

PLANEJAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO INCERTEZAS NA DEMANDA ATRAVÉS DO FLUXO DE POTÊNCIA INTERVALAR E SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

TIAGO F. JESUS, FELIPE S. SETA, LEONARDO W. DE OLIVEIRA, IVO C. DA SILVA JUNIOR, EDIMAR J. DE OLIVEIRA,

*Faculdade de Engenharia, Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora
Campus Universitário – Bairro Martelos – 36036-330 – Juiz de Fora - MG*

E-mails: tiago.fayer@engenharia.ufjf.br, felipe.seta@engenharia.ufjf.br,
leonardo.willier@ufjf.edu.br, ivo.junior@ufjf.edu.br,
edimar.oliveira@ufjf.edu.br

Abstract— This paper proposes the assessment of the impacts of uncertainties in the distribution feeder planning problem, through a methodology that combines interval mathematics with a bioinspired metaheuristic optimization approach. The metaheuristic technique is called artificial immune system. The interval mathematics is implemented within the power flow code which also hosts the load uncertainty model, for evaluation of planning options. The input interval variables are the active and reactive powers in the load nodes. It is expected to find the minimum energy losses with minimum feeder investment cost. A method for comparing interval solutions is used to determine the best investment alternative. The main objective is to evaluate the impact on the distribution planning problem when demand uncertainties are considered. The proposed algorithm is tested in typical electrical systems.

Keywords— Planning, Artificial Immune System, Load Uncertainties, Energy Losses, Interval Mathematics.

Resumo— Neste trabalho é proposta uma metodologia para a avaliação dos impactos de incertezas no problema de planejamento de alimentadores em redes de distribuição de energia elétrica, através de uma metodologia que associa matemática intervalar com uma técnica de otimização meta-heurística bioinspirada. A técnica meta-heurística é denominada Sistema Imunológico Artificial. Os fundamentos da matemática intervalar são implementados no problema de fluxo de potência, que modela incertezas na demanda, para a avaliação das alternativas de planejamento. As variáveis intervalares de entrada são as cargas ativas e reativas nas barras do sistema. O resultado esperado é a minimização de perdas de energia com mínimo custo de investimento em alimentadores. Um método de comparação de intervalos é usado para determinar a melhor opção de investimento. O objetivo principal é avaliar o impacto de se considerar as incertezas da demanda no problema de planejamento da distribuição. O algoritmo proposto é testado em sistemas conhecidos.

Palavras-chave— Planejamento, Sistema Imunológico Artificial, Incertezas da Carga, Perdas de Energia, Matemática Intervalar.

1 Introdução

O sistema de distribuição de energia é um setor que contribui significativamente com perdas para o sistema elétrico (Gönen, 1986). Logo, a minimização dessas perdas faz com que as concessionárias tenham menos gastos com o fornecimento de energia. Considerando isso, pode-se perceber o quão é importante utilizar técnicas para o planejamento e projeto de redes de maneira que se possam diminuir tanto os custos operacionais quanto os custos de investimento (Lavorato et al; 2010). Sendo assim, buscando a redução de perdas para o sistema, várias técnicas e alternativas podem ser empregadas, de forma que definir a configuração do sistema ainda em seu projeto inicial é uma opção que deve ser levada em conta.

Grande parte dos estudos para modelagem de configuração de redes apresentam suas grandezas de maneira determinística, não representando o que acontece na realidade, devido, principalmente, a erros de medição e de previsão de demanda, por exemplo (Oliveira et al., 2016). Então, para representar a incerteza de algumas grandezas, é permitido que elas tenham faixas de operação, ou seja, certas variáveis do problema não serão apresentadas mais de maneira pontual, mas como um intervalo de possíveis valores. Para uma representação que incorpore as incertezas dos dados de entrada de um sistema podem ser utilizadas algumas ferramentas como o

fluxo de potência probabilístico, a lógica *fuzzy*, ou a matemática intervalar (Pereira et al., 2012).

O planejamento de sistemas de distribuição é caracterizado por ser um problema de programação não linear inteira mista de grande porte se for consideradas de maneira realista as características físicas e econômicas (Ganguly et al., 2013). Para se encontrar a solução ótima desse tipo de problema é preciso utilizar métodos que geram um custo computacional muito grande, porém isso torna o estudo inviável. Para contornar isso, as técnicas meta-heurísticas tem sido uma alternativa, já que encontram soluções de boa qualidade, através de uma busca mais eficaz (Oliveira et al., 2014).

Neste contexto, o presente trabalho propõe uma metodologia de otimização visando avaliar o impacto da representação de incertezas no problema de planejamento de alimentadores de sistemas de distribuição. Para tanto, propõe-se a associação de técnica de matemática intervalar, através da implementação de um fluxo de potência intervalar, com a meta-heurística bioinspirada denominada Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA). As variáveis aleatórias do algoritmo de otimização intervalar proposto consistem nas demandas de potência ativa e reativa. Destaca-se que a avaliação de impactos proposta para o problema de planejamento de alimentadores de distribuição, aliando matemática intervalar com a meta-heurística proposta, é inédita na literatura. Dois sistemas conhecidos da literatura são utilizados.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Método de Krawczyk

O método de Krawczyk é um dos mais eficazes na resolução de sistemas não lineares intervalares. Foi criado a partir do método de Newton, de modo que o sistema não linear é resolvido apenas pelo produto de matrizes (Oliveira et al., 2016). O operador Krawczyk é definido por:

$$K(x^n, X^n) = x^n - Cf(x^n) + (I - CJ(X^n))(X^n - x^n) \quad (1)$$

X é um intervalo real, x é o ponto médio do intervalo X , $f(x)$ é uma função não linear no ponto x , $J(X)$ é a matriz Jacobiana do intervalo X , C é uma matriz de pré-condicionamento igual a inversa do ponto médio $J(X)$, I é a matriz identidade e n é o número de iterações.

A partir de um intervalo de grande diâmetro, diversas interseções intervalares são realizadas de modo a se obter a convergência do método de Krawczyk. Assim, as atualizações nas variáveis intervalares podem ser realizadas de acordo com a equação (2).

$$X^{n+1} = X^n \cap K(x^n, X^n) \quad (2)$$

A convergência é obtida quando todos os elementos de $|X^n - X^{n-1}|$ são iguais ou menores do que uma determinada tolerância. No presente trabalho, a tolerância foi estabelecida em 10^{-4} .

2.2 Fluxo de Potência Intervalar

As etapas do fluxo de potência polar intervalar, que é baseado no método de Krawczyk descrito anteriormente, são (Pereira et al., 2012):

Passo 1: As tensões pontuais, obtidas através do fluxo de potência determinístico, são utilizadas como ponto de partida para o fluxo de potência intervalar e são consideradas como os pontos médios das tensões intervalares iniciais;

Passo 2: Definir as variações percentuais das demandas;

Passo 3: Inicializar o perfil das tensões intervalares, onde o ponto médio do intervalo é a solução pontual, e o seu raio é ponto médio multiplicado pela maior variação percentual definida no **Passo 2**;

Passo 4: Calcular os resíduos de potências ativa e reativa;

Passo 5: Aplicar o operador Krawczyk conforme equação (1);

Passo 6: Obter o novo perfil das tensões intervalares conforme equação (2);

Passo 7: Testar a convergência. Não havendo convergência retornar ao Passo 5. Caso contrário, proceder para o próximo passo.

Passo 8: Cálculo das perdas na forma intervalar.

A perda intervalar em um trecho km é calculada da seguinte forma:

$$L_{km}^i = L_{km}^d + \Delta L_{km}^i \quad (3)$$

Em que L_{km}^i é a perda intervalar no trecho km ; L_{km}^d é a perda determinística no trecho km e ΔL_{km}^i é o incremento intervalar de perda do trecho km . O incremento intervalar de perda ΔL_{km}^i é calculado em função dos resíduos de potência intervalares.

A perda total anual de energia intervalar (L_e^i) consiste em uma das parcelas da função objetivo a ser minimizada no presente trabalho, formulada como:

$$L_e^i = \left(\sum_{km=1}^{NLIN} L_{km}^i \right) \cdot \alpha \quad (4)$$

Em que $NLIN$ é o número de linhas do sistema e α é o número de horas em um ano (8760h).

2.3 Metodologia de Comparação de Intervalos

A metodologia de comparação de intervalos (Oliveira et al., 2016) é de fundamental importância no método por ser responsável por avaliar a qualidade das soluções candidatas para o problema do planejamento de redes de distribuição. Essa metodologia utiliza a definição de uma função de ordenação μ dada pela equação (5).

$$\mu(A, B) = \begin{cases} m_B - m_A + 2 \cdot \text{sgn}(m_B - m_A), & \text{Se } r_B + r_A = 0 \\ \frac{m_B - m_A}{r_B + r_A} + \text{sgn}(m_B - m_A), & \text{Se } m_A \neq m_B \text{ e } r_B + r_A \neq 0 \\ \frac{r_B - r_A}{\max\{r_B, r_A\}}, & \text{Se } m_A = m_B \text{ e } r_B + r_A \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Em que A e B são dois intervalos genéricos e m_A , m_B , r_A , r_B são as médias e os raios desses intervalos, respectivamente. sgn é a função sinal.

A partir disso, pode-se definir a relação de ordem " $<_\mu$ " como sendo:

$$A <_\mu B, \text{ se e somente se, } \mu(A, B) > 0 \quad (6)$$

3 Formulação do Problema

O objetivo da metodologia proposta é minimizar os custos de investimento em cabos e os custos associados às perdas de energia dos sistemas, tudo isso levando em conta as incertezas inerentes da demanda. A formulação do problema é descrita abaixo:

$$\begin{aligned} \text{MinFOB} = & \sum_{km=1}^{NLIN} \sum_{a=1}^{NC} (Cl_a \cdot l_{km} \cdot x_{km,a}) \\ & + \delta \cdot VP \sum_{km=1}^{NLIN} \sum_{a=1}^{NC} x_{km,a} \cdot L_{km}^i \end{aligned} \quad (7)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^{NBAR} \left[\left(Pg_k^d - Pd_k^i - \sum_{m \in \Omega_k} x_{km,a} \cdot P_{km}^i = 0 \right) \right] \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^{NBAR} \left[\left(Qg_k^d - Qd_k^i - \sum_{m \in \Omega_k} x_{km,a} \cdot Q_{km}^i = 0 \right) \right] \quad (9)$$

$$L_{km}^d = g_{km} \cdot \left[(V_k^d)^2 + (V_m^d)^2 - 2 \cdot V_k^d \cdot V_m^d \cdot \cos(\theta_{km}^d) \right] \quad (10)$$

$$x_{km} = 0 \text{ ou } 1 \quad (11)$$

$$Pd_k^i = [Pd_k^{inf}; Pd_k^{sup}] \quad (12)$$

$$Qd_k^i = [Qd_k^{inf}; Qd_k^{sup}] \quad (13)$$

$$V_k^i = [V_k^{inf}; V_k^{sup}] \quad (14)$$

$$V_k^{inf} \geq V_k^{min}; V_k^{sup} \leq V_k^{max} \quad (15)$$

$$\sum_{km=1}^{NLIN} \sum_{a=1}^{NC} (x_{km,a}) = NBAR - NSUB \quad (16)$$

$$\delta = \alpha \cdot \varphi \cdot CL \quad (17)$$

$$VP = \frac{(1 + \tau)^T - 1}{\tau \cdot (1 + \tau)^T} \quad (18)$$

Em que FOB é a função objetivo do problema; NC , o número de tipos de cabos; $NLIN$, número de circuitos factíveis; Cl_a , o custo de investimento do cabo por quilômetro do tipo a (\$/km); l_{km} , o comprimento do circuito do trecho km ; $x_{km,a}$, valor associado ao investimento ou não de cabo do tipo a no trecho km ; Pg_k^d e Qg_k^d , gerações de potência ativa e reativa determinísticas, respectivamente, na barra k ; Pd_k^i e Qd_k^i , demandas de potência ativa e reativa intervalares, respectivamente, na barra k ; P_{km}^i e Q_{km}^i , fluxos de potência ativa e reativa intervalares, respectivamente, na trecho km ; Ω_k , conjunto de barras vizinhas à barra k excluindo-se k ; g_{km} , condutância do trecho km ; V_k^d e V_k^i , módulos de tensão determinística e intervalar, respectivamente, na barra k ; θ_{km}^d , ângulo de fase determinístico entre as barras k e m ; V_k^{min} e V_k^{max} , limites mínimo e máximo, respectivamente, do módulo de tensão na barra k ; $NBAR$, número de barras do sistema; $NSUB$, número de substituições do sistema; α , número de horas no ano; φ , fator de perda dos circuitos; CL , custo de perda de energia. (\$/kWh); τ , taxa de juros anual e T é o horizonte de planejamento em anos.

A equação (7) representa a função objetivo do problema de otimização, constituída de uma parcela que representa os custos referentes ao investimento em cabos e outra parcela referente ao custo de perdas de energia na forma intervalar atualizadas para o valor presente. As restrições (8) e (9) estabelecem os balanços de potência ativa e reativa, respectivamente, em cada barra. As demandas de carga ativa e reativa

são representadas pelas variáveis intervalares Pd_k^i e Qd_k^i , respectivamente, a fim de modelar as incertezas quanto a estes parâmetros. A perda de potência determinística em um trecho km é formulada em (10).

O tratamento discreto das variáveis de investimento ou não na construção da linha com o cabo do tipo a é representado em (11), em que os valores '1' e '0' para x_{km} indicam linha do trecho km construída com o cabo do tipo a e não construída, respectivamente.

Os limites das variáveis intervalares de entrada Pd_k^i e Qd_k^i , e de saída $V_{k,u}^i$ são representados em (12), (13) e (14), respectivamente, sendo que os limites de Pd_k^i e Qd_k^i são obtidos de acordo com o nível de incerteza na demanda estabelecido. Por fim, os intervalos das variáveis V_k^i devem atender aos respectivos limites de tensão nodal de acordo com (15), conforme requisitos operacionais dos sistemas. A restrição (16) é a condição necessária para que o sistema seja radial e conexo. A equação (18) é responsável por trazer para o valor presente o custo intervalar de perdas de energia no horizonte de planejamento.

4 Metodologia Proposta

O algoritmo de otimização utilizado no presente trabalho para a avaliação proposta de impactos de incertezas no problema de planejamento de alimentadores em redes de distribuição é denominado CLONR (Oliveira et al., 2014). A Figura 1 apresenta o fluxograma do algoritmo CLONR, cujos passos são resumidos na sequência.

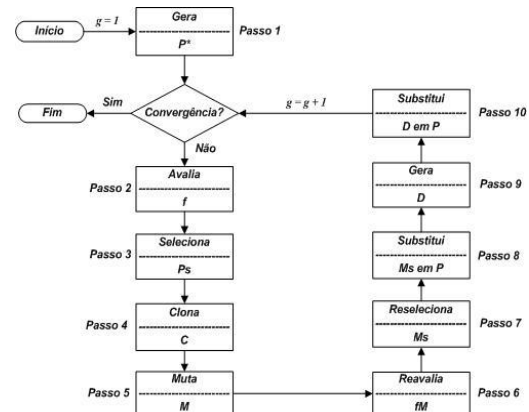


Figura 1. Fluxograma do algoritmo CLONR

- (1) *Geração do conjunto inicial de anticorpos ou soluções candidatas P^* .*
- (2) *Avaliação da afinidade f dos anticorpos de P^* .*
- (3) *Seleção dos melhores anticorpos de P^* :* Forma-se o conjunto P_s . Neste passo, a metodologia de comparação de intervalos é utilizada.
- (4) *Clonagem dos anticorpos do conjunto P_s :* Gera-se o conjunto C .
- (5) *Hipermutação Somática dos anticorpos de C :* Forma-se o conjunto de clones maduros M .
- (6) *Avaliação da afinidade fM dos anticorpos de*

M .

(7) *Seleção dos melhores anticorpos de M* : Forma-se o conjunto M_S através da metodologia de comparação de intervalos.

(8) *Substituição de anticorpos de P^* pelos anticorpos de M_S* .

(9) *Edição de receptores: Geração do conjunto D com d receptores*.

(10) *Substituição de anticorpos de P^* pelos anticorpos de D* .

Após a execução do passo (10), uma geração do algoritmo CLONR é contabilizada e o critério de convergência é verificado. A convergência do algoritmo é obtida quando o número de gerações (g) atinge um valor máximo igual a 120, ou a melhor solução do repertório P^* permanece inalterada durante um número de gerações igual a 40.

A Tabela 1 apresenta a codificação do problema de planejamento de redes de distribuição via algoritmo CLONR.

Tabela 1. Representação do problema via CLONR.

CLONR	Associação com o Planejamento de redes de distribuição
Anticorpo	Configuração de rede candidate
Tamanho do anticorpo	Número total de rotas factíveis
Atributo	Construção ou não da linha com o cabo do tipo α ('0' ou 'tipo α ')
Afinidade	Inversamente proporcional ao valor da função objetivo formulada em (7)

5 Estudos de Caso

Dois estudos de caso, utilizando os sistemas de 9 barras (Falaghi et al., 2011) e de 23 barras (Nahman and Peric, 2008), são apresentados a fim de avaliar a metodologia proposta para o planejamento de redes de distribuição utilizando fluxo de potência intervalar e a técnica meta-heurística SIA. Com o objetivo de avaliar o desempenho do algoritmo proposto, uma análise comparativa é realizada com os resultados apresentados por outros métodos da literatura que utilizam fluxo de potência determinístico. As topologias ótimas obtidas pelos métodos determinísticos são avaliadas pela metodologia intervalar proposta para a comparação dos resultados, a fim de se avaliar o impacto da representação de incertezas no problema de planejamento de redes de distribuição.

Os limites de tensão utilizados são 0,9 e 1,05 pu, conforme módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2015).

As demandas intervalares utilizadas para os sistemas em estudo são obtidas através de variações percentuais assimétricas das demandas ativas e reativas nas barras. Além disso, essas variações são diferentes entre as barras do sistema (Zhang et al., 2012).

Simulações de Monte Carlo são utilizadas para a validação dos resultados encontrados através da metodologia intervalar proposta. Um milhão de simulações são efetuadas para cada sistema em estudo.

Para cada estudo de caso, foram realizadas dez execuções do algoritmo e, nestas dez execuções, a mesma solução foi obtida. A metodologia proposta foi desenvolvida no ambiente MATLAB utilizando a biblioteca INTLAB, que é específica para a matemática intervalar.

5.1 Sistema de 9 barras

O sistema de distribuição de 9 barras (Falaghi et al., 2011), é uma rede de distribuição de 33kV, alimentada por uma subestação de 40MVA, que alimenta uma área que possui 8 barras de carga. As rotas viáveis propostas para esse sistema são mostradas na Figura 2.

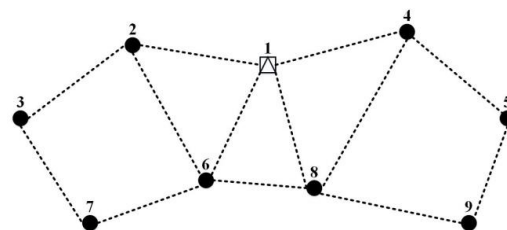


Figura 2. Possíveis trechos de construção de cabos – 9 barras

A Tabela 2 apresenta as características dos dois tipos de cabos utilizados no estudo do planejamento do sistema de 9 barras.

Tabela 2. Dados dos condutores, Sistema de 9 barras.

Tipo	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Custo (US\$/km)
1	0,1738	0,2819	100.000
2	0,0695	0,2349	150.000

Para os testes realizados, o custo de perdas de energia (CL) é de 0,05 US\$/kWh, o fator de perdas (φ) é 0,35, a taxa de juros (τ) é 0,1 e o período de planejamento é de 20 anos.

Para obtenção das demandas intervalares para este sistema, variações percentuais foram sorteadas para cada barra e cada limite de demanda, superior e inferior, de forma independente, até uma variação de 50% que conduziu a um impacto no problema de planejamento.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos pela metodologia intervalar proposta e pela abordagem determinística obtida substituindo-se o fluxo de potência intervalar pelo fluxo de potência determinístico. Nota-se que a metodologia intervalar proposta encontra uma configuração de rede diferente daquela encontrada pela metodologia determinística. As linhas que se alteram entre as duas metodologias estão destacadas em negrito na Tabela 3. Portanto, a incerteza na demanda impacta na solução otimizada do problema de planejamento da rede de distribuição neste caso.

Sobre o valor da função objetivo, verifica-se que a solução intervalar proposta apresenta custo médio (9,4523MUS\$) e raio de custo (0,3647MUS\$) meno-

res do que o custo médio (9,4839MUS\$) e raio de custo (0,4613MUS\$) da solução pela metodologia determinística, respectivamente. O tempo médio do algoritmo CLONR para as dez execuções efetuadas neste caso foi de 110,8 segundos.

Tabela 3. Resultados obtidos para o sistema de 9 barras.

	Metodologia Intervalar	Metodologia Determinística
Linhas com o cabo 1	1-2;1-4;1-6;6-8; 4-5;5-9;3-7;6-7	1-2;1-4;1-6;6-8; 5-9; 8-9;3-7;6-7
Linhas com o cabo 2	Nenhuma	Nenhuma
Linhas Abertas	1-8;2-6;4-8; 8-9;2-3	1-8;2-6;4-8; 4-5;2-3
Valor da FOB (MUS\$)	[9,0876;9,8170]	[9,0227;9,9452]
Média FOB (MUS\$)	9,4523	9,4839
Raio FOB (MUS\$)	0,3647	0,4613

Para validar a metodologia utilizada, a Tabela 4 apresenta um quadro comparativo entre os intervalos obtidos pelo método intervalar e pela técnica de simulação de Monte Carlo. A quarta e quinta colunas apresentam os erros relativos entre a matemática intervalar utilizada e a simulação de Monte Carlo para os limites inferior e superior dos intervalos, respectivamente.

Tabela 4. Comparação com a simulação de Monte Carlo, Sistema de 9 barras.

	Cálculo	Valor da FOB (MUS\$)	E_{inf} (%)	E_{sup} (%)
Metodologia Intervalar	Fluxo Intervalar	[9,0876;9,8170]	0,1022	1,5692
	Monte Carlo	[9,0969;9,9735]	-	-
Metodologia Determinística	Fluxo Intervalar	[9,0227;9,9452]	0,0965	1,2589
	Monte Carlo	[9,0140;10,072]	-	-

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 4 que os erros relativos são inferiores a 2% neste caso. A simulação de Monte Carlo comprova que a metodologia intervalar proposta resulta em menores médias e raios para os valores da função objetivo em relação à modelagem determinística.

5.2 Sistema de 23 barras

O sistema de distribuição de 23 barras (Nahman and Peric, 2008), é uma rede de distribuição de 34,5kV, alimentada por uma subestação de 10MVA, que alimenta uma área que possui 21 barras de carga e uma barra de passagem. As rotas viáveis propostas para esse sistema são mostradas na Figura 3.

A Tabela 5 apresenta as características dos dois tipos de cabos utilizados no estudo do planejamento

do sistema de 23 barras. Ambos os cabos são de alumínio.

O custo de perdas de energia (CL), o fator de perdas (φ), a taxa de juros (τ) e o período de planejamento são os mesmos utilizados para o sistema de 9 barras.

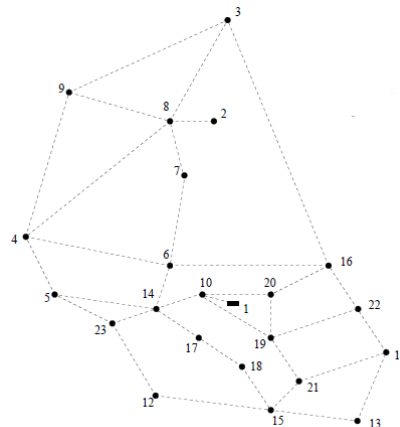


Figura 3. Possíveis trechos de construção de cabos – 23 barras

Tabela 5. Dados dos condutores, Sistema de 23 barras.

Tipo	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Custo (US\$/km)
1	0,6045	0,4290	10.000
2	0,3017	0,4020	40.000

Na obtenção das demandas intervalares para este sistema, a variação percentual máxima de 60% foi a que conduziu a um impacto no problema de planejamento.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos pela metodologia intervalar proposta e por outro método, que utiliza um fluxo de potência determinístico para avaliação das soluções candidatas. Nota-se que a metodologia intervalar proposta encontra uma configuração de rede diferente daquela encontrada pelo método determinístico (Lavorato et al., 2010). As linhas que se alteram entre as duas metodologias estão destacadas em negrito na Tabela 5. Portanto, a incerteza na demanda também impacta na solução ótima do problema de planejamento da rede de distribuição neste caso.

Verifica-se também, para este caso, que a solução intervalar proposta apresenta custo médio (0,1737MUS\$) e raio de custo (0,0172MUS\$) menores do que o custo médio (0,1738MUS\$) e raio de custo (0,0176MUS\$) da solução da referência (Lavorato et al., 2010). O tempo médio do algoritmo CLONR para as dez execuções efetuadas neste caso foi de 713,5 segundos.

A Tabela 7 apresenta o quadro comparativo entre a metodologia intervalar e a técnica de simulação de Monte Carlo.

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 7 que os erros relativos são inferiores a 6% neste caso. A simulação de Monte Carlo comprova que a metodologia intervalar proposta resulta em menores

médias e raios para os valores da função objetivo em relação ao método determinístico.

Tabela 6. Resultados obtidos para o sistema de 23 barras.

	Metodologia Intervalar	Lavorato et al., 2010
Linhas com o cabo 1	1-10;2-8;3-9;4-5; 5-23;6-7;6-14; 7-8;8-9;10-14; 10-19;10-20; 11-13;11-21; 12-23;14-17; 14-23;15-21; 16-20;17-18; 19-21;19-22	1-10;2-8;3-9;4-5; 5-23;6-7;6-14; 7-8;8-9;10-14; 10-19;10-20; 11-13;11-21; 12-23;14-17; 14-23;15-18; 16-20;17-18; 19-21;19-22;
Linhas com o cabo 2	Nenhuma	Nenhuma
Linhas Abertas	3-8;3-16;4-6;4-8; 4-9;5-14;6-16; 11-22;12-15; 13-15;15-18; 16-22;19-20	3-8;3-16;4-6;4-8; 4-9;5-14;6-16; 11-22;12-15; 13-15;15-21; 16-22;19-20
Valor da FOB (MUS\$)	[0,15651;0,19094]	[0,15619;0,19130]
Média FOB (MUS\$)	0,17372	0,17374
Raio FOB (MUS\$)	0,017211	0,017551

Tabela 7. Comparação com a simulação de Monte Carlo, Sistema de 23 barras.

	Cálculo	Valor da FOB (MUS\$)	E_{inf} (%)	E_{sup} (%)
Metodologia Intervalar	Fluxo Intervalar	[0,15651;0,19094]	5,3462	3,0938
	Monte Carlo	[0,16535;0,18521]	-	-
Lavorato et al., 2010	Fluxo Intervalar	[0,15619;0,19130]	5,1266	2,7287
	Monte Carlo	[0,16537;0,18501]	-	-

6 Conclusões

Este artigo apresentou uma metodologia para avaliação de impactos de incertezas de demanda de redes de distribuição no problema de planejamento de alimentadores. A metodologia baseia-se na combinação de matemática intervalar, através de fluxo de potência intervalar para avaliar as opções de planejamento, com a meta-heurística sistemas imunológicos artificiais. Os estudos de caso realizados permitiram comprovar que a representação de tais incertezas impacta na topologia otimizada da rede de distribuição, que minimiza o custo total intervalar associado. Por considerar tais incertezas, a solução proposta é mais realista e aderente ao comportamento real da carga destas redes, e minimiza o intervalo provável do custo total em relação a métodos determinísticos. O algoritmo utilizado permite atender as restrições do modelo de otimização proposto com eficácia e tempos viáveis de processamento.

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem o apoio do CNPq, FAPEMIG, CAPES, INERGE e do grupo de pesquisa “Otimização Heurística e Bio-inspirada” da UFJF.

Referências Bibliográficas

- Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2015). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_6_Retificação_1.pdf Acesso em 1 de julho de 2015.
- Falaghi, H; Singh, C; Haghifam, M.R. and Ramezani, M (2011). DG integrated multistage distribution system expansion planning. Electrical Power and Energy Systems, Vol.33, No. 8; pp. 1489- 1497.
- Ganguly, S; Sahoo, N.C. and Das, D. (2013). Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming. Electrical Power and Energy Systems, Vol.46; pp. 65- 78.
- Gönen, T. (1986). Electric Power Distribution System Engineering. 1nd ed., Ed. New York: McGraw-Hill.
- Lavorato, M; Rider, M. J; Garcia, A. V and Romero, R. (2010). A Construtive Heuristic Algoritmo for Distribution System Planning. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 25, No. 3, pp. 1734- 1742.
- Nahman, J.M. and Peric, D.M (2008). Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique. IEEE Transactions on Power Systems, Vol.23, No. 2, pp. 790- 795.
- Oliveira, L.W; Oliveira, E. J; Gomes, F.V; Silva Jr, I. C; Marcato, A.L.M. and Resende, P.V.C. (2014). Artificial immune systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization. Int. J. Electr. Power Energy Systems, vol. 56, pp. 64- 74.
- Oliveira, L.W; Seta, F.S. and Oliveira, E.J. (2016). Optimal reconfiguration of distribution systems with representation of uncertainties through interval analysis. Electrical Power and Energy Systems, Vol.83; pp. 382- 391.
- Pereira, L.E.S; Da Costa, V. M. and Rosa A.L.S. (2012). Interval arithmetic in current injection power flow analysis. Int. J. Electr. Power Energy Systems, vol. 43, pp. 1106-1113.
- Zhang, P; Li, W. and Wang, S. (2012). Reliability-oriented distribution network reconfiguration considering uncertainties of data by interval analysis. Electrical Power and Energy Systems, Vol.34, No. 1; pp. 138- 144.