 Operadores Imunes

Para a resolução do problema de forma eficiente, baseando-se na função objetivo dada em (1), propõe-se quatro operadores imunes.

2.3.2.1 Seleção

Consiste na seleção de n células B para clonagem, buscando as que apresentem os menores valores para a função objetivo. As funções objetivo referentes a cada célula B são classificadas em ordem crescente. Após a seleção, através do operador de clonagem, clonam-se as n células B de maneira proporcional à sua afinidade antigênica. Isto permite que as células B com maior afinidade sobrevivam por mais tempo na população, o que pode levar à uma possível convergência prematura. Então deve-se abordar corretamente esta propriedade para que se gere computacionalmente uma redução de tempo de execução do algoritmo. Tem-se então o operador de clonagem:

$$nc = \sum_{i=1}^n \text{round}\left(\frac{\beta \times n}{i}\right) \quad (8)$$

Sendo:

nc : quantidade total de clones gerados;

n : número de células B selecionadas para a clonagem;

β : fator de multiplicação;

$\text{round}(\cdot)$: operador que arredonda seu argumento para o valor inteiro mais próximo.

É evidente que enquanto a seleção clonal tende a reduzir a diversidade da população durante o processo dinâmico, os processos de diversificação da população de memória e substituição de células B tendem a aumentá-la. Isto demonstra que estes processos são complementares na solução do problema, onde a falta de um deles pode gerar uma solução completamente equivocada.

2.3.2.2 Hipermutação somática

É o operador responsável por realizar a maturação de afinidade. A hipermutação modifica um único atributo de cada clone gerado de “0” para “1” ou vice-

versa usando a taxa de mutação somática proporcional ao valor da função objetivo da célula B que gera o clone:

$$tm_i = 1 - \left(\frac{1}{e^{\frac{\rho \times FO_i}{FO_{max}}}} \right) \quad (9)$$

Sendo ρ a constante de amortecimento da taxa, FO_i a função objetivo calculada para a célula i e FO_{max} a função objetivo máxima levando em consideração os pesos das parcelas CINV (w_1) e CENS (w_2). Quanto maior for ρ , mais agressiva é a taxa de mutação, clonando as células B de índice i com menor valor de FO_i mais vezes.

O processo de hipermutação explora ótimos locais através de pequenas variações genéticas nas células B, e que podem resultar em células B que apresentem maior afinidade antigênica e conseqüentemente melhores soluções para o problema.

2.3.2.3 Manutenção da diversidade da população de memória

Consiste em sempre manter a diversidade entre as células que compõem a população de memória como máxima. A cada geração, através do cálculo da distância de Hamming, mede-se a similaridade entre duas células:

$$D_{(i,j)} = \sum_{i=1}^{ns} \left| (Célula B)_{(k)}^i - (Célula B)_{(k)}^j \right| \quad (10)$$

Sendo:

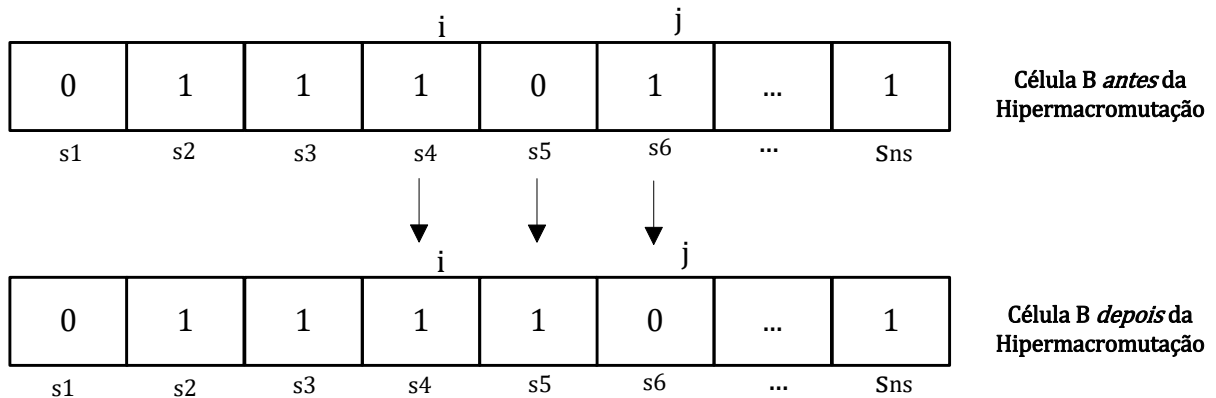
ns : quantidade total de seções do sistema de distribuição;

Se as células forem idênticas, a distância de Hamming é nula e se as células forem totalmente diferentes, a distância será ns . As células que são iguais sofrem um processo denominado hipermacromutação, o qual causa uma modificação genética mais agressiva, buscando células B um pouco diferentes daquelas presentes na população, mas nem tanto, afim de se preservar características suficientes para que permaneçam no conjunto.

Na Figura 8 é ilustrada a codificação do problema em que cada atributo da célula B representa a possibilidade de alocação ou não de sensores IFs. Caso o atributo da célula B seja 1 então a solução consiste em alocar sensor IF na seção referente ao atributo, caso contrário se o atributo é 0 então a solução consiste em não se alocar sensor IF na seção respectiva.

A hipermacromutação consiste em um processo em que se escolhe de maneira aleatória dois números inteiros $[i, j]$ tal que $(i + 1) \leq j \leq l$ sendo $l = ns$. A célula B sob hipermacromutação sofre $M = j - i + 1$ tentativas de mutação a partir de i até j . Este processo pode ser ilustrado através da Figura 8:

Figura 8: Codificação do problema e processo de hipermacromutação.



Fonte: Adaptado de Leão, Pereira e Mantovani (2010).

É importante ressaltar que para a manutenção da diversidade da população na hipermacromutação, preserva-se pelo menos uma célula B do conjunto de células iguais, de modo que as que apresentam as melhores soluções para o problema não são perdidas.

2.3.2.4 Substituição das células B

Segundo Leão, Pereira e Mantovani (2010), a substituição das células B consiste na busca de manter a diversidade de toda a população. Esta estratégia realiza a substituição das d células que produzirem uma maior função objetivo por novas células geradas aleatoriamente. Deste modo, é possível substituir-se soluções com baixo potencial por soluções com maior probabilidade de sucesso.

2.3.3 Algoritmo Imune proposto, Diagrama de Blocos e Critério de Parada

Para a implementação do AI na resolução da alocação de sensores IF é necessário definir uma codificação para o problema. Neste projeto a codificação utilizada é a apresentada na Figura 8. A célula B do AI representa uma solução possível no espaço de busca do problema. Cada bit ou posição da célula B representa a alocação ou não do sensor na seção/ramo. Portanto a célula B possui dimensão igual ao número máximo de seções do sistema.

Para cada solução possível, deve-se calcular a função objetivo dada em (1). Neste caso específico, a etapa de maior custo computacional consiste no cálculo da parcela referente ao CENS. Esse fato pode ser constatado baseado na equação (7) desenvolvida anteriormente para o sistema de cinco barras de carga com quatro sensores IFs.

Assim, para cada solução possível do problema é necessário calcular o valor da função objetivo utilizando os tempos de localização das faltas calculados para cada seção do sistema.

Para resolução de redes com alta complexidade torna-se inviável o cálculo manual da função objetivo, o que leva à resolução do problema através do AI como uma ótima saída. Apresenta-se então o diagrama de blocos que detalha o funcionamento do AI conforme a Figura 9.

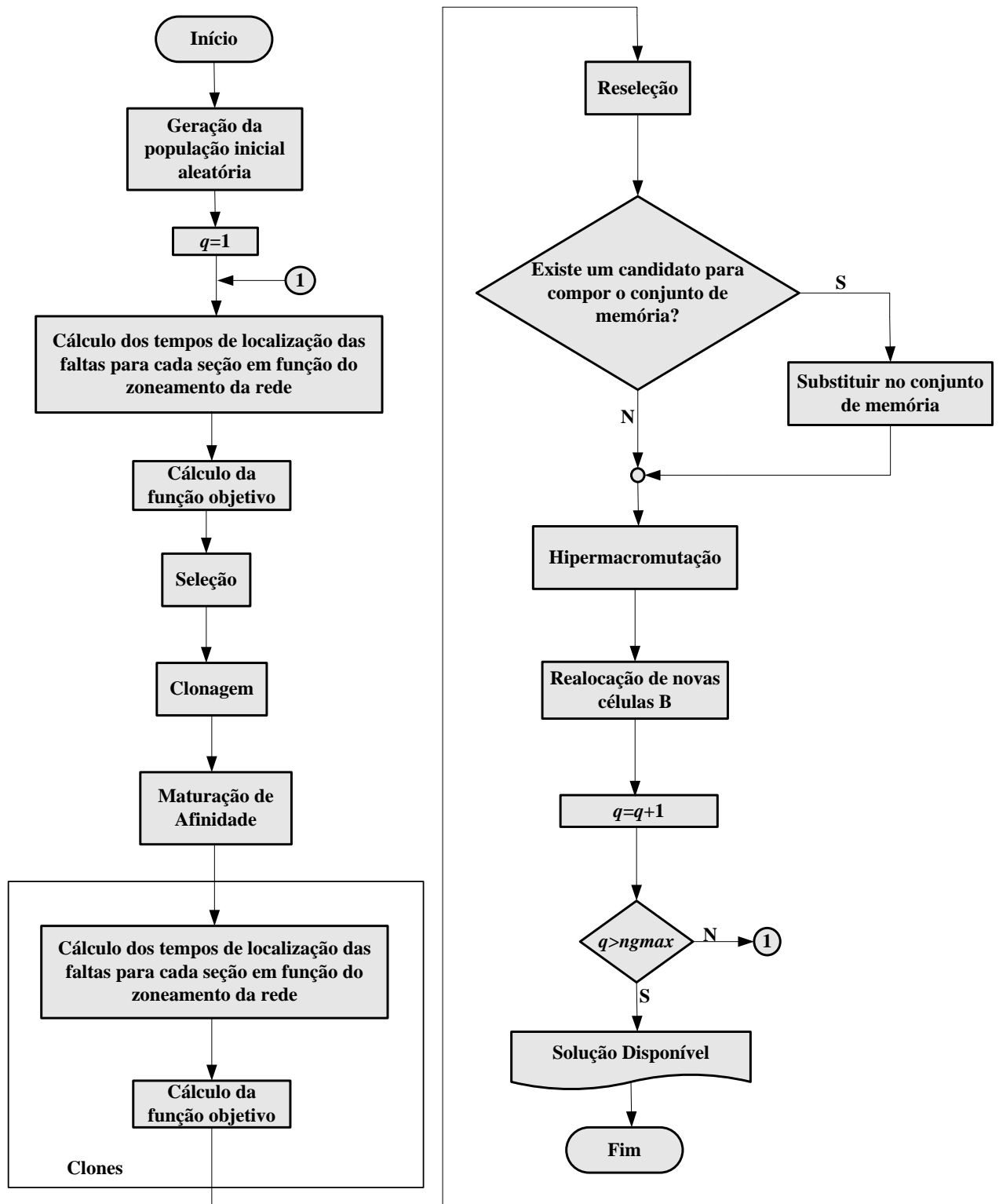
O diagrama descreve o funcionamento do AI que foi implementado na solução do problema de alocação otimizada de sensores indicadores de falta. Inicialmente gera-se aleatoriamente uma população de células B e a partir desta, calcula-se os tempos de localização das faltas de acordo com o zoneamento da rede através das equações (4) e (5). Com a equação (1), calcula-se a função objetivo para todas as células B da população e elas são classificadas em ordem crescente. Então se selecionam as n células que resultaram nas menores funções objetivo e realiza-se o processo de clonagem através da equação (8) gerando-se uma população de nc clones maturados.

Calcula-se todos os tempos de localização das faltas de acordo com o zoneamento da rede através das equações (4) e (5) para a nova população de clones maturados e conseqüentemente as funções objetivo através de (1) colocando-as em ordem crescente. Desta população de clones se seleciona o de maior afinidade para ser um candidato a entrar na população de m células de memória. Se a afinidade deste clone for maior do que a afinidade da pior célula B da população, então substitui-se a célula pelo clone na população de memória. Eliminam-se as células B de mesma configuração dentro do conjunto de células de memória através do processo de hipermutação conforme exemplificado pela Figura 8. Substitui-se então as d células por novas células B considerando o restante da população através da estratégia de substituição das células B.

Por fim, se o número de gerações q é igual a $ngmax$ (número máximo de gerações) finaliza-se o algoritmo. Assim a solução é fornecida pela célula B com

menor função objetivo dentre aquelas da população de memória. Caso contrário, retorna-se ao cálculo dos tempos de localização das faltas de acordo com o zoneamento da rede e realiza-se novamente o procedimento citado anteriormente.

Figura 9: Diagrama de Blocos do AI.



Fonte: Adaptado de Leão, Pereira e Mantovani (2010).

Nota-se que o AI apresenta uma eficiente solução para o problema em estudo tendo em vista que na sua solução sempre se busca manter a diversidade das células B elevada e através do mecanismo da hipermacromutação é possível realizar mutações buscando o aumento da diversidade, mas também se preserva as células com boas soluções para o problema.

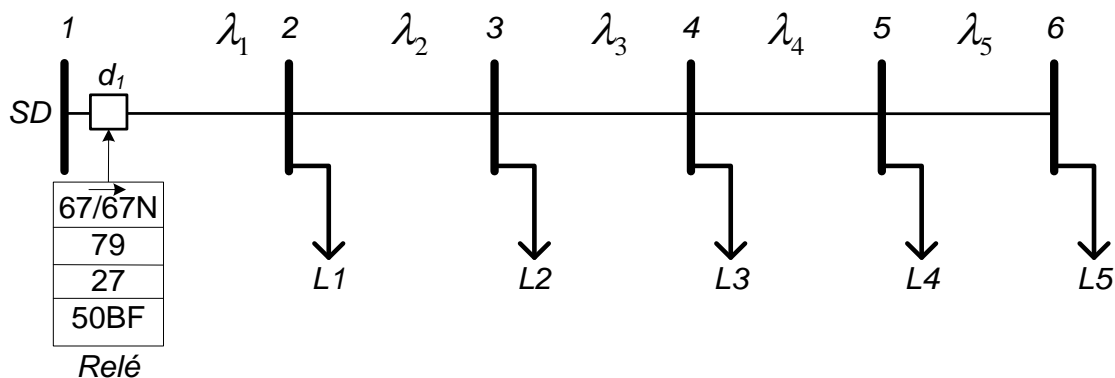
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTUDO DA ALOCAÇÃO DE IFS PARA O SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS DE CARGA

Nesta seção, utilizando o sistema teste da Figura 10, foram realizados estudos de 8 alocações de sensores Indicadores de Falta na rede afim de calcular-se, para cada caso de alocação diferente, a função objetivo (1), que descreve o problema.

Desta maneira, foi possível estudar e compreender como o problema de otimização se comporta em função das quantidades e localizações em que os IFs são alocados.

Figura 10: SDEE teste utilizado para alocação dos Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS DADOS DE ENTRADA

Para o cálculo de (1) considera-se os seguintes dados:

$$C_e = R\$0,51041/kWh;$$

$$CFI = R\$800,00;$$

$$CIFI = R\$170,00;$$

$$IDFI = 8 \text{ anos};$$

$$CMFI = R\$80,00/ano;$$

$$t_{ss} = 45 \text{ min/km} = 0,75 \text{ horas/km} \text{ (tempo médio sem sensor)};$$

$$t_{cs} = 5 \text{ min/km} = 0,0833 \text{ horas/km} \text{ (tempo médio com sensor)}.$$

Os valores das potências de cada barra como sendo:

$$L1 = 100kW;$$

$$L2 = 100kW;$$

$$L3 = 200kW;$$

$$L4 = 300kW;$$

$$L5 = 300kW.$$

Considerou-se também que:

$$\text{Taxa de falha média } \lambda = 0,149 \text{ falhas/ano-km};$$

$$\text{Comprimento de cada trecho } C_j = 10km.$$

Portanto, através da equação (3), calculou-se a taxa de falha de cada seção:

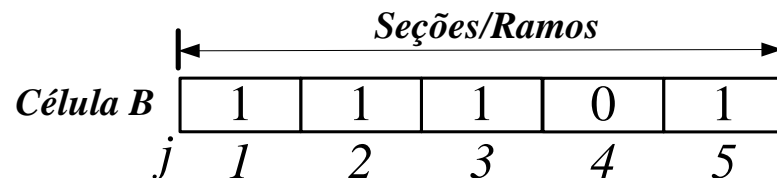
$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 1,49 \text{ falhas/ano}.$$

Abaixo são apresentados de forma detalhada somente os cálculos da primeira alocação e posteriormente a discussão sobre os resultados obtidos. O restante dos cálculos para as demais alocações está disponível no Apêndice A.

3.2.1 Primeira alocação realizada

Na primeira configuração apresentada pela Figura 6 foram alocados 4 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 11.

Figura 11: Codificação para o AI – solução para o caso da Figura 6.



Fonte: Autoria Própria.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.2.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^1 = \frac{0,0833h}{km} \times 20km = 1,6666h$$

$$t_3^1 = \frac{0,0833h}{km} \times 30km = 2,4999h$$

$$t_4^0 = \frac{0,75h}{km} \times 40km = 30$$

$$t_5^1 = \frac{0,0833h}{km} \times 50km = 4,1667h$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^1 + L_2 \times \lambda_2 \times t_2^1 + (L_3 + L_4) \times (\lambda_3 \times t_3^1 + \lambda_4 \times t_4^0) + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041 \times [100 \times 1,49 \times 0,8333 + 100 \times 1,49 \times 1,6667 + (200 + 300) \times (1,49 \times 2,4999 + 1,49 \times 30) + 300 \times 1,49 \times 4,1667]$$

$$CENS = \mathbf{13499,07R\$/ano}$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) = \mathbf{805R\$/ano}$$

3.3 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DAS ALOCAÇÕES

Com os valores do CENS e do CINV calculados para cada um dos oito casos distintos de alocações de sensores IF no sistema teste, foi possível calcular a função objetivo dada por (1) levando em consideração diferentes pesos para cada termo da equação (w_1 e w_2), o que resultou nos dados expostos na Tabela 1.

Tabela 1: Valores da função objetivo para cada uma das oito soluções estudadas.

SOLUÇÃO	CODIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO	CENS (R\$/ano)	CINV (R\$/ano)	F (R\$/ano)		
				$w1=0,2$	$w1=0,8$	$w1=0,5$
				$w2=0,8$	$w2=0,2$	$w2=0,5$
1ª	1-1-1-0-1	13499,07	805	3343,814	10960,26	7152,035
2ª	1-0-1-1-1	4499,689	805	1543,938	3760,751	2652,345
3ª	0-1-1-1-1	2788,54	805	1201,708	2391,832	1796,77
4ª	1-1-1-1-1	2281,532	1006,25	1261,306	2026,476	1643,891
5ª	1-1-0-1-1	7288,228	805	2101,646	5991,582	4046,614
6ª	1-1-1-0-0	42778,74	603,75	9038,748	34343,74	21691,25
7ª	1-0-0-0-1	37328,4	402,5	7787,68	29943,22	18865,45
8ª	0-0-0-0-0	85557,48	0	17111,5	68445,98	42778,74

Fonte: Autoria Própria.

Através da Tabela 1, nota-se que as alocações 3 e 4 apresentam CENS muito mais baixos do que as outras soluções, levando o tempo de reparo médio gasto pelas equipes de manutenção aos menores valores dentro do universo em estudo. Por outro lado, estas soluções apresentam os dois maiores valores de CINV devido a um maior número de Indicadores de Falta alocados na rede. Todavia o CINV apresenta pouca

influência no custo operacional da rede em comparação ao CENS quando se aloca poucos sensores na rede, o que potencializa a necessidade de uso dos sensores IF na rede. Quando deu-se maior relevância ao CENS e menor ao CINV ($w_1 = 0,8$ e $w_2 = 0,2$), ou quando ponderou-se igualmente os parâmetros da função objetivo ($w_1 = 0,5$ e $w_2 = 0,5$), notou-se que a melhor opção foi apresentada pela 4ª solução, em que se alocou sensores em todas as barras da rede, com $MinF = 2026,476R\$/ano$ e $MinF = 1643,891R\$/ano$, respectivamente.

Por outro lado, quando deu-se maior relevância ao CINV e menor ao CENS ($w_1 = 0,2$ e $w_2 = 0,8$), verifica-se que a 3ª solução apresenta o menor valor da função objetivo onde $MinF = 1201,708R\$/ano$, o que é justificado pelo fato de neste caso os sensores localizarem-se nas barras de maior potência, mas ao mesmo tempo tem-se somente 4 sensores alocados (1 a menos do que a 5ª solução), trazendo assim, o maior custo-benefício possível à concessionária.

Nota-se que na 1ª, 2ª, 3ª e 5ª soluções foram alocados 4 sensores de modos diferentes. Na 1ª solução o CENS foi relativamente elevado comparado às outras três porque não há sensor alocado em uma das barras de maior potência (300kW) e também se deve ao fato de que a barra sem sensor é a mais distante dentre os 5 casos, o que leva os tempos de encontrar a falta e de reparo médio a maiores valores do que nas outras soluções, devido à localização da falta estar mais distante da subestação. As soluções 2 e 5 apresentam um CENS maior em relação a 3ª solução, pois nestes casos as barras em que não se alocaram sensores se apresentam mais distantes da subestação em relação ao ponto da 3ª solução, levando a um aumento nos tempos para encontrar a falta e para realizar o reparo que conseqüentemente eleva o CENS.

Quando não são alocados sensores a função objetivo tem um valor máximo de CENS e um valor mínimo no CINV, o que gera inviabilidade desta solução para a concessionária devido ao elevadíssimo CENS comparado a todas as outras oito soluções.

Analisando-se as melhores soluções para cada peso da função objetivo, e considerando somente as oito soluções no espaço de busca, a 3ª solução seria a melhor solução quando se deu um maior peso ao CINV. Por outro lado, a 4ª solução seria a melhor para os outros pesos da função objetivo. Caberia a concessionária a escolha da solução mais conveniente, considerando maior ênfase na redução do

CENS ou no menor investimento em tecnologia de monitoramento da rede de acordo com suas preferências e regras.

Deve-se notar que o problema de alocação no sistema teste de 5 barras de carga apresenta um total de $2^{N_{max}} = 2^5 = 32$ soluções possíveis no espaço de busca do problema. Este fato justifica a utilização de técnicas de solução através do Algoritmo Imune (AI), o que foi estudado nos etapa final do projeto.

3.4 ESTUDO DA ALOCAÇÃO DE IFs PARA O SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS DE CARGA COM COMPRIMENTOS DIFERENTES DAS SEÇÕES

Para este estudo são considerados os seguintes dados:

$$C_e = R\$0,51041/kWh;$$

$$CFI = R\$800,00;$$

$$CIFI = R\$170,00;$$

$$IDFI = 8 \text{ anos};$$

$$CMFI = R\$80,00/ano;$$

$$t_{ss} = 45 \text{ min/km} = 0,75 \text{ horas/km} \text{ (tempo médio sem sensor);}$$

$$t_{cs} = 5 \text{ min/km} = 0,0833 \text{ horas/km} \text{ (tempo médio com sensor).}$$

Os valores das potências de cada barra como sendo:

$$L1 = 100kW;$$

$$L2 = 100kW;$$

$$L3 = 200kW;$$

$$L4 = 300kW;$$

$$L5 = 300kW.$$

Considerou-se também que:

$$\text{Taxa de falha do ramo médio } \lambda = 0,149 \text{ falhas/ano-km};$$

O comprimento de cada trecho C_j como:

$$C_1 = 10km;$$

$$C_2 = 15km;$$

$$C_3 = 20km;$$

$$C_4 = 25km;$$

$$C_5 = 30km.$$

Portanto, através da equação (3), calculou-se a taxa de falha de cada seção:

$$\lambda_1 = 1,49 \text{ falhas/ano};$$

$$\lambda_2 = 2,235 \text{ falhas/ano};$$

$$\lambda_3 = 2,98 \text{ falhas/ano};$$

$$\lambda_4 = 3,725 \text{ falhas/ano};$$

$$\lambda_5 = 4,47 \text{ falhas/ano}.$$

Do mesmo modo que anteriormente, abaixo são apresentados de forma detalhada somente os cálculos da primeira alocação e posteriormente a discussão sobre os resultados obtidos. O restante dos cálculos para as demais alocações está disponível no Apêndice A.

3.4.1 Primeira Alocação Realizada

Na primeira configuração apresentada pela Figura 6 foram alocados 4 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 11.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.4.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^1 = \frac{0,08333h}{km} \times 25km = 2,0833h$$

$$t_3^1 = \frac{0,08333h}{km} \times 45km = 3,7499h$$

$$t_4^0 = \frac{0,75h}{km} \times 70km = 52,5h$$

$$t_5^1 = \frac{0,08333h}{km} \times 100km = 8,3333h$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^1 = \frac{0,08333h}{km} \times 25km = 2,0833h$$

$$CENS = Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^1 + L_2 \times \lambda_2 \times t_2^1 + (L_3 + L_4) \times (\lambda_3 \times t_3^1 + \lambda_4 \times t_4^0) + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$\begin{aligned}
 CENS &= 0,51041 \times [100 \times 1,49 \times 0,8333 + 100 \times 2,235 \times 2,0833 \\
 &\quad + (200 + 300) \times (2,98 \times 3,7499 + 3,725 \times 52,5) \\
 &\quad + 300 \times 4,47 \times 8,3333]
 \end{aligned}$$

$$CENS = 58765,28R\$/ano$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$\begin{aligned}
 CINV &= N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) \\
 &= 805R\$/ano
 \end{aligned}$$

3.5 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DAS ALOCAÇÕES

Com os valores do CENS e do CINV calculados para cada um dos oito casos distintos de alocações de sensores IF no sistema teste, foi possível calcular a função objetivo dada por (1) levando em consideração diferentes pesos para cada termo da equação (w_1 e w_2), o que resultou nos dados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Valores da função objetivo para cada uma das oito soluções estudadas variando-se o comprimento das seções.

SOLUÇÃO	CODIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO	CENS (R\$/ano)	CINV (R\$/ano)	F (R\$/ano)		
				$w1=0,2$	$w1=0,8$	$w1=0,5$
				$w2=0,8$	$w2=0,2$	$w2=0,5$
1ª	1-1-1-0-1	58765,28	805	12397,06	47173,22	29785,14
2ª	1-0-1-1-1	14576,42	805	3559,284	11822,14	7690,71
3ª	0-1-1-1-1	10979,83	805	2839,966	8944,864	5892,415
4ª	1-1-1-1-1	10472,83	1006,25	2899,566	8579,514	5739,54
5ª	1-1-0-1-1	25207,73	805	5685,546	20327,18	13006,37
6ª	1-1-1-0-0	221609,7	603,75	44804,94	177408,5	111106,7
7ª	1-0-0-0-1	126926,1	402,5	25707,22	101621,4	63664,3
8ª	0-0-0-0-0	349359,7	0	69871,94	279487,8	174679,9

Fonte: Autoria Própria.

Aumentando-se o comprimento do trecho de cada seção foi observado que o CENS também aumentou, o que implica que quanto maiores forem os trechos e a rede, maior será o Custo da Energia Não Suprida. Nota-se também que ao aumentar-se o tamanho das seções, as soluções com melhor desempenho permaneceram as mesmas (3ª e 4ª soluções), o que implica que, dentro destas oito tentativas de alocação, para esta configuração, o tamanho da seção torna-se pouco relevante na determinação dos pontos de alocação de sensores Indicadores de Falta na rede. Notou-se também que neste caso, a taxa de falhas das seções difere, o que implica, através da análise da tabela, que quanto maior for a taxa de falha da seção maior será

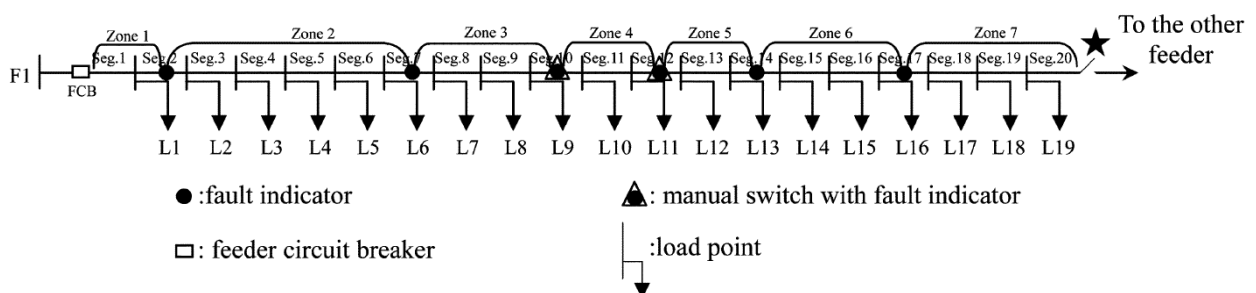
o CENS da rede no caso de não alocação de sensores IF. Ressalta-se que se a rede apresentasse outra configuração seria necessário novamente o cálculo das soluções o que provavelmente implicaria em conclusões distintas.

Fazendo uma analogia com a realidade e os dados obtidos através das tabelas dos itens 3.3. e 3.5, pode-se dizer que o primeiro caso (Tabela 1) representa satisfatoriamente uma rede urbana, com grande concentração de cargas em ramos com pequeno comprimento. Já no segundo caso (Tabela 2) representa-se satisfatoriamente uma rede rural, em que se alocam cargas distantes, com ramos de grande comprimento. Contudo, ambos os casos proporcionam um aumento do CENS, seja pela elevada concentração de cargas na rede ou pelo elevado comprimento da rede. Portanto, a alocação de sensores Indicadores de Falta torna-se imprescindível para que a concessionária consiga reduzir o custo total de operação da rede.

3.6 TESTES E RESULTADOS PARA O SISTEMA DE 19 BARRAS DE CARGA EMPREGANDO O AI

Neste capítulo são apresentados os testes experimentais realizados utilizando o método implementado e o sistema teste ilustrado na Figura 12.

Figura 12: Sistema Teste de 20 barras de carga.



Fonte: Adaptado de Ho, Lee e Lin (2011).

3.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS DADOS DE ENTRADA

O sistema teste trata-se de um sistema com 19 barras de carga e 20 seções/ramos. Na Figura 12 é ilustrada uma possível solução para alocação otimizada de IFs, sendo alocados 6 sensores.

Conforme a Tabela III da referência Ho, Lee e Lin (2011), para a realização das simulações considera-se o tempo médio sem sensor (t_{ss}) igual a $20min/km$ ($0,3333horas/km$) e o tempo com sensor (t_{cs}) igual a $5min/km$ ($0,0833horas/km$). O

tempo utilizado para definir os tempos de reparo de cada ramo do sistema considera-se a distância do ramo a subestação (local de partida das equipes de manutenção). Quanto maior a distância da seção em relação à subestação, maior será o tempo de reparo desta seção.

Baseando-se no valor da Tabela III de Ho, Lee e Lin (2011), o alimentador possui taxa de falha média ($\bar{\lambda}$) por ramo igual a *0,149 falhas/ano-km*. A partir desses tempos podem-se definir os tempos totais para localização da falta para cada seção/ramo j com sensor alocado e sem sensor alocado. Considerou-se cada comprimento de trecho (C_j) igual a 1km, portanto através da equação (3) obteve-se a taxa de falha de cada seção:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_{20} = 0,149 \text{ falhas/ano}$$

E o valor de cada carga pode ser obtido da Tabela IV da referência Ho, Lee e Lin (2011) como sendo:

$$L1 = 70kW;$$

$$L2 = 143kW;$$

$$L3 = 168kW;$$

$$L4 = 113kW;$$

$$L5 = 100kW.$$

$$L6 = 265kW;$$

$$L7 = 251kW;$$

$$L8 = 331kW;$$

$$L9 = 188kW;$$

$$L10 = 1205kW.$$

$$L11 = 210kW;$$

$$L12 = 989kW;$$

$$L13 = 43kW;$$

$$L14 = 96kW;$$

$$L15 = 129kW.$$

$$L16 = 44kW;$$

$$L17 = 80kW;$$

$$L18 = 75kW;$$

$$L19 = 115kW.$$

Considera-se ainda os seguintes dados de entrada:

$$C_e = R\$0,51041/kWh;$$

$$CFI = R\$800,00;$$

$$CIFI = R\$170,00;$$

$$IDFI = 8 \text{ anos};$$

$$CMFI = R\$80,00/ano.$$

3.8 SIMULAÇÕES

O método é implementado utilizando o software Visual Studio 2010 em que a linguagem de programação empregada é o C++.

São realizados diversos testes considerando três pares de pesos diferentes (w_1 e w_2) da função objetivo dada na equação (1), sendo:

$$w_1 = 0,2 \text{ e } w_2 = 0,8;$$

$$w_1 = 0,5 \text{ e } w_2 = 0,5;$$

$$w_1 = 0,8 \text{ e } w_2 = 0,2.$$

A ideia dos testes é verificar a dependência da qualidade das soluções em relação a maior importância para minimização do custo da energia não suprida (CENS) quando se escolhe $w_1 > w_2$ ou a minimização do custo de investimento em sensores IFs (CINV) quando se escolhe $w_2 > w_1$, ou quando se consideram ambos os termos de mesma prioridade $w_1 = w_2$ considerando o sistema teste de 19 barras de carga da Figura 12.

Outra importante análise é a comparação dos resultados obtidos através do AI e do AGA implementado por Ogura e Leão (2017). Esta comparação é realizada tanto para os valores das FOs obtidas quanto para os tempos computacionais gastos por cada um dos dois algoritmos.

3.8.1 Pesos $w_1=0,2$ e $w_2=0,8$

Para $w_1 = 0,2$ e $w_2 = 0,8$ são ilustradas na Tabela 3 as três melhores soluções apresentadas pelo AI.

Tabela 3: Três melhores alocações para os pesos $w_1=0,2$ e $w_2=0,8$ para o AI.

Solução	Quantidade de sensores	Localização dos sensores nas barras	CENS(R\$)	CINV(R\$)	F (R\$)
					$w_1=0,2$
					$w_2=0,8$
1 ^a	5	7 ^a ; 10 ^a ; 11 ^a ; 13 ^a ; 17 ^a	2011,95	1.006,25	1.207,39
2 ^a	4	8 ^a ; 11 ^a ; 13 ^a ; 17 ^a	2817,97	805	1.207,59
3 ^a	5	7 ^a ; 10 ^a ; 11 ^a ; 13 ^a ; 16 ^a	2028,77	1.006,25	1.210,75

Fonte: Própria Autoria.

Na Figura 13, os valores em destaque na cor cinza indicam os parâmetros de entrada do AI utilizados para a solução da função objetivo.

Figura 13: Resultado impresso pelo AI para os pesos $w_1=0,2$ e $w_2=0,8$ para a melhor solução.

Algoritmo Imune (AI)	
Dados da Simulação do Algoritmo:	

Função objetivo ótima.....	1207.390120
Anticorpos (na).....	50
Gerações (ngmax).....	70
Beta (B).....	0.75
Número de Bits mutados (nm).....	5
Parâmetro de controle de amortecimento (p)..:	1000
Constante de Afinidade w_1	0.200000
Constante de Afinidade w_2	0.800000
Tempo de Processamento (segundos).....	0.035
Anticorpos renovados pela medula óssea (r)....:	5
Anticorpos de Memória (40.00%) (m).....	20
Anticorpos Clonados (n melhores).....	30
Anticorpo (1º) Clones.....	37 (27.41%)
Anticorpo (2º) Clones.....	18 (13.33%)
Anticorpo (3º) Clones.....	12 (8.89%)
Anticorpo (4º) Clones.....	9 (6.67%)
Anticorpo (5º) Clones.....	7 (5.19%)
Anticorpo (6º) Clones.....	6 (4.44%)
Anticorpo (7º) Clones.....	5 (3.70%)
Anticorpo (8º) Clones.....	4 (2.96%)
Anticorpo (9º) Clones.....	4 (2.96%)
Anticorpo (10º) Clones.....	3 (2.22%)
Anticorpo (11º) Clones.....	3 (2.22%)
Anticorpo (12º) Clones.....	3 (2.22%)
Anticorpo (13º) Clones.....	2 (1.48%)
Anticorpo (14º) Clones.....	2 (1.48%)
Anticorpo (15º) Clones.....	2 (1.48%)
Anticorpo (16º) Clones.....	2 (1.48%)
Anticorpo (17º) Clones.....	2 (1.48%)
Anticorpo (18º) Clones.....	2 (1.48%)
Anticorpo (19º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (20º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (21º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (22º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (23º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (24º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (25º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (26º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (27º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (28º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (29º) Clones.....	1 (0.74%)
Anticorpo (30º) Clones.....	1 (0.74%)

Total de Clones.....	135 (100%)

Fonte: Própria Autoria.

De acordo com a Tabela 3, a 1ª solução do algoritmo encontrada para os pesos $w_1=0,2$ e $w_2=0,8$ é a melhor obtida através de testes exaustivos do algoritmo. Na Tabela 4 são apresentados os valores das funções objetivo calculadas para cada ciclo geracional do AI considerando a simulação para melhor solução.

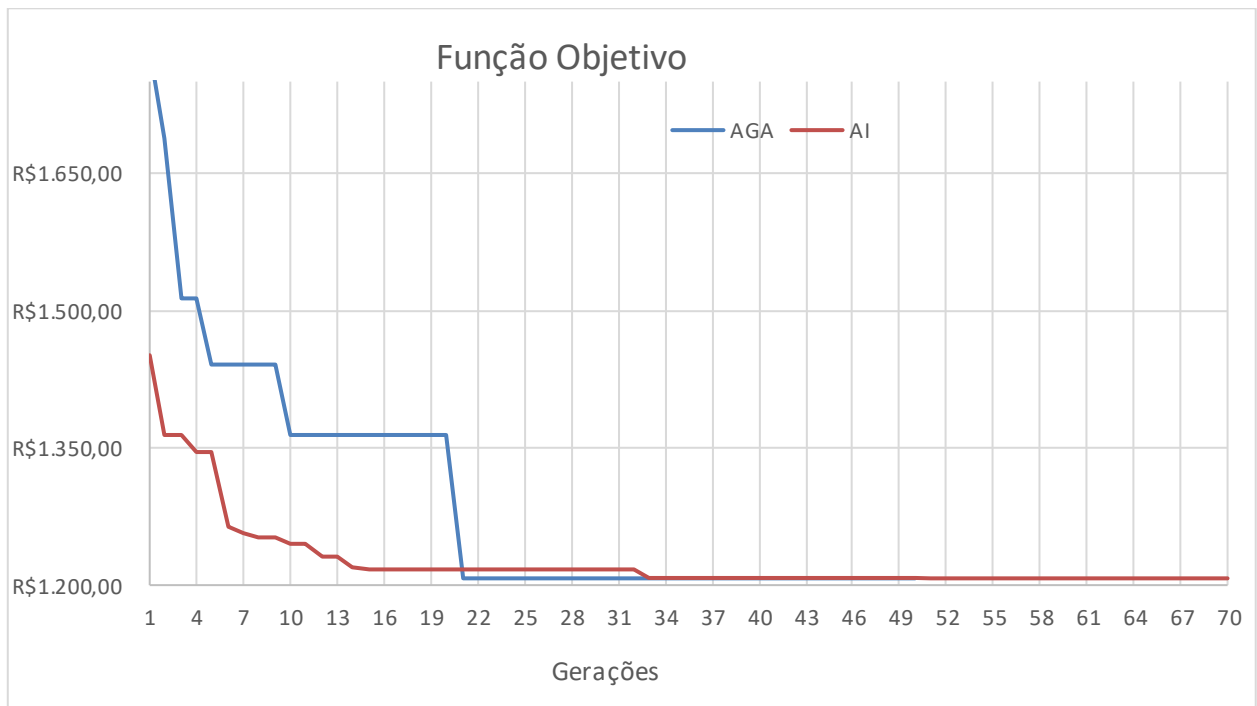
Tabela 4: FO em função da geração ng para os pesos $w_1=0,2$ e $w_2=0,8$.

Geração (ng)	FO
1	R\$ 1.451,0895
2	R\$ 1.364,1883
3	R\$ 1.364,1883
4 - 5	R\$ 1.344,8842
6	R\$ 1.263,3385
7	R\$ 1.257,8272
8 - 9	R\$ 1.251,7358
10 - 11	R\$ 1.245,8024
12 - 13	R\$ 1.230,0064
14	R\$ 1.219,3544
15 - 32	R\$ 1.215,9904
33 - 50	R\$ 1.207,5931
51 - 70	R\$ 1.207,3901

Fonte: Própria Autoria.

A partir da Tabela 4 nota-se que o AI encontrou a melhor solução na 51ª geração a qual se manteve como a melhor solução até o final das gerações. Na Figura 14 são ilustrados os gráficos do comportamento tanto do AI quanto do AGA, o que possibilita uma melhor compreensão do processo de evolução.

Figura 14: Gráfico do comportamento da função objetivo em relação ao número de gerações para o AI e o AGA quando $w_1 = 0,2$ e $w_2 = 0,8$.



Fonte: Autoria própria.

A partir da Tabela 4 é possível verificar que na 51ª geração do AI o algoritmo converge para a solução mínima, pois a melhor função objetivo (R\$ 1207,39) é obtida para quando $ng = 51$. Já para o AGA, este mesmo valor da função objetivo é atingido quando $ng = 21$ (Figura 14). Isto indica que, quando se prioriza a parcela do CINV, o AI é um algoritmo que necessita de um maior número de iterações para atingir a solução mínima para o mesmo problema que o AGA. Isto ocorre devido principalmente ao fato de que o AI realiza processos de clonagem e substituição de um único clone na população de memória por iteração no cálculo do CENS. Ou seja, a cada iteração, se compara somente o melhor clone com a pior célula B de memória e, se a FO do clone for menor do que a FO da célula B, este clone substitui esta célula na população. Portanto, este processo acaba limitando o AI e consequentemente fazendo com que o algoritmo necessite de mais iterações do que o AGA.

3.8.2 Pesos $w_1=0,5$ e $w_2=0,5$

Para os pesos $w_1=w_2=0,5$, foram obtidas as 3 melhores soluções apresentadas pelo AI, apresentadas na Tabela 5. Essas soluções são obtidas considerando os parâmetros da Figura 15 (destacados em cinza).

Tabela 5: Três melhores alocações para os pesos $w_1=0,5$ e $w_2=0,5$ para o AI.

Solução	Quantidade de sensores	Localização dos sensores nas barras	CENS (R\$)	CINV (R\$)	F (R\$)
					w1=0,5
					w2=0,5
1 ^a	8	6 ^a ; 8 ^a ; 10 ^a ; 11 ^a ; 12 ^a ; 13 ^a ; 16 ^a ; 18 ^a	1.046,31	1.610,00	1.328,16
2 ^a	8	5 ^a ; 8 ^a ; 10 ^a ; 11 ^a ; 12 ^a ; 13 ^a ; 16 ^a ; 18 ^a	1.057,01	1.610,00	1.333,50
3 ^a	8	6 ^a ; 8 ^a ; 10 ^a ; 11 ^a ; 12 ^a ; 13 ^a ; 15 ^a ; 18 ^a	1.057,68	1.610,00	1.333,84

Fonte: Própria Autoria.

Figura 15: Resultado impresso pelo AI para os pesos $w_1=0,5$ e $w_2=0,5$ para a melhor solução.

Algoritmo Imune (AI)	
Dados da Simulação do Algoritmo:	

Função objetivo ótima.....	1328.155448
Anticorpos (na).....	50
Gerações (ngmax).....	30
Beta (B).....	1.39
Número de Bits mutados (nm).....	2
Parâmetro de controle de amortecimento (p)..:	1000
Constante de Afinidade w1.....	0.500000
Constante de Afinidade w2.....	0.500000
Tempo de Processamento (segundos).....	0.046
Anticorpos renovados pela medula óssea (r)....:	5
Anticorpos de Memória (40.00%) (m).....	20
Anticorpos Clonados (n melhores).....	20
Anticorpo (1 ^o) Clones.....	69 (28.99%)
Anticorpo (2 ^o) Clones.....	34 (14.29%)
Anticorpo (3 ^o) Clones.....	23 (9.66%)
Anticorpo (4 ^o) Clones.....	17 (7.14%)
Anticorpo (5 ^o) Clones.....	13 (5.46%)
Anticorpo (6 ^o) Clones.....	11 (4.62%)
Anticorpo (7 ^o) Clones.....	9 (3.78%)
Anticorpo (8 ^o) Clones.....	8 (3.36%)
Anticorpo (9 ^o) Clones.....	7 (2.94%)
Anticorpo (10 ^o) Clones.....	6 (2.52%)
Anticorpo (11 ^o) Clones.....	6 (2.52%)
Anticorpo (12 ^o) Clones.....	5 (2.10%)
Anticorpo (13 ^o) Clones.....	5 (2.10%)
Anticorpo (14 ^o) Clones.....	4 (1.68%)
Anticorpo (15 ^o) Clones.....	4 (1.68%)
Anticorpo (16 ^o) Clones.....	4 (1.68%)
Anticorpo (17 ^o) Clones.....	4 (1.68%)
Anticorpo (18 ^o) Clones.....	3 (1.26%)
Anticorpo (19 ^o) Clones.....	3 (1.26%)
Anticorpo (20 ^o) Clones.....	3 (1.26%)

Total de Clones.....	238 (100%)

Fonte: Própria Autoria.

De acordo com a Tabela 5 a 1ª solução do algoritmo encontrada para os pesos de $w1=w2=0,5$ é a melhor obtida através de testes exaustivos do AI. Na Tabela 6 são apresentados os valores das funções objetivo calculadas para cada ciclo geracional do AI considerando a simulação para a melhor solução.

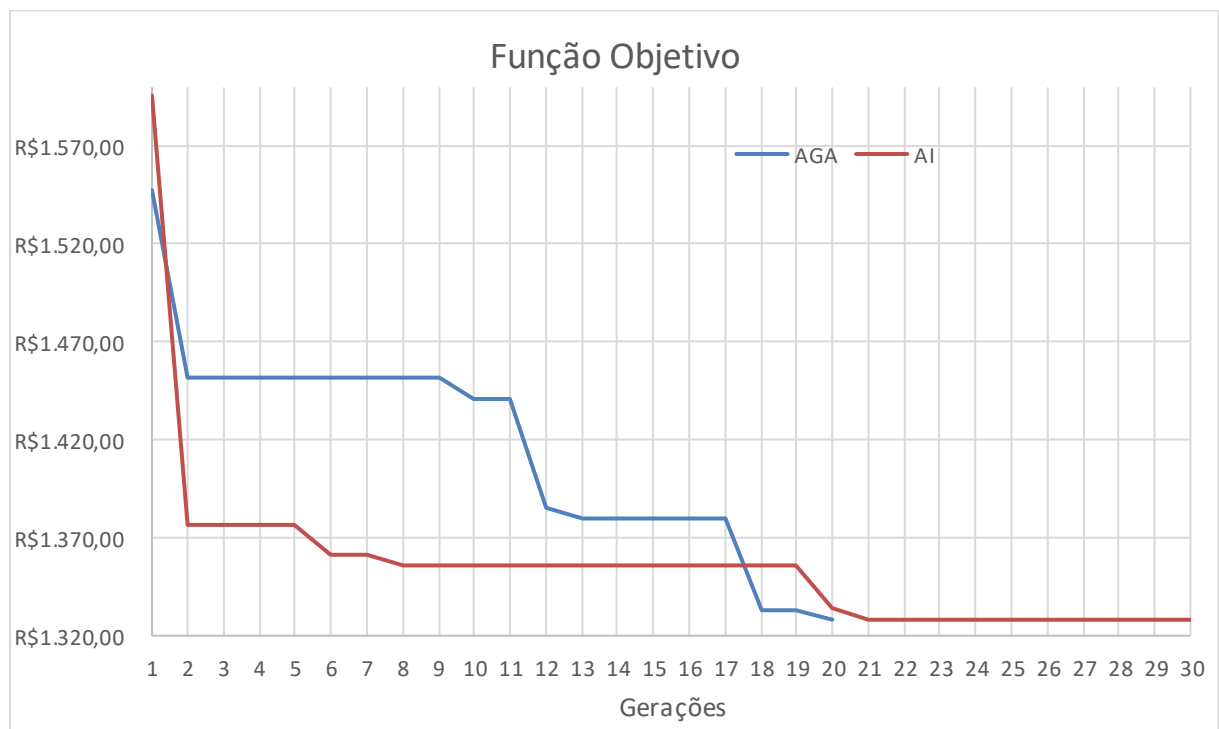
Tabela 6: Dados da Melhor Solução para os pesos $w1=0,5$ e $w2=0,5$.

Geração (ng)	FO
1	R\$ 1.595,8708
2 - 5	R\$ 1.376,7964
6 - 7	R\$ 1.361,1013
8 - 19	R\$ 1.355,7524
20	R\$ 1.333,8403
21 - 30	R\$ 1.328,1554

Fonte: Própria Autoria.

A partir da Tabela 6 nota-se que o AI encontrou a melhor solução na 21ª geração a qual se manteve como a melhor solução até o final das gerações. Na Figura 16 são ilustrados os gráficos do comportamento tanto do AI quanto do AGA, o que possibilita uma melhor compreensão do processo de evolução.

Figura 16: Gráfico do comportamento da função objetivo em relação ao número de gerações para o AI e o AGA quando $w1 = 0,5$ e $w2 = 0,5$.



Fonte: Própria Autoria.

Dos gráficos da Figura 16 é possível verificar que o AI encontra a melhor função objetivo (R\$ 1328,16) na geração $ng = 21$. Já para o AGA, esta mesma função é atingida quando $ng = 20$. Neste caso o AI necessita de apenas uma iteração a mais que o AGA para atingir o melhor valor da função objetivo.

3.8.3 Pesos $w_1=0,8$ e $w_2=0,2$

Para $w_1 = 0,8$ e $w_2 = 0,2$, foram obtidas as 3 melhores soluções apresentadas pelo AI, ilustradas na Tabela 7. Essas soluções foram obtidas com os parâmetros apresentados na Figura 17.

Tabela 7: Melhores Alocações para os pesos $w_1=0,8$ e $w_2=0,2$ para o AI.

Solução	Quantidade de sensores	Localização dos sensores nas barras	CENS (R\$)	CINV (R\$)	F(R\$)
					$w_1=0,8$
					$w_2=0,2$
1 ^a	14	4 ^a ; 6 ^a ; 7 ^a ; 8 ^a ; 9 ^a ; 10 ^a ; 11 ^a ; 12 ^a ; 13 ^a ; 15 ^a ; 16 ^a ; 17 ^a ; 18 ^a ; 19 ^a	413,82	2.817,50	894,56
2 ^a	15	4 ^a ; 6 ^a ; 7 ^a ; 8 ^a ; 9 ^a ; 10 ^a ; 11 ^a ; 12 ^a ; 13 ^a ; 14 ^a ; 15 ^a ; 16 ^a ; 17 ^a ; 18 ^a ; 19 ^a	365,1	3.018,75	895,83
3 ^a	13	4 ^a ; 6 ^a ; 7 ^a ; 8 ^a ; 9 ^a ; 10 ^a ; 11 ^a ; 12 ^a ; 13 ^a ; 15 ^a ; 16 ^a ; 18 ^a ; 19 ^a	466,75	2.616,25	896,65

Fonte: Própria Autoria.

Figura 17: Resultado impresso pelo AI para os pesos $w1=0,8$ e $w2=0,2$ para a melhor solução.

Algoritmo Imune (AI)	
Dados da Simulação do Algoritmo:	

Função objetivo ótima.....	894.555465
Anticorpos (na).....	50
Gerações (ngmax).....	40
Beta (B).....	1.39
Número de Bits mutados (nm).....	2
Parâmetro de controle de amortecimento (p)..:	1000
Constante de Afinidade w1.....	0.800000
Constante de Afinidade w2.....	0.200000
Tempo de Processamento (segundos).....	0.046
Anticorpos renovados pela medula óssea (r)....:	5
Anticorpos de Memória (40.00%) (m).....	20
Anticorpos Clonados (n melhores).....	20
Anticorpo (1º) Clones.....	69 (28.99%)
Anticorpo (2º) Clones.....	34 (14.29%)
Anticorpo (3º) Clones.....	23 (9.66%)
Anticorpo (4º) Clones.....	17 (7.14%)
Anticorpo (5º) Clones.....	13 (5.46%)
Anticorpo (6º) Clones.....	11 (4.62%)
Anticorpo (7º) Clones.....	9 (3.78%)
Anticorpo (8º) Clones.....	8 (3.36%)
Anticorpo (9º) Clones.....	7 (2.94%)
Anticorpo (10º) Clones.....	6 (2.52%)
Anticorpo (11º) Clones.....	6 (2.52%)
Anticorpo (12º) Clones.....	5 (2.10%)
Anticorpo (13º) Clones.....	5 (2.10%)
Anticorpo (14º) Clones.....	4 (1.68%)
Anticorpo (15º) Clones.....	4 (1.68%)
Anticorpo (16º) Clones.....	4 (1.68%)
Anticorpo (17º) Clones.....	4 (1.68%)
Anticorpo (18º) Clones.....	3 (1.26%)
Anticorpo (19º) Clones.....	3 (1.26%)
Anticorpo (20º) Clones.....	3 (1.26%)

Total de Clones.....	238 (100%)

Fonte: Própria Autoria

Como nos casos anteriormente, vale ressaltar que na Figura 17, os valores em destaque na cor cinza indicam os parâmetros de entrada utilizados no AI para esta solução da função objetivo.

De acordo com a Tabela 7, a 1ª solução do algoritmo encontrada para os pesos de $w1=0,8$ e $w2=0,2$ é a melhor obtida através de testes exaustivos do algoritmo. Na Tabela 8 são apresentados os valores da função objetivo calculados para cada ciclo geracional do AI considerando a simulação para a melhor solução.

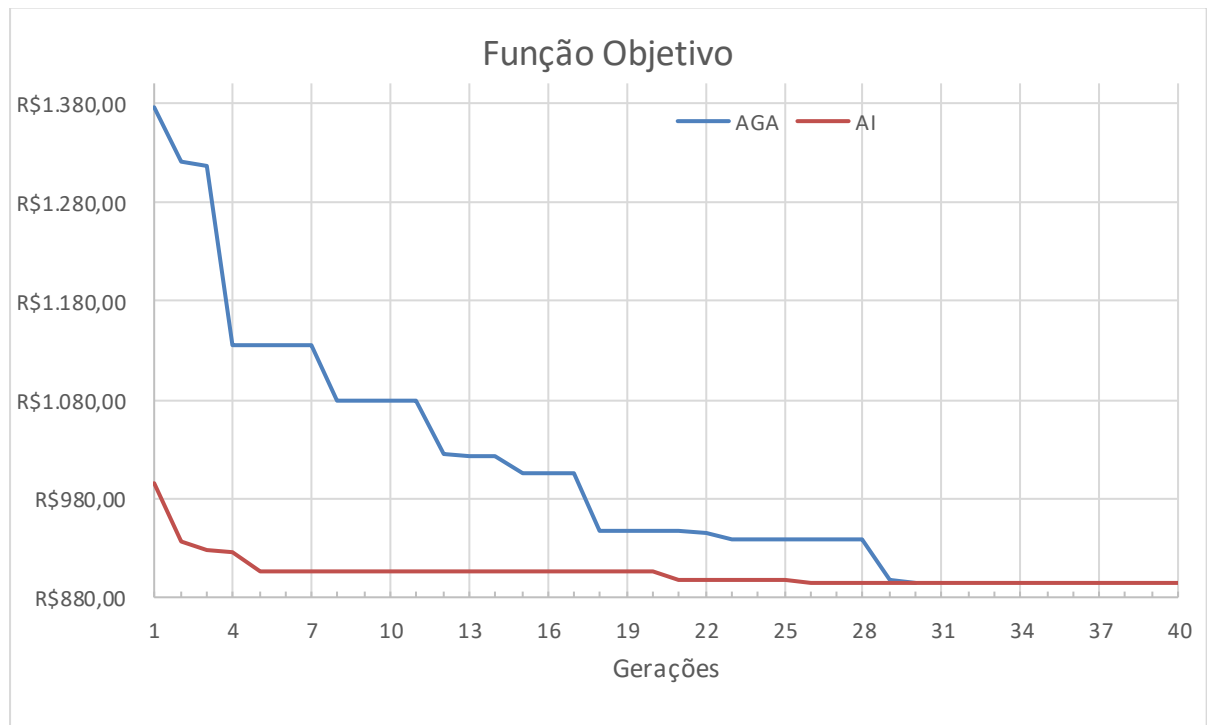
Tabela 8: Dados da Melhor Solução para os pesos $w_1=0,8$ e $w_2=0,2$.

Geração (ng)	FO
1	R\$ 995,4563
2	R\$ 936,8449
3	R\$ 927,7949
4	R\$ 925,1331
5 - 13	R\$ 906,3611
14 - 20	R\$ 905,2304
21 - 25	R\$ 897,9220
26 - 40	R\$ 894,5555

Fonte: Própria Autoria

A partir da Tabela 8 nota-se que o AI encontrou a melhor solução na 26ª geração a qual se manteve como a melhor solução até o final das gerações. A seguir é apresentado, através da Figura 18, o gráfico que possibilita uma melhor compreensão do comportamento do AI e do AGA no processo evolutivo.

Figura 18: Gráfico do comportamento da função objetivo em relação ao número de gerações para o AI e o AGA quando $w_1 = 0,8$ e $w_2 = 0,2$.



Fonte: Própria Autoria.

No gráfico da Figura 18 é possível verificar que o AI encontra a melhor função objetivo (R\$ 894,56) na geração $ng = 26$. Já para o AGA, esta mesma função é atingida em $ng = 29$. Neste ponto observa-se que o AI conseguiu solucionar o problema com três gerações a menos do que o AGA.

3.9 DISCUSSÃO SOBRE AS SIMULAÇÕES

De acordo com a Tabela 3, as melhores alocações dos sensores obtidas a partir das simulações para os pesos $w1=0,2$ e $w2=0,8$, foram nas seguintes barras: 7^a, 10^a, 11^a, 13^a e 17^a com FO igual a R\$1207,39. Neste caso, apesar da segunda melhor solução possuir um menor número de sensores alocados (4 no total) e o peso do CINV ser muito maior, ainda assim a melhor solução foi a apresentada pois no cálculo da FO o CENS fornece valores muito mais elevados do que o CINV.

De acordo com a Tabela 5, as melhores alocações dos sensores obtidas para os pesos de $w1=0,5$ e $w2=0,5$, foram nas seguintes barras: 6^a, 8^a, 10^a, 11^a, 12^a, 13^a, 16^a e 18^a com FO igual a R\$ 1328,16. Neste caso observa-se que para as três melhores soluções o número de sensores alocados é o mesmo (8 no total), já que os pesos do CINV e do CENS são os mesmos, o que deixa ainda mais visível que a parcela do CENS é a mais cara. Portanto, a melhor solução foi aquela que obteve o menor CENS independentemente do CINV.

De acordo com a Tabela 7, as melhores alocações dos sensores obtidas para os pesos de $w1=0,8$ e $w2=0,2$, foram nas seguintes barras: 4^a, 6^a, 7^a, 8^a, 9^a, 10^a, 11^a, 12^a, 13^a, 15^a, 16^a, 17^a, 18^a e 19^a com FO igual a R\$ 894,56. Neste caso observa-se que devido ao fato do CENS ser mais caro e ter um maior peso, as três soluções apresentam resultados da FO bem próximos, diferindo em centavos, mesmo que para todas as três soluções o CINV seja diferente, indicando uma menor relevância ainda para esta parcela da FO.

Quanto aos tempos computacionais, comparando-se os resultados obtidos pelo AI com os resultados obtidos pelo AGA de Ogura e Leão (2017), observou-se que quando se deu maior prioridade ao CINV ($w1=0,2$ e $w2=0,8$) do que para o CENS, o AGA obteve em média um tempo de processamento de 16ms enquanto que o AI obteve um tempo de 35ms; quando os pesos foram iguais, para o AGA o tempo foi de 16ms enquanto que para o AI o tempo foi de 46ms; e por fim, quando se priorizou mais a parcela do CENS na FO ($w1=0,8$ e $w2=0,2$), o AGA obteve um tempo de processamento de 31ms enquanto que para o AI o tempo foi de 46ms. Considerando que os dois algoritmos foram executados em máquinas com capacidade de processamento distintas, não pode-se afirmar que o AGA é computacionalmente mais eficiente do que o AI apesar de ter apresentado tempos inferiores.

Com relação ao número total de iterações, quando se priorizou o CINV, notou-se que o AI realiza mais iterações do que o AGA, devido ao fato de que o algoritmo é direcionado para o cálculo do CENS, e, portanto, ele demanda maior esforço computacional neste caso. Por outro lado, quando o AI convergiu praticamente na mesma iteração que o AGA ($w1 = 0,5$ e $w2 = 0,5$) ou quando convergiu antes do que o AGA ($w1 = 0,8$ e $w2 = 0,2$), este continuou tendo um tempo computacional maior, o que indica que, mesmo quando o algoritmo trabalhou direcionado para o cálculo do CENS, este apresentou maior esforço computacional. Comparando-se os diagramas de blocos dos algoritmos de Ogura (2017) e da Figura 9 deste trabalho, este fato pode ser explicado detalhadamente. Ogura (2017) utiliza a técnica de seleção por torneio, na qual são realizados n_p jogos (torneios) em que a quantidade de jogos é equivalente ao tamanho da população total de indivíduos. A cada torneio são escolhidos aleatoriamente dois indivíduos, sendo que o indivíduo ganhador é aquele que apresenta menor função objetivo. Posteriormente, o conjunto dos melhores indivíduos é utilizado nos processos de recombinação e mutação, até que o critério de parada ($ngmax$) seja alcançado. Observa-se que o processo apresenta apenas dois parâmetros de entrada e baixa complexidade, o que reduz consideravelmente o tempo computacional do algoritmo a cada nova iteração até a convergência para a melhor solução.

Em contrapartida, o AI utiliza o método de seleção por ordenamento crescente em duas etapas: na seleção de n células B para clonagem, e na seleção ao comparar o melhor clone da iteração corrente com a pior célula B da população. Portanto, além do processo de seleção do AI ser naturalmente mais lento do que aquele utilizado pelo AGA, este é utilizado em duas etapas do algoritmo e, também levando em consideração o processo de clonagem, observa-se um aumento considerável do número de subprocessos executados pelo AI a cada nova iteração, assim como uma maior complexidade na calibração de seus parâmetros de entrada. Isto resulta em um maior esforço computacional que de fato é constatado pelos resultados obtidos.

Todos os gráficos que mostram o comportamento das funções objetivo do AI conforme a Figura 14, a Figura 16 e a Figura 18, possuem uma curva característica decrescente, pois são realizados processos de seleção, hipermutação somática, hipermacromutação e substituição das células B a cada iteração do AI, o que fornece soluções de boa qualidade, que tendem a decrescer até que seja encontrada a melhor solução dentre todas as encontradas através de uma calibragem precisa de seus

parâmetros. Portanto, quando é encontrada uma solução de boa qualidade por uma célula B em particular, esta célula permanecerá por um determinado número de gerações seguintes como a melhor solução, sendo clonada e gerando novas células semelhantes que sofrem alterações pontuais na célula B (processo de hiperacromutação) até que se encontre a melhor solução dentre todas as geradas pelo AI no problema. O processo de substituição da pior célula B de memória, ao final de cada iteração, compara a FO do melhor clone com a FO da pior célula B de memória e, caso a FO do clone seja menor, este substitui a atual célula na lista de memória do AI. Verificou-se que caso encontre a melhor solução, o gráfico terá uma curva característica constante assim como é observada a partir da geração do gráfico da Figura 14 por exemplo. É importante observar que apesar do AI ser um algoritmo de mais difícil parametrização, seu gráfico de decaimento da FO apresenta maior agressividade em relação ao gráfico do AGA conforme observa-se através da Figura 14, Figura 16 e Figura 18.

4 CONCLUSÃO

É possível modelar matematicamente a alocação de sensores Indicadores de Falta no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica como um problema de otimização combinatória. Descreve-se o custo de operação da rede em função de dois objetivos conflitantes: o CENS (Custo da Energia Não Suprida) e o CINV (Custo de Investimento) para investimento em tecnologias de monitoramento do SDEE. Neste sentido, neste trabalho, com base na rede da Figura 10 foram realizados testes exaustivos com o modelo matemático para, através de uma análise comparativa, se concluir quais soluções geram os melhores pontos da rede para alocação de sensores e quais parâmetros da rede têm maior influência na alocação dos sensores em função da prioridade dada pela concessionária ao CENS ou ao CINV.

Para o sistema de cinco barras de carga, de acordo com a ponderação dos objetivos conflitantes no modelo matemático foi possível concluir que: quando se deu maior importância ao CENS e menor ao CINV, notou-se que a melhor solução obtida foi a alocação de sensores em todas as barras da rede, o que levou aos menores tempos para a localização da falta e de manutenção dentre as oito soluções analisadas. Em contrapartida, neste caso obteve-se o maior CINV possível já que foram alocados sensores em todas as barras da rede; quando se deu maior relevância ao CINV e menor ao CENS, notou-se que a melhor solução foi alocar sensores em todas as barras da rede exceto o primeiro (3ª solução), o que implicou em um baixo CENS, mas ponderando a importância de um baixo CINV, priorizando-se a alocação de sensores IF barras de carga de maior potência ou ramos com maior taxa de falha.

Na situação de não alocação de sensores em nenhum ramo da rede, observou-se que o CINV foi nulo, mas em contrapartida o CENS foi máximo, o que torna esta solução inviável para a concessionária, já que o CENS tem alta influência no valor final da função objetivo.

Com o aumento do comprimento das seções, notou-se que nas seções com maior taxa de falha é maior a necessidade da presença dos sensores Indicadores de Falta, caso contrário, o CENS passa a ser um valor muito elevado. Todavia as soluções não se alteraram com a mudança do comprimento, o que deixa implícito que para as oito soluções estudadas o comprimento das seções não foi fator preponderante para a melhor solução.

Nesta etapa esteve claro que é possível estimar os melhores pontos da rede para alocação de sensores conforme a necessidade da concessionária no caso em

estudo, mas para sistemas grandes torna-se inviável o cálculo manual de todas as possibilidades existentes. Por este motivo, torna-se de grande importância a implementação do Algoritmo Imune (AI) proposto.

Através da implementação do Algoritmo Imune (AI) foi possível realizar testes experimentais exaustivos para encontrar a melhor solução de uma forma rápida e eficiente para um sistema teste da literatura de dezenove ba. Foi verificado que para os diferentes pesos de $w1$ e $w2$ existem alocações distintas e melhores. Nota-se através dos resultados que as funções objetivo das melhores soluções possuem uma curva característica decrescente pois trata-se de um algoritmo de técnica meta-heurística de otimização, em que o AI, através da exploração de ótimos locais busca pela melhor solução global do sistema de 19 barras de carga. Para as três alocações o algoritmo convergiu antes da última geração, o que resulta em valores constantes e que pode ser observado através dos gráficos da Figura 14, da Figura 16 e da Figura 18.

Nota-se ainda, observando-se a Figura 13, a Figura 15 e a Figura 17, que o AI sempre busca clonar em maior quantidade as melhores configurações de células B com o objetivo de explorar as soluções aproximadas e, a partir destas, variando pouco seus bits pelo processo de hipermacromutação, atingir rapidamente a melhor solução aproximada para o problema.

Foi verificado que os tempos de processamento do AI são maiores do que os tempos do AGA, porém não se pode tirar conclusões definitivas visto que ambos algoritmos foram executados em máquinas distintas. Os principais pontos negativos do AI em relação ao AGA é que o AI necessita de mais parâmetros de entrada, o que leva a uma maior dificuldade na calibração destes parâmetros e também, pelos resultados obtidos, fica explícito que o processo de clonagem e substituição na população de memória é lento. A partir dos resultados e dos tempos computacionais conclui-se que o algoritmo para alocação de sensores indicadores de falta é robusto e eficiente para a alocação de IFs. Portanto o AI mostrou ser uma ferramenta mais promissora do que o AGA em termos de velocidade de decaimento na alocação de sensores indicadores de faltas em redes de distribuição de energia elétrica.

Para o aumento da eficiência do AI em um possível trabalho no futuro, relata-se a necessidade de melhoria do seu tempo de convergência implementando estratégias para reduzir o tempo computacional no processo de clonagem e dos operadores imunes.

5 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA M. C.; COSTA F. F.; XAVIER-DE-SOUZA S.; SANTANA F. **Optimal placement of faulted circuit indicators in power distribution systems.** Electr. Power Syst. Res., vol. 81, no. 2, pp. 699–706, Fev. 2011.
- CONG D.P.; RAISON B.; ROGNON J.P.; BONNOIT S.; MANJAL B. **“Optimization of fault indicators placement with dispersed generation insertion,”** in IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, pp. 1–8.
- CRUZ H. O. **“Alocação otimizada de sensores indicadores de falta em redes de distribuição de energia elétrica,”** Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Ilha Solteira, Mestrado, 2016.
- DE CASTRO, L. N. **“Engenharia Imunológica: Desenvolvimento e Aplicação de Ferramentas Computacionais Inspiradas em Sistemas Imunológicos Artificiais,”** 2001.
- DE CASTRO L. N.; VON ZUBEN F. J. **“Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle,”** vol. 6, no. 3, pp. 239–251, 2002.
- DE SOUZA D.; SILVA I.; ZIOLKOWSKI V.; FLAUZINO R. **“Efficient allocation of fault indicators in distribution circuits using fuzzy logic,”** in IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1–6.
- FERREIRA R.; SAU G. **“Alocação Otimizada De Indicadores De Falta Em Redes De Distribuição De Energia Elétrica Considerando A Presença De Geradores Distribuídos,”** 2016.
- HO C.-Y.; LEE T.-E.; LIN C.-H. **“Optimal Placement of Fault Indicators Using the Immune Algorithm,”** IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 38–45, Feb. 2011.
- Incon-Power Reability Systems, **“GridSense™ Line IQ Data Sheet,”** 2017.
- LEÃO F. B.; PEREIRA R. A. F. MANTOVANI J. R. S. **“Fault section estimation in electric power systems using an optimization immune algorithm,”** Electr. Power Syst. Res., vol. 80, no. 11, pp. 1341–1352, Nov. 2010.
- LUAN S.; TENG J.; CHEN C. **“Development of a Novel Fault Indicator for Distribution Automation,”** Int. J. Inf. Electron. Eng., vol. 1, no. 2, pp. 105–109, 2011.
- MUENCHF.; WRIGHT G. **“Fault indicators: types, strengths & applications,”** IEEE Trans. Power Appar. Syst., no. 12, pp. 3688–3693, 1984.
- OGURA, G. H.; LEÃO F. B. **“Alocação Otimizada de Sensores Indicadores de Falta em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica utilizando Algoritmo Genético Adaptativo,”** XXIX Congr. Iniciação Científica, vol. 1, pp. 1–72, 2017.
- “Sensores e Indicadores de Falta | Schweitzer Engineering Laboratories.”** Disponível em: <https://selinc.com/pt/products-section/fault-indicators-sensors/>. [Acesso em: 29-Jun-2021].

TENG J.H.; LUAN S.W.; HUANG W.H.; LEE D.J.; HUANG Y.F. **“A cost-effective fault management system for distribution systems with distributed generators,”** Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 65, no. C, pp. 357–366, 2015.

TENG J.H.; HUANG W.H.; LUAN S.W. **“Automatic and Fast Faulted Line-Section Location Method for Distribution Systems Based on Fault Indicators,”** IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 4, pp. 1653–1662, Jul. 2014.

USIDA W.; COURY D. **“Efficient placement of fault indicators in an actual distribution system using evolutionary computing,”** IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 4, pp. 1841–1849, 2012.

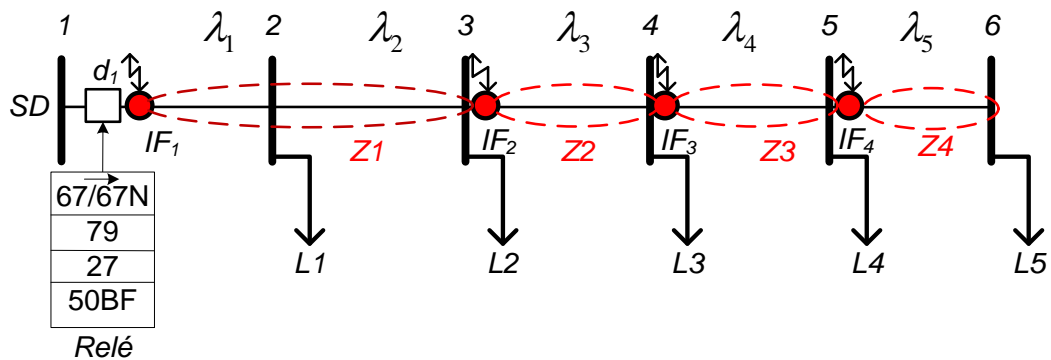
APÊNDICE A – CÁLCULOS PARA O SISTEMA TESTE DE 5 BARRAS DE CARGA

A.1 CÁLCULOS PARA PRIMEIRA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

A.1.1 Segunda Alocação Realizada

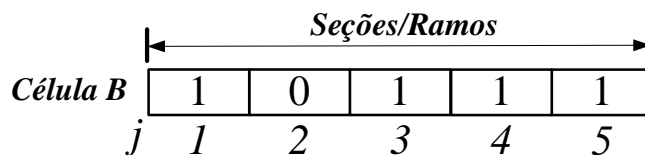
Na segunda configuração apresentada pela Figura 19 foram alocados 4 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 20.

Figura 19: SDEE teste para a Segunda configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 20: Célula B codificada para a Segunda configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.2.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^0 = \frac{0,75h}{km} \times 20km = 15h$$

$$t_3^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 30km = 2,4999h$$

$$t_4^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 40km = 3,3333h$$

$$t_5^1 = \frac{0,0833h}{km} \times 50km = 4,1667h$$

De acordo com a **Figura 19** obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=4;$$

$$NL1= \{1,2\};$$

$$NL2= \{3\};$$

$$NL3= \{4\};$$

$$NL4= \{5\};$$

$$NS1= \{1,2\};$$

$$NS2= \{3\};$$

$$NS3= \{4\};$$

$$NS4= \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [(L_1 + L_2) \times (\lambda_1 \times t_1^1 + \lambda_2 \times t_2^0) + L_3 \times \lambda_3 \times t_3^1 + L_4 \times \lambda_4 \times t_4^1 + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041 \times [(100 + 100) \times (1,49 \times 0,8333 + 1,49 \times 15 + 200 \times 1,49 \times 2,4999 + 300 \times 1,49 \times 3,3333 + 300 \times 1,49 \times 4,1667]$$

$$CENS = \mathbf{4499,689R\$/ano}$$

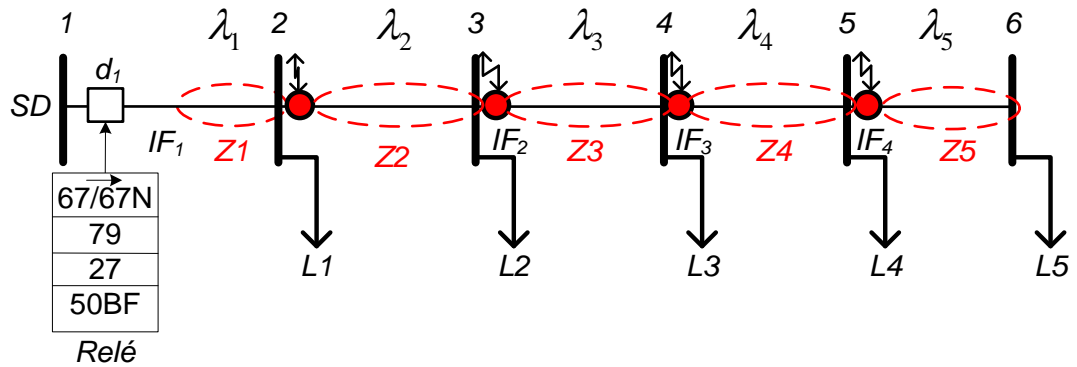
Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) = \mathbf{805R\$/ano}$$

A.1.2 Terceira Alocação Realizada

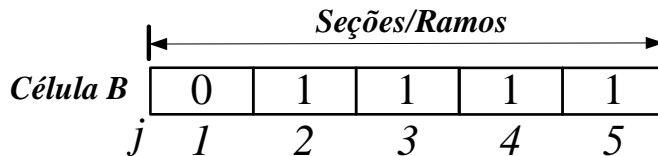
Na terceira configuração apresentada pela Figura 21 foram alocados 4 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 22.

Figura 21: SDEE teste para a Terceira configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 22: Célula B codificada para a Terceira configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.2.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^0 = \frac{0,75h}{km} \times 10km = 7,5h$$

$$t_2^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 20km = 1,6667h$$

$$t_3^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 30km = 2,4999h$$

$$t_4^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 40km = 3,3333h$$

$$t_5^1 = \frac{0,0833h}{km} \times 50km = 4,1667h$$

De acordo com a Figura 21 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=5;$$

$$NL1= \{1\};$$

$$NL2= \{2\};$$

$$NL3= \{3\};$$

$$NL4 = \{4\};$$

$$NL5 = \{5\};$$

$$NS1 = \{1\};$$

$$NS2 = \{2\};$$

$$NS3 = \{3\};$$

$$NS4 = \{4\};$$

$$NS5 = \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^0 + L_2 \times \lambda_2 \times t_2^1 + L_3 \times \lambda_3 \times t_3^1 + L_4 \times \lambda_4 \times t_4^1 + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041 \times [100 \times 1,49 \times 7,5 + 100 \times 1,49 \times 1,6667 + 200 \times 1,49 \times 2,499 + 300 \times 1,49 \times 3,3333 + 300 \times 1,49 \times 4,1667]$$

$$CENS = 2788,54R\$/ano$$

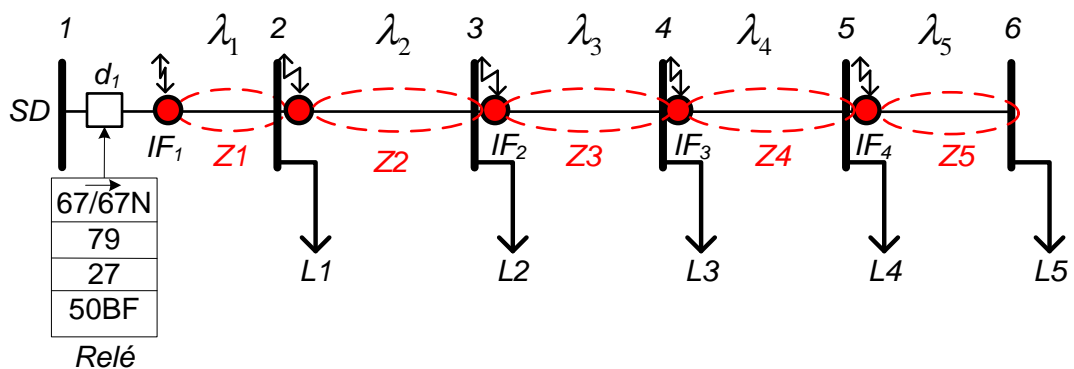
Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) = 805R\$/ano$$

A.1.3 Quarta Alocação Realizada

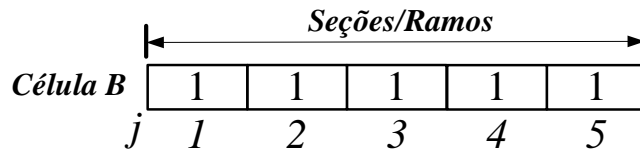
Na quarta configuração apresentada pela Figura 23 foram alocados 5 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 24.

Figura 23: SDEE teste para a Quarta configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 24: Célula B codificada para a Quarta configuração de Indicadores de falta.



Fonte: Autoria Própria.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.2.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 20km = 1,6666h$$

$$t_3^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 30km = 2,4999h$$

$$t_4^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 40km = 3,3333h$$

$$t_5^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 50km = 4,1667h$$

De acordo com a Figura 23 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=5;$$

$$NL1= \{1\};$$

$$NL2= \{2\};$$

$$NL3= \{3\};$$

$$NL4= \{4\};$$

$$NL5= \{5\};$$

$$NS1= \{1\};$$

$$NS2= \{2\};$$

$$NS3= \{3\};$$

$$NS4= \{4\};$$

$$NS5= \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^1 + L_2 \times \lambda_2 \times t_2^1 + L_3 \times \lambda_3 \times t_3^1 + L_4 \times \lambda_4 \times t_4^1 + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041 \times [100 \times 1,49 \times 0,8333 + 100 \times 1,49 \times 1,6667 + 200 \times 1,49 \times 2,499 + 300 \times 1,49 \times 3,3333 + 300 \times 1,49 \times 4,1667]$$

$$CENS = 2281,532R\$/ano$$

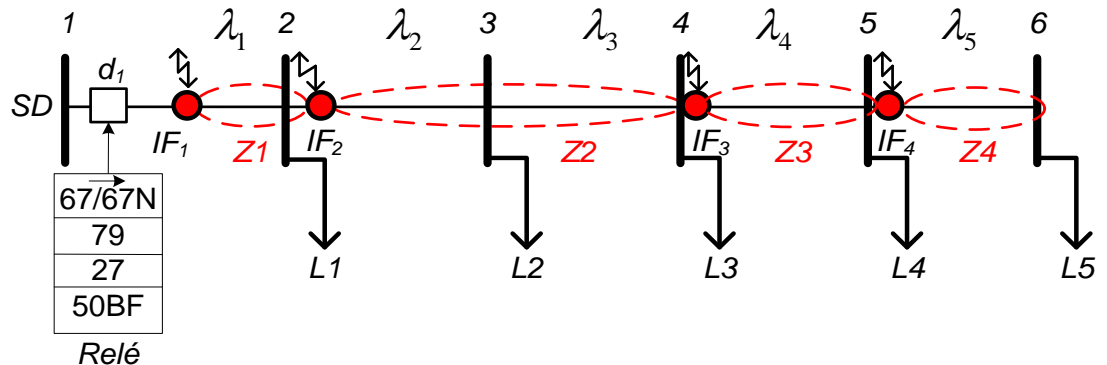
Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 5 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) = 1006,25R\$/ano$$

A.1.4 Quinta Alocação Realizada

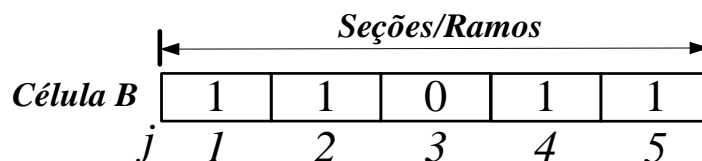
Na quinta configuração apresentada pela Figura 25 foram alocados 4 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 26.

Figura 25: SDEE teste para a Quinta configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 26: Célula B codificada para a Quinta configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.2.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 20km = 1,6666h$$

$$t_3^0 = \frac{0,75h}{km} \times 30km = 2,4999h$$

$$t_4^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 40km = 3,3333h$$

$$t_5^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 50km = 4,1667h$$

De acordo com a Figura 25 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=4;$$

$$NL1= \{1\};$$

$$NL2= \{2,3\};$$

$$NL3= \{4\};$$

$$NL4= \{5\};$$

$$NS1= \{1\};$$

$$NS2= \{2,3\};$$

$$NS3= \{4\};$$

$$NS4= \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^1 + (L_2 + L_3) \times (\lambda_2 \times t_2^1 + \lambda_3 \times t_3^1) + L_4 \times \lambda_4 \times t_4^1 + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041$$

$$\times [100 \times 1,49 \times 0,8333$$

$$+ (100 + 200) \times (1,49 \times 1,6667 + 1,49 \times 2,4999)$$

$$+ 300 \times 1,49 \times 3,3333 + 300 \times 1,49 \times 4,1667]$$

$$CENS = \mathbf{7288,228R\$/ano}$$

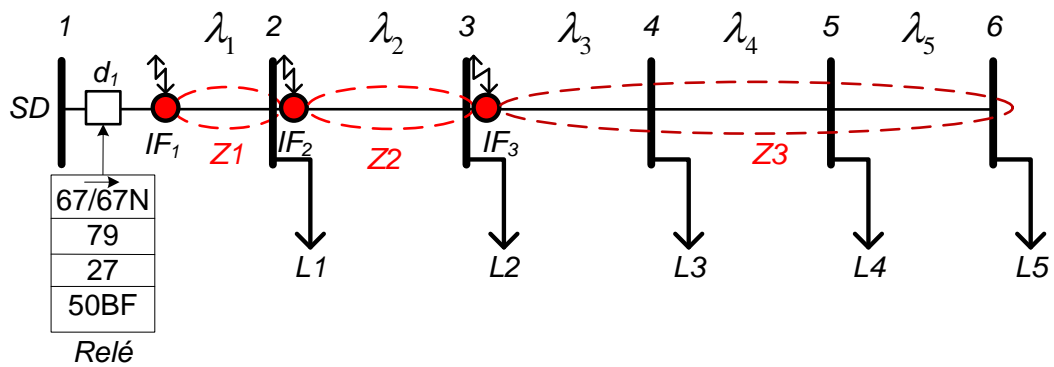
Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) \\ = \mathbf{805R\$/ano}$$

A.1.5 Sexta Alocação Realizada

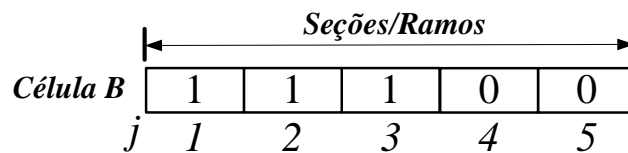
Na sexta configuração apresentada pela Figura 27 foram alocados 3 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 28.

Figura 27: SDEE teste para a Sexta configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 28: Célula B codificada para a Sexta configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.2.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^1 = \frac{0,0833h}{km} \times 20km = 1,6666h$$

$$t_3^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 30km = 2,4999h$$

$$t_4^0 = \frac{0,75h}{km} \times 40km = 30h$$

$$t_5^0 = \frac{0,75h}{km} \times 50km = 37,5h$$

De acordo com a Figura 27 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=3;$$

$$NL1= \{1\};$$

$$NL2= \{2\};$$

$$NL3= \{3,4,5\};$$

$$NS1= \{1\};$$

$$NS2= \{2\};$$

$$NS3= \{3,4,5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$\begin{aligned} CENS &= Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^1 + L_2 \times \lambda_2 \times t_2^1 \\ &\quad + (L_3 + L_4 + L_5) \times (\lambda_3 \times t_3^1 + \lambda_4 \times t_4^0 + \lambda_5 \times t_5^0)] \\ CENS &= 0,51041 \times [100 \times 1,49 \times 0,8333 + 100 \times 1,49 \times 1,6667 \\ &\quad + (200 + 300 + 300) \\ &\quad \times (1,49 \times 2,4999 + 1,49 \times 30 + 1,49 \times 37,5)] \end{aligned}$$

$$CENS = 42778,74R\$/ano$$

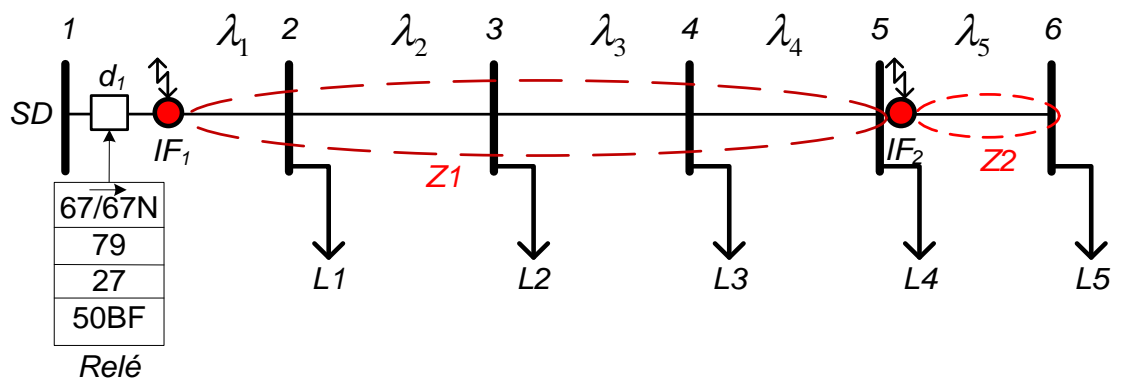
Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$\begin{aligned} CINV &= N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 3 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) \\ &= 603,75R\$/ano \end{aligned}$$

A.1.6 Sétima Alocação Realizada

Na sétima configuração apresentada pela Figura 29 foram alocados 2 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 30.

Figura 29: SDEE teste para a Sétima configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 30: Célula B codificada para a Sétima configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.2.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^0 = \frac{0,75h}{km} \times 20km = 15h$$

$$t_3^0 = \frac{0,75h}{km} \times 30km = 22,5h$$

$$t_4^0 = \frac{0,75h}{km} \times 40km = 30h$$

$$t_5^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 50km = 4,1667h$$

De acordo com a Figura 29 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=2;$$

$$NL1= \{1,2,3,4\};$$

$$NL2= \{5\};$$

$$NS1= \{1,2,3,4\};$$

$$NS2= \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [(L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \times (\lambda_1 \times t_1^1 + \lambda_2 \times t_2^0 + \lambda_3 \times t_3^0 + \lambda_4 \times t_4^0) + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041 \times [(100 + 100 + 200 + 300) \times (1,49 \times 0,8333 + 1,49 \times 15 + 1,49 \times 22,5 + 1,49 \times 30) + 300 \times 1,49 \times 4,1667]$$

$$CENS = \mathbf{37328,4R\$/ano}$$

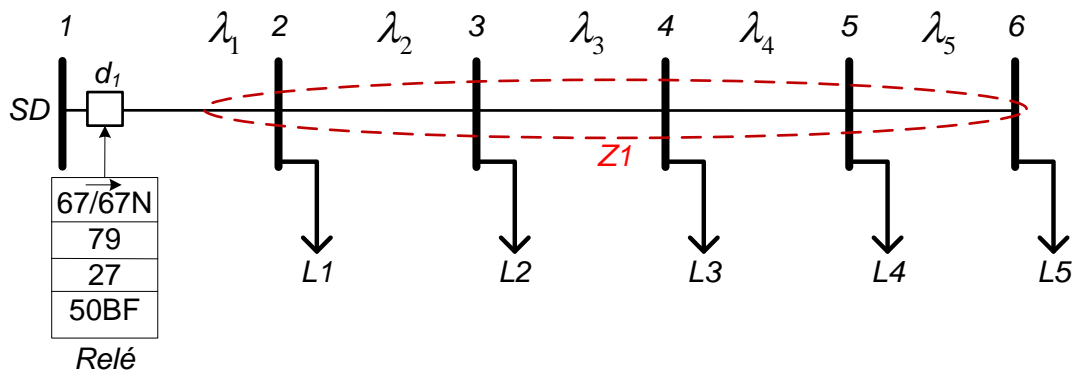
Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) \\ = 402,5R\$/ano$$

A.1.7 Oitava Alocação Realizada

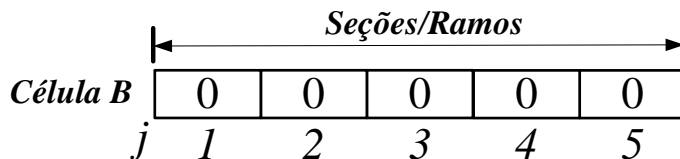
Na oitava configuração apresentada pela Figura 31 não foram alocados sensores IF. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 32.

Figura 31: SDEE teste para a Oitava configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 32: Célula B codificada para a Oitava configuração de Indicadores de Falta.



Fonte: Autoria Própria.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 5.1.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^0 = \frac{0,75h}{km} \times 10km = 7,5h$$

$$t_2^0 = \frac{0,75h}{km} \times 20km = 15h$$

$$t_3^0 = \frac{0,75h}{km} \times 30km = 22,5h$$

$$t_4^0 = \frac{0,75h}{km} \times 40km = 30h$$

$$t_5^0 = \frac{0,75h}{km} \times 50km = 37,5h$$

De acordo com a Figura 31 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=1;$$

$$NL1 = \{1,2,3,4,5\};$$

$$NS1 = \{1,2,3,4,5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$\begin{aligned} CENS &= Ce \times [(L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5) \\ &\quad \times (\lambda_1 \times t_1^0 + \lambda_2 \times t_2^0 + \lambda_3 \times t_3^0 + \lambda_4 \times t_4^0 + \lambda_5 \times t_5^0)] \\ CENS &= 0,51041 \times [(100 + 100 + 200 + 300 + 300) \\ &\quad \times (1,49 \times 7,5 + 1,49 \times 15 + 1,49 \times 22,5 + 1,49 \times 30 \\ &\quad + 1,49 \times 37,5)] \end{aligned}$$

$$CENS = \mathbf{85557,48R\$/ano}$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$\begin{aligned} CINV &= N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 0 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) \\ &= \mathbf{0,00R\$/ano} \end{aligned}$$

A.2 CÁLCULOS PARA SEGUNDA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENTRADA

A.2.1 Segunda Alocação Realizada

Na segunda configuração apresentada pela Figura 19 foram alocados 4 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 20.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.4.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^0 = \frac{0,75h}{km} \times 25km = 18,75h$$

$$t_3^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 45km = 3,7499h$$

$$t_4^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 70km = 5,8333h$$

$$t_5^1 = \frac{0,0833h}{km} \times 100km = 8,3333h$$

De acordo com a Figura 19 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=4;$$

$$NL1= \{1,2\};$$

$$NL2= \{3\};$$

$$NL3= \{4\};$$

$$NL4= \{5\};$$

$$NS1= \{1,2\};$$

$$NS2= \{3\};$$

$$NS3= \{4\};$$

$$NS4= \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [(L_1 + L_2) \times (\lambda_1 \times t_1^1 + \lambda_2 \times t_2^0) + L_3 \times \lambda_3 \times t_3^1 + L_4 \times \lambda_4 \times t_4^1 + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041 \times [(100 + 100) \times (1,49 \times 0,8333 + 2,235 \times 18,75 + 200 \times 2,98 \times 3,7499 + 300 \times 3,725 \times 5,8333 + 300 \times 4,47 \times 8,3333]$$

$$CENS = \mathbf{14576,42R\$/ano}$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) = \mathbf{805R\$/ano}$$

A.2.2 Terceira Alocação Realizada

Na terceira configuração apresentada pela Figura 21 foram alocados 4 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 22.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.4.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^0 = \frac{,75h}{km} \times 10km = 7,5h$$

$$t_2^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 25km = 2,0833h$$

$$t_3^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 45km = 3,7499h$$

$$t_4^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 70km = 5,8333h$$

$$t_5^1 = \frac{0,0833h}{km} \times 100km = 8,3333h$$

De acordo com a Figura 21 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=5;$$

$$NL1= \{1\};$$

$$NL2= \{2\};$$

$$NL3= \{3\};$$

$$NL4= \{4\};$$

$$NL5= \{5\};$$

$$NS1= \{1\};$$

$$NS2= \{2\};$$

$$NS3= \{3\};$$

$$NS4= \{4\};$$

$$NS5= \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^0 + L_2 \times \lambda_2 \times t_2^1 + L_3 \times \lambda_3 \times t_3^1 + L_4 \times \lambda_4 \times t_4^1 + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041 \times [100 \times 1,49 \times 7,5 + 100 \times 2,235 \times 2,0833 + 200 \times 2,98 \times 3,7499 + 300 \times 3,725 \times 5,833 + 300 \times 4,47 \times 8,3333]$$

$$CENS = \mathbf{10979,83R\$/ano}$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) = \mathbf{805R\$/ano}$$

A.2.3 Quarta Alocação Realizada

Na quarta configuração apresentada pela Figura 23 foram alocados 5 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 24.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.4.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 25km = 2,0833h$$

$$t_3^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 45km = 3,7499h$$

$$t_4^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 70km = 5,8333h$$

$$t_5^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 100km = 8,3333h$$

De acordo com a Figura 23 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=5;$$

$$NL1= \{1\};$$

$$NL2= \{2\};$$

$$NL3= \{3\};$$

$$NL4= \{4\};$$

$$NL5= \{5\};$$

$$NS1= \{1\};$$

$$NS2= \{2\};$$

$$NS3= \{3\};$$

$$NS4= \{4\};$$

$$NS5= \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^1 + L_2 \times \lambda_2 \times t_2^1 + L_3 \times \lambda_3 \times t_3^1 + L_4 \times \lambda_4 \times t_4^1 + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$\begin{aligned}
 CENS &= 0,51041 \times [100 \times 1,49 \times 0,8333 + 100 \times 2,235 \times 2,0833 \\
 &\quad + 200 \times 2,98 \times 3,7499 + 300 \times 3,725 \times 5,8333 \\
 &\quad + 300 \times 4,47 \times 8,3333]
 \end{aligned}$$

$$CENS = \mathbf{10472,83R\$/ano}$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$\begin{aligned}
 CINV &= N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 5 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) \\
 &= \mathbf{1006,25R\$/ano}
 \end{aligned}$$

A.2.4 Quinta Alocação Realizada

Na quinta configuração apresentada pela Figura 25 foram alocados 4 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada na Figura 26.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.4.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 25km = 2,0833h$$

$$t_3^0 = \frac{0,75h}{km} \times 45km = 33,75h$$

$$t_4^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 70km = 5,8333h$$

$$t_5^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 100km = 8,3333h$$

De acordo com a Figura 25 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=4;$$

$$NL1= \{1\};$$

$$NL2= \{2,3\};$$

$$NL3= \{4\};$$

$$NL4= \{5\};$$

$$NS1= \{1\};$$

$$NS2= \{2,3\};$$

$$NS3 = \{4\};$$

$$NS4 = \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^1 + (L_2 + L_3) \times (\lambda_2 \times t_2^1 + \lambda_3 \times t_3^1) + L_4 \times \lambda_4 \times t_4^1 + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041 \times [100 \times 1,49 \times 0,8333 + (100 + 200) \times (2,235 \times 2,0833 + 2,98 \times 33,75) + 300 \times 3,725 \times 5,8333 + 300 \times 4,47 \times 8,3333]$$

$$CENS = \mathbf{25207,73R\$/ano}$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) = \mathbf{805R\$/ano}$$

A.2.5 Sexta Alocação Realizada

Na sexta configuração apresentada pela Figura 27 foram alocados 3 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 28.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.4.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^1 = \frac{0,08333h}{km} \times 25km = 2,0833h$$

$$t_3^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 45km = 3,7499h$$

$$t_4^0 = \frac{0,75h}{km} \times 70km = 52,5h$$

$$t_5^0 = \frac{0,75h}{km} \times 100km = 75h$$

De acordo com a Figura 27 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=3;$$

$$NL1 = \{1\};$$

$$NL2 = \{2\};$$

$$NL3 = \{3,4,5\};$$

$$NS1 = \{1\};$$

$$NS2 = \{2\};$$

$$NS3 = \{3,4,5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$\begin{aligned} CENS &= Ce \times [L_1 \times \lambda_1 \times t_1^1 + L_2 \times \lambda_2 \times t_2^1 \\ &\quad + (L_3 + L_4 + L_5) \times (\lambda_3 \times t_3^1 + \lambda_4 \times t_4^0 + \lambda_5 \times t_5^0)] \\ CENS &= 0,51041 \times [100 \times 1,49 \times 0,8333 + 100 \times 2,235 \times 2,0833 \\ &\quad + (200 + 300 + 300) \\ &\quad \times (2,98 \times 3,7499 + 3,725 \times 52,5 + 4,47 \times 75)] \end{aligned}$$

$$CENS = 221609,7R\$/ano$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$\begin{aligned} CINV &= N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 3 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) \\ &= 603,75R\$/ano \end{aligned}$$

A.2.6 Sétima Alocação Realizada

Na sétima configuração apresentada pela Figura 29 foram alocados 2 sensores IF aleatoriamente. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 30.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.4.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 10km = 0,8333h$$

$$t_2^0 = \frac{0,75h}{km} \times 25km = 18,75h$$

$$t_1^0 = \frac{0,75h}{km} \times 45km = 33,75h$$

$$t_4^0 = \frac{0,75h}{km} \times 70km = 52,5h$$

$$t_5^1 = \frac{0,083333h}{km} \times 100km = 8,3333h$$

De acordo com a Figura 29 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=2;$$

$$NL1 = \{1,2,3,4\};$$

$$NL2 = \{5\};$$

$$NS1 = \{1,2,3,4\};$$

$$NS2 = \{5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [(L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \times (\lambda_1 \times t_1^1 + \lambda_2 \times t_2^0 + \lambda_3 \times t_3^0 + \lambda_4 \times t_4^0) + L_5 \times \lambda_5 \times t_5^1]$$

$$CENS = 0,51041 \times [(100 + 100 + 200 + 300) \times (1,49 \times 0,8333 + 2,235 \times 18,75 + 2,98 \times 33,75 + 3,725 \times 52,5) + 300 \times 4,47 \times 8,3333]$$

$$CENS = \mathbf{126926,1R\$/ano}$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 4 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right) = \mathbf{402,5R\$/ano}$$

A.2.7 Oitava Alocação Realizada

Na oitava configuração apresentada pela Figura 31 não foram alocados sensores IF. A codificação da célula B do sistema para esta alocação é apresentada pela Figura 32.

Busca-se calcular o CENS através da equação (7), levando-se em consideração os dados apresentados na seção 3.4.

Para isto, calculam-se os tempos para localização da falta nas seções através das equações (4) e (5):

$$t_1^0 = \frac{0,75h}{km} \times 10km = 7,5h$$

$$t_2^0 = \frac{0,75h}{km} \times 25km = 18,75h$$

$$t_1^0 = \frac{0,75h}{km} \times 45km = 33,75h$$

$$t_4^0 = \frac{0,75h}{km} \times 70km = 52,5h$$

$$t_5^0 = \frac{0,75h}{km} \times 100km = 75h$$

De acordo com a Figura 31 obtêm-se os seguintes dados:

$$Nz=1;$$

$$NL1 = \{1, 2, 3, 4, 5\};$$

$$NS1 = \{1, 2, 3, 4, 5\}.$$

Tem-se então pela equação (7) que:

$$CENS = Ce \times [(L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5)$$

$$\times (\lambda_1 \times t_1^0 + \lambda_2 \times t_2^0 + \lambda_3 \times t_3^0 + \lambda_4 \times t_4^0 + \lambda_5 \times t_5^0)]$$

$$CENS = 0,51041 \times [(100 + 100 + 200 + 300 + 300)$$

$$\times (1,49 \times 7,5 + 2,235 \times 18,75 + 2,98 \times 33,75 + 3,725 \times 52,5 + 4,47 \times 75)]$$

$$CENS = \mathbf{349359,7R\$/ano}$$

Calcula-se também o CINV através da equação (6):

$$CINV = N \times \left(\frac{CFI + CIFI}{IDFI} + CMFI \right) = 0 \times \left(\frac{800 + 1710}{8} + 80 \right)$$

$$= \mathbf{0,00R\$/ano}$$