

Representação Nó-Profundidade Aplicada aos Estudos Elétricos para Recomposição de uma Rede de Distribuição Universitária

Francisco S. de Oliveira Neto, Ruth P. S. Leão, Raimundo F. Sampaio, Lucas S. Melo, Mapse B. F. Filho e Tales M. Tavares.

Departamento de Engenharia Elétrica / Grupo de Redes Elétricas Inteligentes
Universidade Federal do Ceará
Fortaleza – CE, Brasil

neto@dee.ufc.br, rleao@dee.ufc.br, rfurtado@dee.ufc.br, lucassmelo@dee.ufc.br, mapse.b@hotmail.com e tales95@yahoo.com.br

Resumo — Este trabalho tem como objetivo apresentar a metodologia para modelagem da nova configuração da rede elétrica do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC) em Representação Nó-Profundidade (RNP), uma estrutura de dados eficiente para estudos de sistemas elétricos de distribuição. A topologia proposta, constituída de religadores, chaves de encontro de alimentadores e dispositivos indicadores de faltas (inexistentes atualmente), proporciona alternativas de recomposição, além de viabilizar o desenvolvimento e a implantação futura de funções de automação típicas de uma Rede Elétrica Inteligente (REI), como por exemplo, sistemas de recomposição automática (SRA) e proteção adaptativa (SPA). Após o mapeamento em RNP, foram realizados estudos de fluxo de carga, curto-circuito e das proteções da rede Pici, na condição normal de operação e em contingência. Verificou-se que foram possíveis duas alternativas de recomposição, nas quais os níveis de tensão se mantiveram dentro dos limites regulamentados como adequados, não havendo sobrecarga dos condutores.

Palavras-chave — Estudos elétricos, recomposição, redes de distribuição de energia elétrica, redes inteligentes, representação nó-profundidade.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) da Universidade Federal do Ceará (UFC) tem investido em pesquisa, desenvolvimento e inovação para modernização da rede elétrica do Campus do Pici desta instituição de ensino, doravante denominada rede Pici, utilizando seu sistema elétrico como verdadeiro laboratório de estudo.

A rede Pici é suprida em média tensão, 13,8 kV, por meio de um único alimentador de distribuição oriundo do sistema elétrico da Companhia Energética do Ceará (Coelce) que atende a outros consumidores. Apresenta baixa confiabilidade por possuir topologia radial, ser aérea, possuir apenas uma proteção geral sem função de religamento e cruzar diversos pontos arborizados. Um dos objetivos do GREI é transformar esta rede em uma rede inteligente composta de funções

avancadas de automação. Neste sentido, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos [1]-[2].

Este artigo tem como objetivo apresentar um novo arranjo topológico radial com recurso para a rede Pici, composto de religadores, chaves de encontro de alimentadores e dispositivos indicadores de faltas, para desenvolvimento e implantação futura de um sistema de recomposição automática e um sistema inteligente de mudança de grupo de ajustes das proteções. Para implantação destas funções avançadas de automação, faz-se necessário realizar os estudos de fluxo de carga, curto-circuito e das proteções da rede, considerando os vários cenários de recomposição. Para realizar estes estudos optou-se por modelar a rede elétrica em Representação Nó-Profundidade (RNP) e desenvolver um *software* integrado à RNP para cálculo de curto-circuito, baseado em componentes simétricas, e fluxo de carga, usando o método de varredura direta e inversa. O método de varredura direta e inversa é um dos mais utilizados para cálculo de fluxo de carga em redes de distribuição radial [3]-[4].

O artigo está estruturado em cinco sessões: na seção II é descrita a metodologia aplicada à modelagem da rede Pici em RNP e aos cálculos elétricos; na seção III é apresentada a análise dos resultados obtidos para os cenários possíveis de recomposição da rede Pici utilizando RNP; na seção IV é realizado o estudo das proteções, e por fim, as conclusões são mostradas na seção V.

II. METODOLOGIA

A. Arranjo proposto para a rede elétrica do Campus do Pici

A rede elétrica atual do campus do Pici é totalmente aérea e suprida em média tensão, em 13,8 kV, possui topologia radial com recurso manual (dotada de chaves seccionadoras manuais), aproximadamente 6,3 km de extensão, potência total instalada de 16.775 kVA e atende a cerca de 13.500 alunos. A proteção geral de entrada é efetuada por um relé secundário digital, sem função de religamento, localizado no

ponto de entrega. Os ramais e transformadores são protegidos por chaves fusíveis, havendo ainda algumas chaves seccionadoras manuais distribuídas ao longo da rede para eventuais necessidades de manobras. Diversos pontos do *campus* apresentam muitas árvores próximas à rede, necessitando periodicamente de serviços de poda.

Dessa forma, o sistema apresenta baixa confiabilidade, tendo em vista que, mesmo uma falta temporária em qualquer ponto do tronco de alimentadores proporciona a atuação da proteção geral, desenergizando todo o *campus*.

Na Fig. 1 é apresentado o diagrama unifilar proposto para a rede Pici, ilustrando as principais unidades do *campus*, a alocação de indicadores de falta e dos equipamentos normalmente abertos (NA) e fechados (NF). Conforme ilustrado na figura, o sistema elétrico evoluiu de uma topologia radial com recurso manual para uma topologia radial com recurso automático, composta de um disjuntor geral (DJ), quatro religadores NF, dois religadores NA para transferência de carga em caso de manutenção ou após uma falta permanente, oito conjuntos indicadores de falta e as chaves seccionadoras NF a montante destes. A definição da alocação dos religadores foi baseada na quantidade de alunos matriculados por unidade acadêmica.

Conforme representado na Fig. 1, a rede Pici foi dividida em cinco setores de carga (A – E). Neste artigo o termo *setor* refere-se a blocos de cargas separados por equipamentos de interrupção. Esta divisão é necessária para a análise do comportamento da rede nas condições normal e de contingência bem como para o estudo das proteções mostrado adiante.

ordenados $E(G)$ chamados *arestas*. Dessa forma, representa-se matematicamente um grafo por $G = (N, E)$. Para o entendimento da RNP faz-se necessário entender os seguintes conceitos: *caminho* (sequência de nós em que uma única aresta associa dois nós diferentes), *ciclo* (caminho em que o nó inicial e o nó final são iguais), *par conexo* (par de nós em que há pelo menos um caminho entre eles), *grafo conexo* (quando todos os seus pares de nós são conexos), *árvore* (grafo acíclico e conexo), *floresta* (conjunto de árvores), *nó raiz* (nó de uma árvore tomado como referência) e *profundidade de um nó em uma árvore* (número de arestas do caminho formado entre este nó e o nó raiz).

Para um grafo representar um sistema de distribuição radial ele deve ser conexo e acíclico, ou seja, todos os elementos devem ser ligados por caminhos e não deve haver ciclos. Portanto, a RNP é uma codificação de árvore de grafos baseada nos conceitos de nó e profundidade de um nó nesta árvore, consistindo basicamente de uma lista linear contendo os nós da árvore e suas respectivas profundidades, formando pares do tipo (n_x, p_x) , onde n_x é o nó da árvore e p_x a profundidade do nó. A ordem em que os pares são listados é importante. A representação de uma árvore em RNP é obtida por meio de um algoritmo de busca em profundidade no grafo a partir do nó raiz. Dessa forma, um par do tipo (n_x, p_x) é inserido na lista quando o nó n_x é visitado pela busca, iniciada pelo nó raiz.

A representação de um sistema de distribuição radial por grafos compreende a modelagem em dois níveis: *RNP de alimentador* e *RNP de setor*. Na RNP de alimentador, a rede é representada da seguinte forma: alimentadores são árvores, equipamentos de interrupção (disjuntores, religadores ou chaves) são arestas, setores (blocos de cargas separados por equipamentos de interrupção) são nós e as subestações ou pontos de entrega são nós raízes. Na RNP de setor, os nós são representados pelas barras de carga ou pelos pontos de derivação, enquanto as arestas são trechos da rede entre um nó e uma chave. As RNP de alimentador proporciona uma visão macro da rede elétrica visando a sua recomposição, enquanto a RNP de setor proporciona a representação de todas as barras de carga, sem simplificações, o que permite a realização de cálculos elétricos de fluxo de carga e curto-circuito necessários à análise de recomposição.

Na Fig. 2 é mostrada a árvore de grafo representativa da rede Pici para a condição normal de operação, na qual são detalhados os nós e arestas.

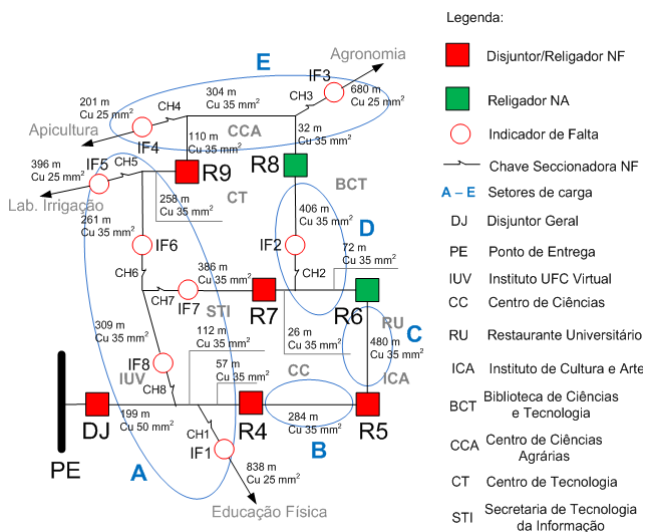


Figura 1. Diagrama unifilar da rede Pici proposta.

B. Representação Nó-Profundidade da Rede Pici

Grafos podem ser utilizados de forma eficiente em estudos elétricos por meio da codificação de redes de distribuição radiais em Representação Nó-Profundidade (RNP) [5]. Um grafo G consiste em um conjunto finito de elementos $N(G)$, chamados *nós* e em um conjunto finito de elementos não

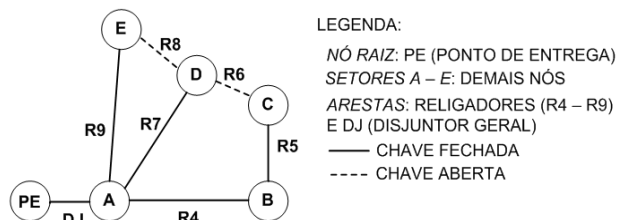


Figura 2. Representação em árvore de grafo da rede Pici – Condição normal de operação.

Computacionalmente a RNP de uma árvore consiste de uma matriz $2 \times n$, em que n é o número de nós. A primeira linha exibe os nós da árvore e a segunda linha, as profundidades desses nós. Na Fig. 3 é apresentada a RNP de alimentador da rede Pici na condição normal, denotada por T_1 .

$$T_1 = \begin{bmatrix} \text{nó} \\ \text{profundidade} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{PE} & A & B & C & D & E \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

Figura 3. RNP de alimentador da árvore de grafo da rede Pici na condição normal.

Um diagrama ilustrativo da rede Pici é mostrado na Fig. 4 com o mapeamento dos nós de carga e de passagem, setores e religadores.

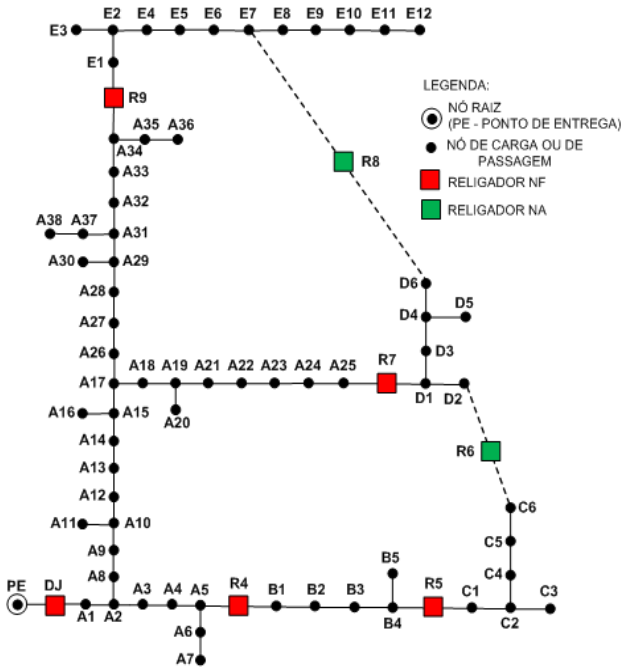


Figura 4. Representação da Rede Pici com os nós de carga e de passagem para a condição normal.

Conforme indicado na Fig. 4, foram codificados os quatro religadores NF (representados por quadrados vermelhos), os dois religadores NA (quadrados verdes) e sessenta e oito nós (círculos pretos) distribuídos nos setores A, B, C, D e E. Os indicadores de falta não foram considerados em todas as RNPs deste trabalho, o que não interfere na consecução dos objetivos propostos inicialmente.

As RNPs de setor para a operação normal estão exibidas na Fig. 5. Cada RNP de setor é identificada como B_{XY} em que X é o setor em estudo e Y é o setor pelo qual a energia elétrica chega ao setor X . Dessa forma, conforme mostrado na Fig. 5, a RNP B_{BA} denota que o setor B é alimentado pelo setor A tendo A5 como o nó raiz.

$$B_{APE} = \begin{bmatrix} PE & A1 & A2 & A3 & A4 & A5 & A6 & A7 & A8 & A9 & A10 & A11 & A12 & \dots \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 3 & 4 & 5 & 6 & 6 & \dots \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \dots & A13 & A14 & A15 & A16 & A17 & A18 & A19 & A20 & A21 & A22 & A23 & \dots \\ \dots & 7 & 8 & 9 & 10 & 10 & 11 & 12 & 13 & 13 & 14 & 15 & \dots \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \dots & A24 & A25 & A26 & A27 & A28 & A29 & A30 & A31 & A32 & A33 & A34 & \dots \\ \dots & 16 & 17 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 15 & 16 & 17 & 18 & \dots \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \dots & A35 & A36 & A37 & A38 \\ \dots & 19 & 20 & 16 & 17 \end{bmatrix}$$

$$B_{BA} = \begin{bmatrix} A5 & B1 & B2 & B3 & B4 & B5 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix}$$

$$B_{CB} = \begin{bmatrix} B4 & C1 & C2 & C3 & C4 & C5 & C6 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix}$$

$$B_{DA} = \begin{bmatrix} A25 & D1 & D2 & D3 & D4 & D5 & D6 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

$$B_{EA} = \begin{bmatrix} A34 & E1 & E2 & E3 & E4 & E5 & E6 & E7 & E8 & E9 & E10 & E11 & E12 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 \end{bmatrix}$$

Figura 5. RNPs dos setores A – E para a condição normal.

C. Fluxo de Carga da Rede Pici

Os métodos mais comuns para o cálculo de fluxo de carga, como Newton-Raphson e Desacoplado Rápido, não mostram bons resultados quando aplicados a redes de distribuição radial. Como a rede Pici apresenta característica radial, torna-se vantajoso aplicar o método de varredura direta e inversa para cálculo de fluxo de potência baseado em RNP. Além disso, a RNP e seus operadores produzem configurações de redes exclusivamente factíveis, com os nós já ordenados no sentido do fluxo, isto é, da subestação ou ponto de entrega para as cargas, condição necessária ao método de varredura direta e inversa. Dessa forma, executar algoritmos de fluxo de carga por varredura direta e inversa usando RNP é computacionalmente eficiente.

Existem algumas variações deste método, como por exemplo, o *Power Summation Mode (PSM)* e o *Current Summation Mode (CSM)* [3]-[4]. Neste trabalho foi utilizado o método *PSM* para o cálculo do fluxo de carga, conforme mostrado no fluxograma da Fig. 6.

Na varredura inversa calculam-se os fluxos de potências ativa e reativa passantes nos trechos do sistema, utilizando as Equações 1 a 4, e na varredura direta calculam-se as tensões nodais complexas da rede, por meio das Equações 5 a 8, até que o critério de convergência, pré-estabelecido pelo usuário, seja atingido, ou que um número máximo de iterações seja alcançado.

No diagrama da Fig. 7 são mostradas as variáveis utilizadas para a realização dos cálculos de fluxo de carga.

$$P_{i-1} = P_i + r_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} + P_{Li} \quad (1)$$

$$Q_{i-1} = Q_i + x_i \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} + Q_{Li} \quad (2)$$

$$P'_i = P_i + P_{Li} \quad (3)$$

$$Q'_i = Q_i + Q_{Li} \quad (4)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (5)$$

$$\delta_{i+1} = \delta_i - \tan^{(-1)}(k_1/k_2) \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{(P_i x_i - Q_i r_i)}{V_i} \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{(P_i r_i - Q_i x_i)}{V_i} \quad (8)$$

Em que,

P_i é o fluxo de potência ativa através do ramo i ;

r_i é a resistência do ramo i ;

Q_i é o fluxo de potência reativa através do ramo i ;

x_i é a reatância do ramo i ;

P_{Li} é a potência ativa da carga na barra i ;

Q_{Li} é a potência reativa na barra i ;

V_i é o módulo da tensão na barra i ; e

δ_i é o ângulo da tensão na barra i .

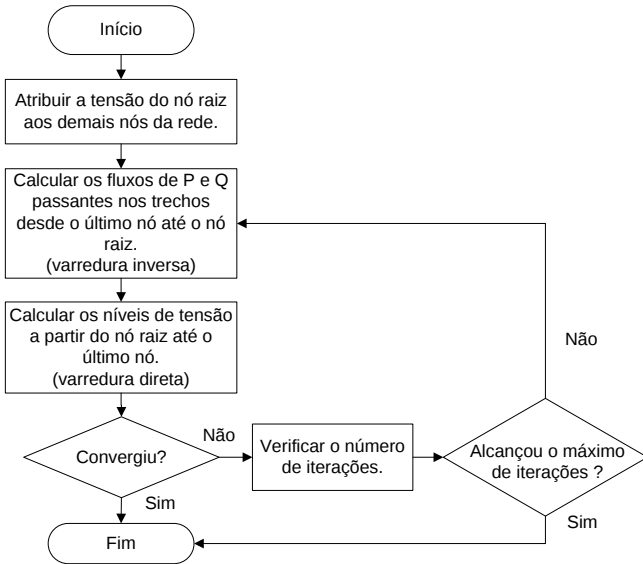


Figura 6. Fluxograma do método PSM.

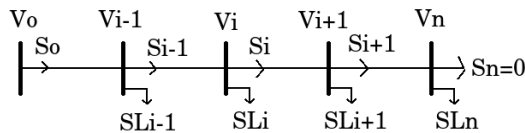


Figura 7. Diagrama unifilar para aplicação do método PSM.

D. Cálculo de Curto-circuito da Rede Pici

Para o cálculo de curto-circuito da rede Pici foi utilizado o método de componentes simétricas de Fortescue aplicado à codificação topológica da rede em RNP, seguindo as etapas: definiu-se o ponto de entrega como sendo o nó raiz e a ele é

atribuído o valor de impedância equivalente reduzida do sistema Coelce; calculou-se a impedância equivalente dos nós com profundidade $i + 1$ (a jusante) somando-se o valor de impedância equivalente do nó com profundidade i (a montante) ao valor de impedância do trecho que interliga esses dois nós; prossegue-se com este cálculo até alcançar os nós de maior profundidade da rede. Os valores de base utilizados para potência, tensão e impedância de contato foram respectivamente 100 MVA, 13,8 kV e 100 Ω .

III. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Utilizando a linguagem de programação Python foi desenvolvido um *software* para o cálculo de fluxo de potência e de curto-circuito da rede Pici com base na estrutura de dados RNP. Os resultados obtidos foram comparados e validados por meio do EasyPower, um *software* comercial com finalidade similar. Estes estudos foram realizados para a condição normal de carga e para uma condição de recomposição do setor C, após uma falta no setor B. Para faltas nos setores A, C, D e E não é possível haver recomposição. Para a falta no setor B, existem duas alternativas de recomposição do setor C: a primeira abrindo os religadores R4 e R5 e fechando o R6; e a segunda abrindo R4, R5 e R7 e fechando R6 e R8.

A Fig. 8 mostra os resultados para a Recomposição 1 e a Fig. 9, os resultados para a Recomposição 2. São apresentados os valores de curto-circuito, fluxo de corrente e níveis de tensão nos trechos considerados relevantes para a recomposição automática e estudos das proteções.

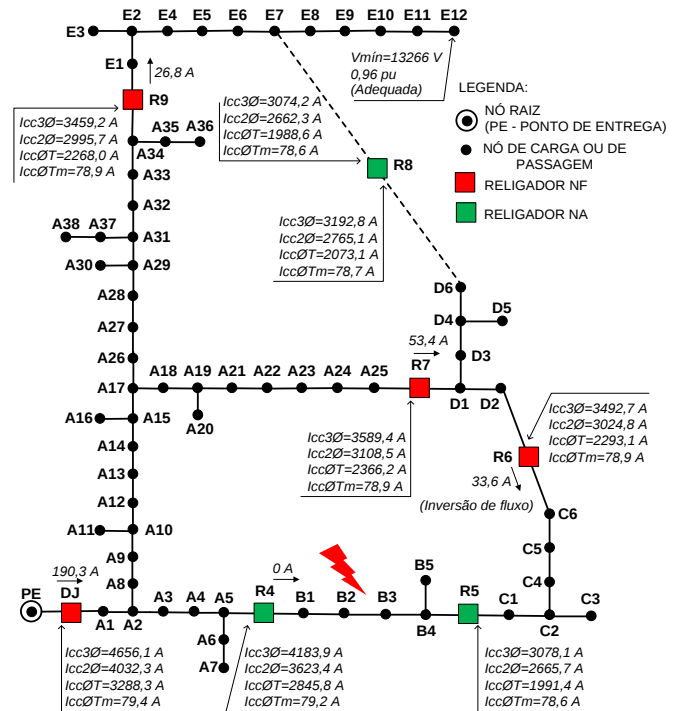


Figura 8. Cenário de Recomposição 1, após uma falta permanente no setor B.

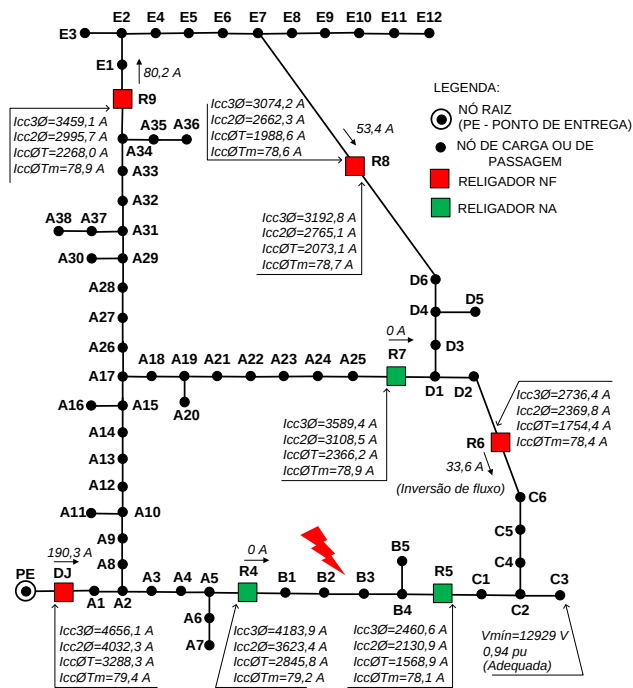


Figura 9. Cenário de Recomposição 2, após uma falta permanente no setor B.

Na Fig. 10 é mostrada a RNP de setor, após a recomposição do setor C, que é a mesma para as duas alternativas.

$$B_{CD} = \begin{vmatrix} D2 & C6 & C5 & C4 & C2 & C1 & C3 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 5 \end{vmatrix}$$

Figura 10. RNP do setor C tendo D2 como o nó raiz após a Recomposição 1 ou 2.

Para análise dos resultados dos níveis de tensão, tomou-se como referência as classificações e os limites estabelecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica): *adequada* (tensão de atendimento entre 0,93 pu e 1,05 pu da tensão nominal da rede); *precária* (tensão de atendimento entre 0,90 pu e 0,93 pu da tensão nominal da rede); e *crítica* (tensão de atendimento menor do que 0,90 pu ou maior do que 1,05 pu da tensão da rede) [6]. Para a condição normal a menor tensão obtida na simulação foi de aproximadamente 13,299 kV (0,96 pu), registrada no nó E12. Na análise da recomposição do setor C foram registrados os piores resultados no nó E12, aproximadamente 13,266 kV (0,96 pu), para a primeira alternativa de recomposição e 12,929 kV (0,94 pu) no nó C3 para a segunda alternativa de recomposição (Fig. 8 e 9). As tensões em todas as condições simuladas apresentaram-se em níveis *adequados*. Nos gráficos ilustrados na Fig. 11 são apresentados os perfis dos níveis de tensão da rede gerados a partir das simulações de recomposição do setor C utilizando o *software* desenvolvido.

Conforme mostram as Fig. 8 e 9, não houve sobrecarga dos condutores (maior corrente de 80,2 A para uma ampacidade de 266 A) nas duas possibilidades de recomposição do setor C, porém para a alternativa de Recomposição 1 é necessário um menor número de manobras, sendo a mais adequada do ponto de vista técnico.

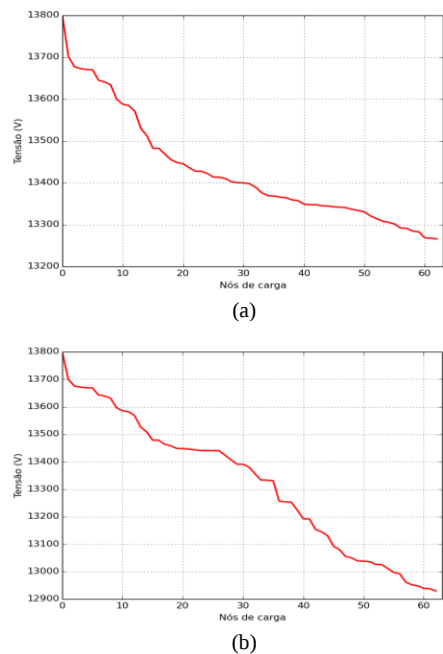


Figura 11. Perfis de tensões nodais após a Recomposição 1 (a) e após a Recomposição 2 (b).

IV. ESTUDO DAS PROTEÇÕES

A partir dos resultados da seção anterior realizou-se o estudo das proteções para a condição normal e para as duas situações possíveis de recomposição da rede Pici, com a finalidade de se determinar os ajustes dos relés numéricos associados aos religadores R4 a R9. Esses relés são do modelo SEL-751, de fabricação da Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). Os ajustes do relé associado ao disjuntor geral de entrada já estavam definidos e implantados. No entanto, para se obter coordenação com os religadores a serem instalados a jusante (ao longo da rede Pici), foi necessário modificar alguns ajustes.

Em todos os cenários analisados foi possível obter coordenação e seletividade entre os relés, porém, por questões de espaço serão mostrados aqui, nas Fig. 12 a 14, apenas os coordenogramas de fase relativos às funções de sobrecorrente instantânea (50) e temporizada (51) para as condições de Recomposição 1 e 2 da rede Pici.

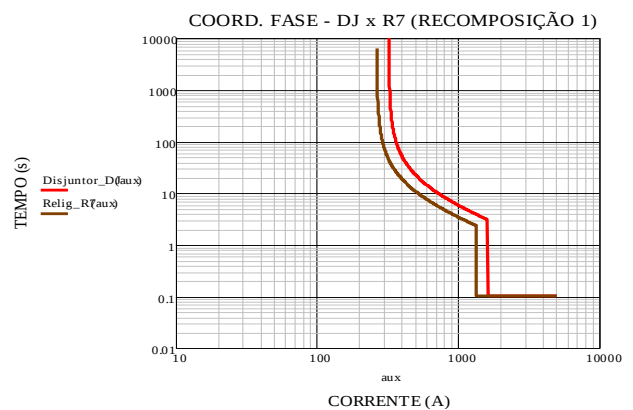


Figura 12. Coordenograma de fase para a condição Recomposição 1 da rede Pici: disjuntor geral DJ e religador R7.

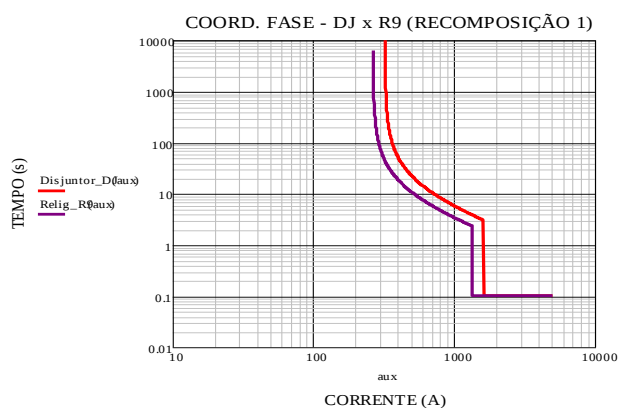


Figura 13. Coordenograma de fase para a condição Recomposição 1 da rede Pici: disjuntor geral DJ e religador R9.

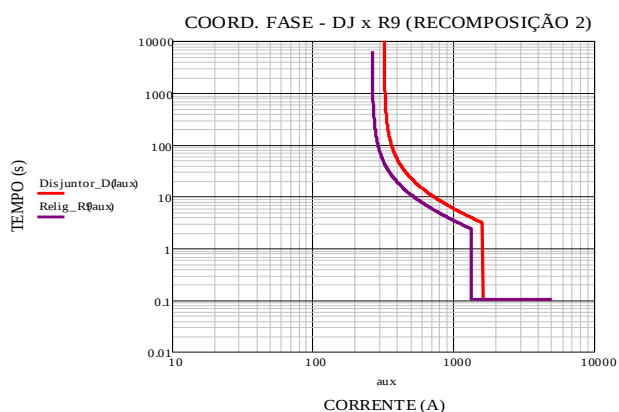


Figura 14. Coordenograma de fase para a condição Recomposição 2 da rede Pici: disjuntor geral DJ e religador R9.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada a modelagem de uma rede elétrica universitária no nordeste do Brasil em RNP, bem como os resultados dos estudos de fluxo de carga e curto-circuito simulado em um *software* desenvolvido em Python para cálculos elétricos baseados em RNP, finalizando com o estudo das proteções para ajuste dos religadores a serem instalados ao longo da rede.

Os cálculos elétricos foram realizados considerando a condição de operação normal e para situações de falta em cada um dos setores da rede Pici, tendo sido verificado que apenas o setor C pode ser recomposto mediante falta no setor B.

O cálculo de fluxo de carga adotado utilizando soma de potências com varredura direta e inversa mostrou que os níveis de tensão, em todas as situações analisadas, mantiveram-se dentro dos limites regulamentados, sendo classificados como adequados.

O estudo de curto-circuito, baseado no conceito clássico das componentes simétricas serviu de subsídio ao estudo das proteções, que proporcionou coordenação e seletividade aos religadores da rede Pici.

As duas recomposições possíveis ocorreram sem sobrecarga dos condutores, sendo observado um carregamento máximo de 30,2%. Dentre as duas possibilidades de restauração do setor C para uma falta no setor B, a alternativa de Recomposição 1 é a mais adequada tecnicamente, pois implica em um menor número de manobras das chaves de encontro de alimentadores.

A codificação da rede Pici em RNP mostrou-se bastante satisfatória, constituindo-se em uma ferramenta eficiente para análise computacional do comportamento da rede perante situações de falta.

Como resultado final, apesar de não ser possível restaurar toda a rede em caso de falta permanente, o arranjo proposto evoluiu de uma topologia radial para uma topologia radial com recurso, propiciando confinamento de trechos faltosos, melhoria e modernização à rede, além de servir como base para o desenvolvimento e implantação futura de funções avançadas de automação e controle, como por exemplo, sistema de recomposição automática e mudança automática de grupo de ajustes das proteções.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Grupo de Redes Elétricas Inteligentes da Universidade Federal do Ceará pelo apoio técnico, material e didático para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] F. S. Oliveira Neto. “Representação Nó-Profundidade Aplicada aos Estudos Elétricos para Recomposição da Rede de Distribuição do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará”, Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- [2] F. A. A. R. Marçal; L. S. Melo; R. F. Sampaio; R. P. S. Leão; G. C. Barroso. “Desenvolvimento de um sistema multiagente para recomposição automática de sistemas elétricos de distribuição”. In: 2013 XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Fortaleza, 2013.
- [3] A. C. Santos, M. Nanni, M. R. Mansour, A. C. B. Delbem, J. B. A. London Jr. e N. G. Bretas. “A Power Flow Method Computationally Efficient for Large-Scale Distributions Systems”, Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, IEEE/PES, pp. 1 – 6, 2008.
- [4] M. R. Mansour. “Algoritmo para obtenção de planos de restabelecimento para sistemas de distribuição de grande porte”. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- [5] A. C. B. Delbem, A. Carvalho, C. A. Policastro, A. K. O. Pinto, K. Honda and A. C. Garcia. “Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design”, In: DEB, K. (Ed.). Genetic and Evolutionary Computation – GECCO 2004. Springer Berlin Heidelberg, pp. 678–687, 2004.
- [6] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. “PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica.” Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8_revisao_1_retaficacao_1.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2015.