



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 10 7669
Tópico: Indicadores e Limites

DETERMINAÇÃO DE VALORES DE REFERÊNCIA PARA INDICADORES DE CONTINUIDADE E DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

IONY PATRIOTA DE SIQUEIRA

COMPANHIA HIDRO ELÉTRICA DO SÃO FRANCISCO

RESUMO

Este informe descreve uma metodologia de cálculo de valores de referência para indicadores de continuidade, confiabilidade e desempenho de sistemas elétricos. O método considera a topologia e desempenho das instalações, rotinas operacionais e sistemas de proteção. Os dados topológicos modelam a dependência operacional entre equipamentos, para desligamentos forçados e programados, e a graduação dos sistemas de proteção. Dados de desempenho incluem as taxas de falhas dos equipamentos, os tempos de (re)energização (manual ou automática), e as probabilidades de falhas de proteção e disjuntores. Modelos matriciais facilitam a aplicação a sistemas interligados de múltiplas empresas e sua implementação em computador, para simulação e cálculo de vários indicadores de continuidade e desempenho.

PALAVRAS-CHAVE

Indicador de Continuidade, Qualidade de Energia, Desempenho de Sistemas Elétricos, Riscos

1.0 INTRODUÇÃO

Indicadores de continuidade e desempenho são utilizados para aferir a qualidade da energia dos sistemas elétricos de potência. Muitos destes indicadores são atualmente avaliados internamente, para apoio à gestão e planejamento das empresas, e externamente, por operadores independentes e agências reguladoras. Valores de referência e metas

futuras são usualmente estabelecidos com base em dados históricos, associados a penalidades pelo descumprimento. Tal método incentiva a melhoria da qualidade do serviço, mas não sinaliza as ações necessárias para este fim.

Este informe propõe uma metodologia de cálculo de valores de referência para indicadores de continuidade e desempenho de sistemas elétricos, com base no comportamento individual de cada equipamento (taxa de falha) e sua proteção (confiabilidade e alcance), no desempenho operacional (tempos de religamento e reenergização) e topologia da rede elétrica associada. Esta associação permite correlacionar as medidas propostas pela manutenção e operação com os resultados esperados dos indicadores, subsidiando também os acessantes na escolha do ponto de conexão ao sistema elétrico. Analogamente, a associação com a topologia da rede permite avaliar as propostas de expansão do sistema e seus impactos nos indicadores. O método pode ser transformado em um simulador de desempenho de sistemas, e estendido para outros indicadores, além da frequência e duração de interrupções em pontos de controle, tais como energia e demandas interrompidas, e probabilidade de perda de carga, em estudos de planejamento.

2.0 SIMBOLOGIA

A_1 - Matriz de Alcançabilidade Forçada

A_{ij} - Alcançabilidade Forçada da Empresa i em j

A_p - Matriz de Alcançabilidade Programada

$A_{p_{ij}}$ - Alcançabilidade Programada da Empresa i em j
 C - Vetor de Confiabilidade Própria da Proteção
 C_D - Matriz Diagonal de C
 D - Vetor de Duração Média de Indisponibilidade
 D_A - Vetor de Duração Acumulada de Indisponibilidade
 D_{AC} - Tempo Total de Saída por Falha de Proteção
 D_{AI} - Vetor de Tempo Total de Saída Forçada
 D_{Aij} - Duração da Contribuição da Empresa i sobre j
 D_{AP} - Vetor de Tempo Total de Saída Programada
 d_i - Vetor de Duração Própria de Saída Forçada
 d_{ID} - Matriz Diagonal de d_i
 $DIPC$ - Duração de Interrupção dos Pontos de Controle
 $FIPC$ - Frequência Interruptiva dos Pontos de Controle
 $DIPCM$ - Vetor de Valor Médio de $DIPC$
 $DMIPC$ - Vetor de Duração Máxima de $DIPC$
 $EDNS$ - Vetor Esperança Demanda Média Não Suprida
 DNS - Vetor de Demanda Média Não Suprida
 DNS_A - Vetor de Demanda Acumulada Não Suprida
 DNS_I - Demanda Não Suprida por Saída Forçada
 DNS_p - Demanda Não Suprida por Saída Programada
 DNS_T - Demanda Total Não Suprida
 d_p - Vetor de Duração Própria de Saída Programada
 d_{pD} - Matriz Diagonal de d_p
 $EENS$ - Vetor Esperança Energia Média Não Suprida
 ENS - Vetor de Energia Média Não Suprida
 ENS_A - Vetor de Energia Acumulada Não Suprida
 ENS_I - Energia Não Suprida por Saída Forçada
 ENS_p - Energia Não Suprida por Saída Programada
 F - Vetor de Frequência Total de Indisponibilidade
 F_C - Frequência Total de Saída por Falha Protetiva
 F_{Cij} - Vetor de Contribuição da Empresa i sobre F_C de j
 F_D - Matriz Diagonal de F
 f_i - Vetor de Frequência Própria de Saída Forçada
 f_{iD} - Matriz Diagonal de f_i
 F_I - Vetor de Frequência Total de Saída Forçada
 F_{ij} - Vetor de Contribuição da Empresa i sobre F_I de j
 F_{ij} - Subvetor de f_i da Empresa j

F_{ij} - Vetor de Contribuição da Empresa i sobre F de j
 f_p - Vetor de Frequência Própria de Saída Programada
 f_{pj} - Subvetor de f_p da Empresa j
 f_{pD} - Matriz Diagonal de f_p
 F_P - Frequência Total de Saída Programada
 F_{Pij} - Vetor de Contribuição da Empresa i sobre F_P de j
 F_R - Vetor de Frequência de Recusa da Proteção
 I - Matriz de Adjacência Forçada
 i - Número inteiro menor que n
 j - Número inteiro menor que n
 K_D - Vetor de Limite de Interrupção
 I - Vetor de Carga Própria Conectada
 I_D - Matriz Diagonal de I
 $LOLE$ - Vetor de Esperança de Perda de Carga
 $LOLP$ - Vetor de Probabilidade de Perda de Carga
 n - Número inteiro de elementos da rede
 N - Número inteiro de empresas da rede
 P - Matriz de Adjacência Programada
 P_C - Matriz de Pontos de Controle
 r - Vetor de Duração Própria de (Re)Energização
 r_D - Matriz Diagonal de r
 r - Número inteiro menor que n
 R - Vetor de Risco
 R_{AI} - Tempo Total para (Re)Energização Programada
 R_{AP} - Tempo Total para (Re)Energização Forçada
 T - Tempo de análise
 T - Matriz de Adjacência Protetiva
 T_C - Matriz de Vulnerabilidade Protetiva
 T_{Cij} - Vulnerabilidade Protetiva da Empresa i de j
 V - Vetor de Vulnerabilidade Própria da Proteção
 V_D - Matriz Diagonal de V

3.0 MODELAGEM DOS COMPONENTES

O comportamento de cada componente depende do seu desempenho individual, das intervenções programadas, sua proteção e operação, além da carga diretamente conectada. Estes aspectos podem ser modelados definindo-se os vetores e matrizes diagonais de Frequência Própria de Saída Forçada (f_i), Frequência Própria de Saída Programada (f_p), Confiabilidade Própria da Proteção (C), Vulnerabilidade Própria da Proteção (V), Duração Própria de (Re)Energização (r), Duração Própria de Saída Forçada (d_i), Duração Própria de Saída Programada (d_p), e Carga Própria Conectada (I), particionadas pelas N empresas interligadas na rede:

$$\mathbf{f}_I = [f_{I1} \quad f_{I2} \quad \dots \quad f_{In}]^T, \quad \mathbf{f}_{ID} = \text{diag}[\mathbf{f}_I],$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{f}_p &= [f_{p1} \ f_{p2} \ \dots \ f_{pn}]^T, & \mathbf{f}_{pD} &= \text{diag}[\mathbf{f}_p], \\
 \mathbf{C} &= [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_n]^T, & \mathbf{C}_D &= \text{diag}[\mathbf{C}], \\
 \mathbf{V} &= [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n]^T, & \mathbf{V}_D &= \text{diag}[\mathbf{V}], \\
 \mathbf{r} &= [r_1 \ r_2 \ \dots \ r_n]^T, & \mathbf{r}_D &= \text{diag}[\mathbf{r}], \\
 \mathbf{d}_I &= [d_{I1} \ d_{I2} \ \dots \ d_{In}]^T, & \mathbf{d}_{ID} &= \text{diag}[\mathbf{d}_I], \\
 \mathbf{d}_P &= [d_{p1} \ d_{p2} \ \dots \ d_{pn}]^T, & & \\
 & \mathbf{d}_{pD} &= \text{diag}[\mathbf{d}_P], & \\
 \mathbf{l} &= [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_n]^T, & \mathbf{l}_D &= \text{diag}[\mathbf{l}],
 \end{aligned}$$

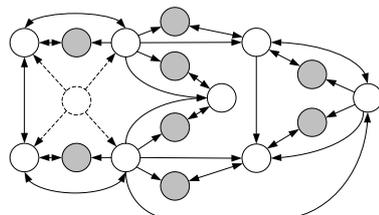
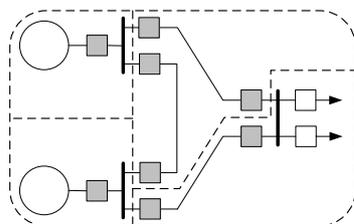
onde n é o número de equipamentos da rede, *diag* é a função (MatLab®) de construção/extração da diagonal de uma matriz, e f_{li} , f_{pi} , d_{li} e d_{pi} representam as frequências e durações próprias com que cada item desliga de forma forçada e programada, incluindo os disjuntores correspondentes, r_i é o tempo de reativação após cada desligamento, e l_i a carga externa diretamente conectada ao item. C_i e V_i representam as probabilidades de que a proteção do item i atue corretamente ou indevidamente, respectivamente, em um determinado instante, para falhas nos componentes da zona de proteção. Disjuntores também podem ser incluídos nos vetores \mathbf{C} e \mathbf{V} , com sua probabilidade de abertura correta (quando solicitado) e incorreta (quando não solicitado), respectivamente. A probabilidade de estarem inoperantes será obviamente dada por $1-C_i$, para ambos. Em sistemas interligados, com N empresas, \mathbf{f}_{li} , \mathbf{f}_{pi} , \mathbf{d}_{li} , \mathbf{d}_{pi} , \mathbf{l}_i e \mathbf{r}_i são os subvetores correspondentes aos equipamentos da empresa i . Incluem-se todos os desligamentos automáticos, devidos a fenômenos naturais, ambientais, acidentais, originadas em

equipamentos de potência ou sistemas de proteção e controle, emergenciais ou urgentes, e os desligamentos planejados, para manutenção, regulação, novas conexões, modificações e melhorias na rede.

4.0 MODELAGEM DA TOPOLOGIA

Para os objetivos deste informe, a dependência funcional entre os diversos equipamentos de um sistema elétrico será modelada por uma matriz de adjacência, que relacione os itens que se desligam forçadamente em conjunto. O conceito de adjacência forçada aplica-se não só a equipamentos que pertencem a uma mesma zona de proteção, como a zonas distintas que desligam por sobrecarga, falta, sub e sobretensão, ou zonas remotas participantes de sistemas de alívio de carga ou geração, após a desconexão de um item. Define-se, então, a Matriz de Adjacência Forçada I, pela expressão e grafo associado da Figura 1, exemplificada para um sistema elétrico, com elementos com capacidade indicada entre parênteses, pertencentes às empresas geradoras 1 e 2, e transmissoras 3 e 4, separadas por linhas tracejadas. O grafo representa as dependências funcionais dos componentes diretamente relacionados, obtidos de estudos de contingência. Modos de falha comuns podem ser representados por nós fictícios (pontilhados no grafo), relacionados aos itens afetados. Admite-se que ambos geradores (4 pu) são necessários para suprir as cargas na barra 8, e que a linha 6 (4 pu), sobrecarrega a linha 7 (2 pu) se desligar automaticamente, mas não quando programada previamente. Disjuntores estão achuriados no desenho e grafo, mas excluídos da matriz, para simplificar o exemplo.

$$\mathbf{I} = [I_{ij}] = p_i I p_j = \begin{cases} \text{se } p_i \text{ indisponibiliza } p_j \text{ quando } p_i \text{ se desliga automaticamente;} \\ \text{caso contrário, onde } p_i \text{ e } p_j \text{ são itens quaisquer da rede elétrica, e } i, j \leq n. \end{cases}$$



	1	2	3	4	5	6	7	8		
$\mathbf{I} =$	0	1	1	0	0	0	0	0	1	
	1	0	0	0	1	1	0	0	2	
	1	0	0	1	0	0	0	0	3	
	0	0	1	0	1	0	1	1	4	
	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	6
	0	0	0	0	0	0	0	0	7	
	0	0	0	0	0	1	1	0	8	

Figura 1 – Grafo e Matriz de Adjacência Forçada de Sistema Elétrico Modelo

Analogamente, pode-se modelar a dependência operacional entre os equipamentos relacionando-se aqueles cuja indisponibilidade programada

sempre ocorra em conjunto. Aplica-se, por exemplo, a disjuntores com suas linhas ou transformadores, componentes que se

sobrecarregam com a saída de outros, equipamentos de uma mesma zona de proteção, itens distintos desligados para evitar sobrecarga, ou itens remotos para evitar atuação de sistemas de alívio de carga, ou itens de sistemas radiais,

etc. Pode-se definir, então, uma Matriz de Adjacência Programada P, pela expressão e grafo associado da Figura 2.

$$\mathbf{P} = [p_{ij}] = p_i P p_j = \begin{cases} \text{se } p_i \text{ impede a operação de } p_j \text{ quando } p_i \text{ se torna indisponível;} \\ \text{caso contrário, onde } p_i \text{ e } p_j \text{ são itens quaisquer da rede elétrica, e } i, j \leq n. \end{cases}$$

$$\mathbf{T} = [t_{ij}] = p_i T p_j = \begin{cases} \text{se a proteção ou ação de } p_i \text{ protege ou é sensível a defeitos em } p_j, \text{ com} \\ \quad i \neq j; \\ \text{caso contrário, onde } p_i \text{ e } p_j \text{ são itens quaisquer da rede elétrica, e } i, j \leq n. \end{cases}$$

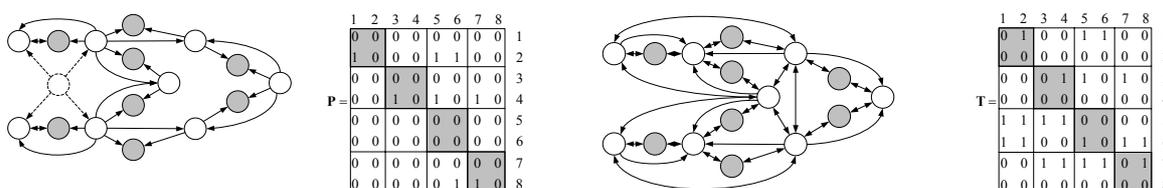


Figura 2 – Grafos e Matrizes de Adjacência Programada e Protetiva

A dependência operacional entre os sistemas de proteção, disjuntivos e os itens protegidos pode ser modelada relacionando-se aqueles cujos defeitos são sensíveis a cada proteção, ou à ação dos disjuntores. Aplica-se, por exemplo, a itens situados na mesma zona de proteção, ou em zonas adjacentes ao alcance da proteção, quando esta funciona como retaguarda. Pode-se definir, então, uma Matriz de Adjacência Protetiva T, pela expressão e grafo associado, ilustrados na Fig. 2.

Itens que, por conveniência, mas não necessariamente, sejam programados em conjunto, podem ser representados por nós fictícios (pontilhados no grafo), relacionados aos itens programados. Quanto mais malhado o sistema, mais esparsas serão as matrizes **P** e **I**. A figura 1 ilustra a matriz (sem os disjuntores) e o grafo associado para o sistema elétrico exemplo.

Estas três matrizes, **P**, **I** e **T**, são suficientes para modelar a topologia da rede para cálculo de indicadores de continuidade. Neste informe, será útil ainda calcular as Matrizes de Alcançabilidade Forçada e Programada (**A_I** e **A_P**), e a Matriz de Vulnerabilidade Protetiva (**T_C**) pelas operações (booleanas para **A_I** e **A_P**, e algébricas para **T_C**):

$$\mathbf{A}_I = [\mathbf{A}_{Iij}] = (\mathbf{I} + \mathbf{U})^r = (\mathbf{I} + \mathbf{U})^{r-1} \neq (\mathbf{I} + \mathbf{U})^{r-2},$$

$$\mathbf{A}_P = [\mathbf{A}_{Pij}] = (\mathbf{P} + \mathbf{U})^r = (\mathbf{P} + \mathbf{U})^{r-1} \neq (\mathbf{P} + \mathbf{U})^{r-2},$$

$$\mathbf{T}_C = [\mathbf{T}_{Cij}] = \mathbf{C}_D (\mathbf{T} - \mathbf{C}_D \cdot \mathbf{T})^T + \mathbf{V}_D \mathbf{T},$$

onde r (o menor inteiro positivo que satisfaz as equações acima) é a extensão máxima da cascata de desligamentos automáticos (ou programados) decorrentes do desligamento originado em qualquer componente da rede, e **U** a matriz diagonal unitária. Fornecem os itens que devem ser desligados em conjunto, para desligamento forçado (ou programado) de um deles. A terceira expressão considera que $(\mathbf{T} - \mathbf{C}_D \mathbf{T})$ e $(\mathbf{V}_D \mathbf{T})$ são matrizes de probabilidade de recusa e atuação indevidas da proteção do componente i , ou disjuntor, para defeito em j . Expressam as probabilidades de cada elemento desligar por falha da proteção ou disjuntor em outro componente, em função da Matriz de Adjacência Protetiva **T**. A Figura 3 seguinte mostra os grafos e matrizes de alcançabilidade resultantes para o sistema elétrico modelo, onde foram excluídos os disjuntores para simplificar o exemplo.

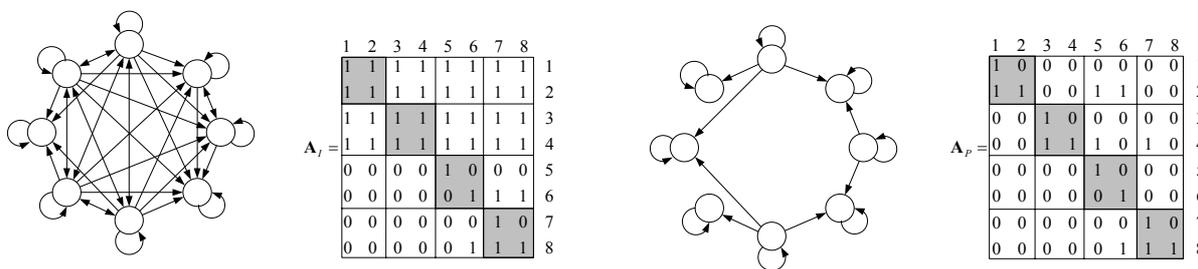


Figura 3 – Grafos e Matrizes de Alcançabilidade Forçada e Programada

Em sistemas elétricos interligados, com N empresas, os elementos das matrizes \mathbf{A}_I , \mathbf{A}_P e \mathbf{T}_C podem ser agrupados por sistema (ou empresa), permitindo particioná-las nas Matrizes de Alcançabilidade de Interligação entre empresas, \mathbf{A}_{Iij} , \mathbf{A}_{Pij} e \mathbf{T}_{Cij} , que determinam os impactos dos desligamentos forçados, programados ou por falha de proteção e disjuntor, respectivamente, originados na empresa i sobre a empresa j . As matrizes das Figuras 1, 2 e 3 ilustram estas partições entre as empresas 1 a 4. As duas matrizes, \mathbf{A}_I e \mathbf{A}_P , avaliam e estendem as consequências de cada desligamento, forçado ou programado, na topologia da rede. Por consistência lógica, ter-se-á sempre que $\mathbf{A}_I \geq \mathbf{A}_P$. A subtração destas matrizes, $(\mathbf{A}_I - \mathbf{A}_P)$, define os componentes que podem ser reenergizados de imediato, sem aguardar a reenergização do componente defeituoso que deu origem ao desligamento forçado. Se implementada em um sistema de gestão de energia, pode ser útil na recomposição da rede após desligamentos automáticos. A própria matriz de alcançabilidade de intervenções programadas (\mathbf{A}_P) define os itens que devem aguardar a reenergização do componente forçado, antes de retornar à operação.

5.0 FREQUÊNCIA DAS INTERRUPÇÕES

Com estes parâmetros, calculam-se os vetores e matrizes diagonais de Frequência Total de Saída Forçada e Programada (\mathbf{F}_I e \mathbf{F}_P) e Frequência Total de Saída por Falha Protetiva (\mathbf{F}_C) de todos os componentes, particionados por N empresas, pelas expressões:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_I &= [F_{Ii}] = \mathbf{A}_I^T \mathbf{f}_I, & \mathbf{F}_{ID} &= \text{diag}(\mathbf{F}_I), \\ & i \leq n, \\ \mathbf{F}_P &= [F_{Pi}] = \mathbf{A}_P^T \mathbf{f}_P, & \mathbf{F}_{PD} &= \text{diag}(\mathbf{F}_P), \\ & i \leq n, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_C &= [F_{Ci}] = \mathbf{T}_C \mathbf{f}_I, & \mathbf{F}_{CD} &= \text{diag}(\mathbf{F}_C), \\ & i \leq n, \end{aligned}$$

que avaliam as frequências efetivas com que cada componente é indisponibilizado, de forma forçada ou planejada, seja por causa própria ou desligamento automático de outro elemento da rede, por programação própria ou desligamento planejado de outro item, ou falha de disjuntor ou proteção. Somando estas parcelas, obtém-se o vetor e matriz diagonal de Frequência Total de Indisponibilidade (\mathbf{F}) de cada componente, particionado entre os N agentes conectados, e o vetor de Contribuição (ou Responsabilidade) (\mathbf{F}_{ij}) da empresa j para os desligamentos na empresa i :

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \mathbf{A}_P^T \mathbf{f}_P + [\mathbf{A}_I^T + \mathbf{C}_D (\mathbf{T} - \mathbf{C}_D \cdot \mathbf{T})^T] \mathbf{f}_I, \\ \mathbf{F}_D &= \text{diag}(\mathbf{F}), \\ \mathbf{F}_{ij} &= \mathbf{F}_{Iij} + \mathbf{F}_{Pij} + \mathbf{F}_{Cij} = (\mathbf{A}_P^T)_{ij} \mathbf{f}_{Pj} + [(\mathbf{A}_I^T)_{ij} + \mathbf{T}_{Cij}] \mathbf{f}_{Ij} \end{aligned}$$

6.0 DURAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES

As durações das interrupções nos diversos pontos da rede resultam dos tempos e frequências dos desligamentos forçados e programados, e de recomposição, avaliados pelos vetores de Tempo Total de Saída Forçada (\mathbf{D}_{AI}), Tempo Total de Saída Programada (\mathbf{D}_{AP}), Tempo Total para (Re)Energização Programada (\mathbf{R}_{AI}), Tempo Total para (Re)Energização Forçada (\mathbf{R}_{AP}), e Tempo Total de Saída por Falha de Proteção (\mathbf{D}_{AC}), particionados por N empresas, pelas expressões:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_{AI} &= [D_{AIi}] = (\mathbf{d}_{ID} \mathbf{A}_P^T) \mathbf{f}_I, \\ & i \leq n, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{D}_{AP} &= [D_{APi}] = (\mathbf{d}_{PD} \mathbf{A}_P^T) \mathbf{f}_P, \\ & i \leq n, \\ \mathbf{R}_{AI} &= [R_{Aii}] = (\mathbf{r}_D \mathbf{A}_I^T) \mathbf{f}_I, \\ & i \leq n, \\ \mathbf{R}_{AP} &= [R_{APi}] = (\mathbf{r}_D \mathbf{A}_P^T) \mathbf{f}_P, \\ & i \leq n, \\ \mathbf{D}_{AC} &= [D_{ACi}] = (\mathbf{r}_D \mathbf{T}_C) \mathbf{f}_I, \\ & i \leq n,\end{aligned}$$

que, somados, resultam no vetor de Duração Acumulada de Indisponibilidade (\mathbf{D}_A), do qual se deduz a Contribuição (ou Responsabilidade) (\mathbf{D}_{Aij}) da empresa j para a duração acumulada dos desligamentos na empresa i , e a Duração Média de Indisponibilidade (\mathbf{D}) de cada item da rede, multiplicando \mathbf{D}_A pelo inverso da Matriz Diagonal das Frequências Totais (\mathbf{F}_D):

$$\begin{aligned}\mathbf{D}_A &= (\mathbf{d}_{ID} \mathbf{A}_P^T + \mathbf{r}_D \mathbf{A}_I^T + \mathbf{r}_D \mathbf{T}_C) \mathbf{f}_I + (\mathbf{d}_{PD} + \mathbf{r}_D) \mathbf{A}_P^T \mathbf{f}_P, \\ \mathbf{D}_{Aij} &= [\mathbf{d}_{IDj} (\mathbf{A}_P^T)_{ij} + \mathbf{r}_{Dj} (\mathbf{A}_I^T)_{ij} + \mathbf{r}_{Dj} \mathbf{T}_{Cij}] \mathbf{f}_{Ij} \\ &+ (\mathbf{d}_{PDj} + \mathbf{r}_{Dj}) (\mathbf{A}_P^T)_{ij} \mathbf{f}_{Pj}, \\ \mathbf{D} &= \mathbf{D}_A \cdot \mathbf{F}_D^{-1},\end{aligned}$$

onde $ij \leq N$ representam duas empresas quaisquer participantes da rede.

7.0 PONTOS DE CONTROLE

Em sistemas de transmissão e distribuição, pode ser de interesse avaliar apenas determinados pontos da rede, definidos por uma matriz binária \mathbf{P}_C cujos $m \times n$ elementos não nulos definem os Pontos de Controle. No sistema exemplo, as 3 barras de conexão seriam selecionadas pela matriz \mathbf{P}_C da Figura 4.

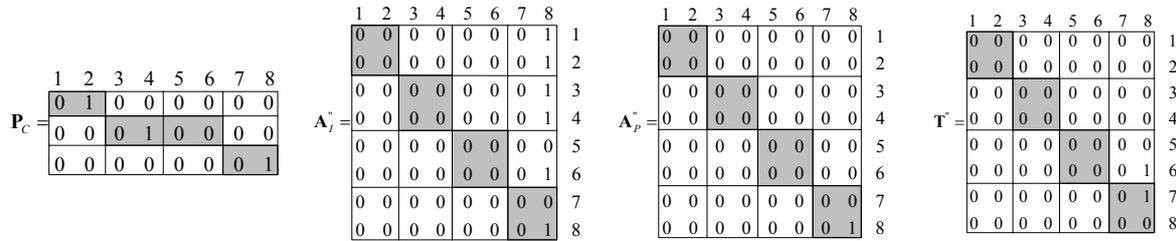


Figura 4 – Pontos de Controle e Matrizes de Alcançabilidade Restritas

Os vetores de Frequência (\mathbf{FIPC}) e Duração (\mathbf{DIPC}), inclusive Média (\mathbf{DIPCM}) e Máxima (\mathbf{DMIPC}) de Interrupção dos Pontos de Controle são facilmente calculados por:

$$\begin{aligned}\mathbf{FIPC} &= \mathbf{P}_C \mathbf{F}, & \mathbf{DIPC} &= \mathbf{P}_C \mathbf{D}_A, \\ \mathbf{DIPCM} &= \mathbf{P}_C \mathbf{D}, \\ \mathbf{DMIPC} &= \mathbf{P}_C \text{rowmax}(\text{horzcat}(\mathbf{d}_{ID} \mathbf{A}_P^T + \mathbf{r}_D \mathbf{A}_I^T \\ &+ \mathbf{r}_D \mathbf{T}_C, \mathbf{d}_{PD} \mathbf{A}_P^T + \mathbf{r}_D \mathbf{A}_P^T)),\end{aligned}$$

onde os valores máximos são derivados das parcelas que contribuem para o valor de \mathbf{D} , usando as funções matriciais de concatenação horizontal e máximo de linha do MatLab®.

Mas, dependendo da regulamentação vigente, as interrupções dos pontos de controle só serão computadas se excederem determinados tempos, definidos por um vetor (\mathbf{K}) e matriz diagonal (\mathbf{K}_D) de Limite de Interrupção:

$$\begin{aligned}\mathbf{K} &= [K_i], & \mathbf{K}_D &= \text{diag}(\mathbf{K}), \\ & i \leq n,\end{aligned}$$

onde K_i é o tempo mínimo de inclusão das interrupções no cálculo da indisponibilidade do ponto de controle i (no Brasil, $K_i = 1$ minuto). Neste caso, novas matrizes de alcançabilidade devem ser definidas, para filtrar os desligamentos inferiores a estes limites, pelas seguintes expressões matriciais:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}'_P &= [\mathbf{A}'_{Pij}] = (\mathbf{d}_{PD} + \mathbf{r}_D) \mathbf{A}_P > \mathbf{K}_D \mathbf{A}_P & i, j \leq N, \\ \mathbf{A}'_I &= [\mathbf{A}'_{Iij}] = (\mathbf{d}_{ID} \mathbf{A}_P + \mathbf{r}_D \mathbf{A}_I) > \mathbf{K}_D \mathbf{A}_I & i, j \leq N, \\ \mathbf{T}' &= [\mathbf{T}'_{ij}] = \mathbf{r}_D \mathbf{T} > \mathbf{K}_D \mathbf{T} & i, j \leq N,\end{aligned}$$

usando o operador de comparação matricial do MatLab®. As comparações são testadas para cada elemento das matrizes, para decidir se o mesmo se anula ou mantém o valor original. As fórmulas anteriores para os Pontos de Controle permanecem válidas, com estas substituições.

8.0 INDICADORES DE DESEMPENHO

Os demais indicadores de desempenho, são úteis na identificação de pontos críticos da rede, sendo avaliados pelos vetores esperanças de Energia Não Suprida por Desligamento Forçado (\mathbf{ENS}_I), Energia Não Suprida por Desligamento Programado (\mathbf{ENS}_P), Esperança de Energia Não Suprida (\mathbf{EENS}) no período, Esperança de Demanda Não Suprida (\mathbf{EDNS}) no período, Risco (\mathbf{R}) e Frequência de Recusa da Proteção (\mathbf{F}_R), por cada componente, particionadas por N empresas:

$$\begin{aligned}\mathbf{ENS}_I &= [\mathbf{ENS}_{Ii}] = (\mathbf{r}_D \mathbf{A}_I + \mathbf{r}_D \mathbf{T}_C + \mathbf{d}_{ID} \mathbf{A}_P) \mathbf{1}, \\ \mathbf{DNS}_I &= \mathbf{f}_{ID}^{-1} \mathbf{ENS}_I, \\ \mathbf{ENS}_P &= [\mathbf{ENS}_{Pi}] = [\mathbf{ENS}_{Pj}] = (\mathbf{r}_D + \mathbf{d}_{PD}) \mathbf{A}_P \mathbf{1}, \\ \mathbf{DNS}_P &= [\mathbf{DNS}_{Pi}] = [\mathbf{DNS}_{Pj}] = \mathbf{f}_{PD}^{-1} \mathbf{ENS}_P, \\ \mathbf{ENS}_A &= [\mathbf{ENS}_{Ai}] = [\mathbf{ENS}_{Aj}] = \mathbf{1}_D \mathbf{D}_A, \\ \mathbf{EDNS} &= [\mathbf{EDNS}_i] = [\mathbf{EDNS}_j] = \mathbf{DNS}_I + \mathbf{DNS}_P, \\ \mathbf{EENS} &= [\mathbf{EENS}_i] = [\mathbf{EENS}_j] = T \cdot \mathbf{EDNS}, \\ \mathbf{R} &= [\mathbf{R}_i] = [\mathbf{R}_j] = (\mathbf{U} - \mathbf{C}_D) [\mathbf{1}^T (\mathbf{T} - \mathbf{C}_D \mathbf{T})], \\ \mathbf{F}_R &= [\mathbf{F}_{Ri}] = [\mathbf{F}_{Rj}] = \mathbf{R} \mathbf{f}_I^T,\end{aligned}$$

onde $i \leq n$ e $j \leq N$, e $\mathbf{1} = [1, 1, \dots, 1]^T$. Os vetores \mathbf{R} e \mathbf{F}_R estimam respectivamente a probabilidade e frequência de ocorrência de danos extremos, quando todas as proteções, inclusive retaguarda, recusam a atuar durante uma falha.

A Contribuição (ou Responsabilidade) da Energia Acumulada Não Suprida (\mathbf{EENS}_{Aij}) na empresa i pela empresa j , as Energia e Demanda Total Não Supridas (\mathbf{EENS}_{Ti} , \mathbf{EENS}_{PT} e \mathbf{EDNS}_T), programada e forçada, por cada empresa e pelo sistema interligado, e o Risco e Frequência de Recusa da Proteção serão, respectivamente:

$$\begin{aligned}\mathbf{EENS}_{Aij} &= \mathbf{1}_{Di} \mathbf{D}_{Aij}, \quad \mathbf{EENS}_{Ti} = \mathbf{EENS}_{Ai}^T \mathbf{1}_i, \\ & i \leq n, \\ \mathbf{EENS}_{IT} &= \mathbf{EENS}_{ITi}^T \mathbf{1}_i, \quad \mathbf{EENS}_{PT} = \mathbf{EENS}_{PTi}^T \mathbf{1}_i, \\ & i \leq n \\ \mathbf{R}_j &= (\mathbf{R}_j^T \mathbf{f}_j) / (\mathbf{f}_j^T \mathbf{1}_j), \quad \mathbf{EENS}_T = \mathbf{EENS}_T^T \mathbf{1}_T, \\ & i \leq n, \\ \mathbf{EDNS}_T &= \mathbf{EDNS}_T^T \mathbf{1}_T, \\ \mathbf{EDNS}_{IT} &= \mathbf{EDNS}_{ITi}^T \mathbf{1}_i, i \leq n,\end{aligned}$$

$$\mathbf{EDNS}_{PT} = \mathbf{EDNS}_{PTi}^T \mathbf{1}_i, \quad \mathbf{F}_{Rj} = \mathbf{R}_j^T \mathbf{f}_{Ij},$$

$$i \leq n,$$

onde $\mathbf{1}_i, \mathbf{1}_T = [1, 1, \dots, 1]^T$, e $i, j \leq N$.

As Probabilidades e Esperanças de Perda de Carga dos componentes (\mathbf{LOLP} , \mathbf{LOLE}), das empresas (\mathbf{LOLP}_S , \mathbf{LOLE}_S) e do sistema (\mathbf{LOLP}_S , \mathbf{LOLE}_S), são calculadas definindo novas matrizes de alcançabilidade, restritas aos itens com carga conectada, usando o operador de comparação matricial (\succ) do MatLab[®]:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_I'' &= (\mathbf{A}_I \mathbf{1}_D > \mathbf{0}), \quad \mathbf{A}_{Ii}'' = (\mathbf{A}_{Ii} \mathbf{1}_{Di} > \mathbf{0}_i), \\ & i \leq n, \\ \mathbf{A}_P'' &= (\mathbf{A}_P \mathbf{1}_D > \mathbf{0}), \quad \mathbf{A}_{Pi}'' = (\mathbf{A}_{Pi} \mathbf{1}_{Di} > \mathbf{0}_i), \\ & i \leq n, \\ \mathbf{T}'' &= (\mathbf{T} \mathbf{1}_D > \mathbf{0}), \quad \mathbf{T}_i'' = (\mathbf{T}_i \mathbf{1}_{Di} > \mathbf{0}_i), \\ & i \leq n, \\ \mathbf{T}_C'' &= \mathbf{C}_D (\mathbf{T}'' - \mathbf{C}_D \mathbf{T}'')^T, \quad \mathbf{T}_{Ci}'' = \mathbf{C}_{Di} (\mathbf{T}_i'' - \mathbf{C}_{Di} \mathbf{T}_i'')^T, \\ & i \leq n\end{aligned}$$

onde $\mathbf{0} = [0, 0, \dots, 0]^T$.

A soma das durações máximas das interrupções, ponderadas pelas respectivas frequências dos eventos de origem, fornece a fração de tempo ou probabilidade de que ocorra alguma interrupção de carga:

$$\mathbf{LOLP} = [\mathbf{LOLP}_i] = (\mathbf{d}_{ID} \mathbf{A}_P''^T + \mathbf{r}_D \mathbf{A}_I''^T + \mathbf{r}_D \mathbf{T}_C'') \mathbf{f}_I + (\mathbf{d}_{PD} + \mathbf{r}_D) \mathbf{A}_P''^T \mathbf{f}_P,$$

$$\mathbf{LOLP}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{Ii}^T \text{rowmax} \left(\begin{array}{l} \mathbf{r}_{Di} \mathbf{A}_{Ii}'' + \mathbf{d}_{IDi} \mathbf{A}_{Pi}'' \\ + \mathbf{r}_{Di} \mathbf{T}_{Ci}'' \end{array} \right) \\ + \mathbf{f}_{Pi}^T \text{rowmax} \left((\mathbf{r}_{Di} + \mathbf{d}_{PDi}) \mathbf{A}_{Pi}'' \right) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{LOLP}_S = \mathbf{f}_I^T \text{rowmax} (\mathbf{r}_D \mathbf{A}_I'' + \mathbf{d}_{ID} \mathbf{A}_P'' + \mathbf{r}_D \mathbf{T}_C'') + \mathbf{f}_P^T \text{rowmax} ((\mathbf{r}_D + \mathbf{d}_{PD}) \mathbf{A}_P''),$$

$$\begin{aligned}\mathbf{LOLE} &= [\mathbf{LOLE}_i] = T \cdot \mathbf{LOLP}, \\ \mathbf{LOLE}_S &= [\mathbf{LOLE}_{Si}] = T \cdot \mathbf{LOLP}_S, \\ \mathbf{LOLE}_S &= T \cdot \mathbf{LOLP}_S,\end{aligned}$$

onde T = tempo de análise.

Indicadores similares podem ser obtidos substituindo a demanda de cada item no vetor $\mathbf{1}$, por outras variáveis de interesse, tais como

número de consumidores, habitantes, produção industrial, faturamento, custo social, receita, lucro, etc. Os indicadores equivalentes, calculados pelas mesmas fórmulas de LOLP, DNS e ENS, estimarão os níveis de (não) atendimento e as probabilidades de perda de consumidores (FEC e DEC), habitantes, produção, faturamento, custo social, receita, lucro, etc, inclusive com a partição de responsabilidades entre empresas. Desta forma podem ser usados em negociações contratuais, estudos tarifários e compensações de perdas em desligamentos em sistemas interligados.

9.0 CONCLUSÕES

Os seguintes aspectos distinguem o método proposto, na avaliação de indicadores de desempenho:

- (a) Consideração do desempenho da manutenção, proteção e operação de sistemas elétricos;
- (b) Simulação da topologia da rede, com dependências funcionais, forçadas e programadas;
- (c) Representação gráfica das dependências funcionais por grafos dirigidos;
- (d) Modelagem da confiabilidade e graduação de sistemas de proteção;
- (e) Representação de falhas de modo comum e disjuntor bloqueado;
- (f) Inclusão de causalidades remotas de teleproteções e sistemas de alívio de geração ou carga;
- (g) Uso de dados tradicionalmente disponíveis nas bases de dados de manutenção e operação;
- (h) Avaliação de indicadores de continuidade, técnicos, econômicos e sociais;
- (i) Explicitação da contribuição e responsabilidade dos desligamentos entre empresas interligadas; e
- (j) Formalização por álgebra matricial, com implementação trivial em computadores;

10.0 REFERÊNCIAS

- (1) Siqueira, I. P., "Optimum Reliability-Centered Maintenance Task Frequencies for Power System Equipments", 8th PMAPS, IEEE, 2004
- (2) Siqueira, I. P., "Measuring the Impact of an RCM Program on Power System Performance", IEEE PES General Meeting, IEEE, 2005.
- (3) Billinton, R., Allan, R. N., "Reliability Evaluation of Engineering Systems", Pitman, 1983
- (4) Endrenyi, J., "Reliability Modeling in Electric Power Systems", John Wiley & Sons, 1978.
- (5) Sullivan, R. L., "Power System Planning", McGraw-Hill, 1977.
- (6) Sage, A. P., "Methodology for Large-Scale Systems, McGraw-Hill, 1977.
- (7) Li, W., "Risk Assessment of Power Systems – Models, Methods, and Applications, Wiley, 2005.