



GAT-025

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

MÉTODO ANALÍTICO PARA SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE CONFIABILIDADE DE ARRANJOS DE SUBESTAÇÕES

João Ricardo Paes de Barros
CHESF

Vilma de Souza Andrade
CHESF

RESUMO

Este trabalho propõe e descreve um método analítico para análise e avaliação de confiabilidade de arranjos de subestações, sem a construção prévia dos diagramas lógicos. Ou seja, conhecendo-se somente os dados estocásticos dos componentes, a quantidade de fontes de alimentação e pontos de carga, isto é, a topologia do arranjo e a dimensão da subestação, é possível simular configurações de arranjos com módulos de entradas de linhas de transmissão e conexões de transformadores completos e incompletos, classificando todas as interrupções de acordo com os tempos necessários para restaurar o serviço. A viabilidade do método é ilustrada através de aplicações práticas, envolvendo os arranjos Disjuntor e Meio, Disjuntor e Meio Modificado, Barra Dupla a 4, 5, 6 Chaves, Barra Principal e Transferência, e Barra Simples, ressaltando a precisão dos resultados.

PALAVRAS-CHAVE

Confiabilidade – Esquemas de Manobras de Subestações – Método Analítico.

1.0 INTRODUÇÃO

Vários métodos e modelos computacionais foram desenvolvidos e têm sido descritos na literatura. A grande maioria dos métodos e modelos existentes no Brasil e em outros países, utilizam a técnica do conjunto de cortes mínimos para selecionar os modos de falhas dos arranjos das subestações e classificá-los nas seguintes categorias de saídas forçadas permanentes:

- ✓ Falhas permanentes ou passivas;
- ✓ Falhas ativas;
- ✓ Falhas ativas com disjuntor preso;
- ✓ Falhas temporárias chaveando os elementos normalmente abertos;
- ✓ Falhas temporárias isolando os elementos falhados.

Os cortes mínimos são determinados através dos caminhos mínimos entre as fontes de alimentação - FT e pontos de

carga - PC, utilizando a técnica denominada de predecessores. A utilização desta técnica requer a construção dos diagramas lógicos representativos dos arranjos físicos das subestações, e portanto, o conhecimento dos funcionamentos dos diversos tipos de esquemas de manobras.

2.0 OBJETIVO DO TRABALHO

O presente artigo técnico tem como objetivo apresentar um método analítico que não utiliza a técnica do conjunto de cortes mínimos para simulação e análise de confiabilidade de subestações. As contribuições aos índices de confiabilidade de cada ponto de carga contemplam as seguintes categorias de modos de falhas, tal como é obtido no modelo computacional CST [1]:

- ✓ Falhas passivas;
- ✓ Falhas temporárias isolando equipamento falhado;
- ✓ Falhas temporárias chaveando equipamentos normalmente abertos;
- ✓ Falhas por disjuntor preso.

3.0 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Os estados de falha dos componentes dos arranjos das subestações podem conduzir a diferentes modos de falhas dos pontos de carga. Uns levam a interrupções permanentes, onde o serviço só pode ser restabelecido reparando pelo menos um componente falhado. Outros levam a interrupções temporárias, sendo o serviço restabelecido isolando o elemento falhado ou por meio de manobra de chaveamento de disjuntores e seccionadoras.

O problema consiste em elaborar uma nova metodologia que permita determinar com precisão suficiente as contribuições aos índices de confiabilidade dos pontos de carga dos arranjos físicos Disjuntor e Meio (D1/2), Disjuntor e Meio Modificado (D1/2M), Barra Dupla a quatro (BD-4CH), cinco (BD-5CH) e seis chaves (BD-6CH), Barra Principal / Transferência (BPT) e Barra Simples (BS), em termos de frequência de falha (falhas/ano), duração média de falha (horas) e indisponibilidade (horas/ano).

Vale salientar que estes arranjos são utilizados no Setor Elétrico brasileiro.

4.0 METODOLOGIA ANALÍTICA

Para formulação do conjunto de equações que permitem obter as contribuições aos índices de confiabilidade dos pontos de carga devido aos quatro modos de falhas (passivas, temporárias isolando equipamento avariado, temporária chaveando equipamento normalmente abertos e por disjuntor preso), utilizou-se a técnica dos modos de falhas e análise dos efeitos.

O conjunto de equações resultante dessa análise foi explicitado em função do número de fontes de alimentação - NF, número de pontos de carga - NC e de fatores que permitem simular diferentes configurações evolutivas para cada um tipo de arranjo. Foram também contemplados nas equações os seguintes parâmetros estocásticos dos equipamentos, tal como no modelo CST:

- ✓ Taxa de falha passiva (λ^P);
- ✓ Taxa de falha ativa (λ^A);
- ✓ Tempos de reparo-r, isolamento - S, chaveamento - t_C ;
- ✓ Probabilidade de disjuntor preso (p).

4.1 Hipóteses Consideradas

Durante o desenvolvimento do método, em alguns tipos de arranjos, não foram investigadas as contribuições das falhas simultâneas de dois componentes. Não foram investigadas também as contribuições envolvendo as saídas programadas para manutenção. Assim sendo, no método proposto as seguintes contribuições não foram contempladas:

- ✓ Falha passiva de um equipamento quando há outro em manutenção;
- ✓ Falha ativa de um equipamento quando um outro está isolado para reparo ou está em manutenção.

Vale salientar que é possível obter as expressões que permitem calcular estas contribuições e acrescentá-las à metodologia.

4.2 O Conjunto de Equações

A seguir é apresentado o conjunto de equações da metodologia analítica, proposta neste trabalho, para avaliação de confiabilidade de subestações.

4.2.1 Arranjo Físico D1/2

O conjunto de equações descrito abaixo permite simular configurações com vãos completos, as quais utilizam três disjuntores (DJ) e respectivas chaves seccionadoras, com vãos incompletos com dois disjuntores e respectivas chaves, e o arranjo D1/2 invertido caracterizado pela conexão de fontes de alimentação (FT) ou pontos de carga (PC) num mesmo vão.

Simula também a ligação provisória instalada entre os barramentos (Link de interligação com e sem disjuntor), comumente utilizada nas configurações iniciais.

Contribuição das Falhas Passivas

$$\lambda_{D1/2}^P = (1 - \alpha_L) \cdot [2 \cdot (\lambda_{CH}^P + \lambda_{TC}^P) + \lambda_{DJ}^P] \quad (1)$$

$$U_{D1/2}^P = (1 - \alpha_L) \cdot [2 \cdot (\lambda_{CH}^P \cdot r_{CH} + \lambda_{TC}^P \cdot r_{TC}) + \lambda_{DJ}^P \cdot r_{DJ}] \quad (2)$$

Contribuição das Falhas Ativas

$$A_1 = 2 \cdot (\alpha_L \cdot \alpha_F + 1) \quad (3)$$

$$A_2 = \alpha_L \cdot \alpha_F \cdot (1 + K_1) + \beta + 2 \quad (4)$$

$$\lambda_{D1/2}^A = A_1 \cdot (\lambda_{CH}^A + \lambda_{TC}^A) + A_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \quad (5)$$

$$U_{D1/2}^A = A_1 \cdot (\lambda_{CH}^A \cdot S_{CH} + \lambda_{TC}^A \cdot S_{TC}) + A_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot t_c \quad (6)$$

$$\alpha_F = 0 - \text{se o NF} \geq 2.$$

$$= 1 - \text{se o NF} = 1.$$

$$\alpha_L = 0 - \text{sem Link de interligação de barramentos.}$$

$$= 1 - \text{com Link ou} \geq 2 \text{ vãos.}$$

$$\beta = 0 - \text{D1/2.}$$

$$= 1 - \text{D1/2 invertido com NF} = 2.$$

Contribuição das Falhas por Disjuntor Preso

$$B_1 = (1 + \alpha_F \cdot K_2) \cdot [f_2 \cdot NV + 2 \cdot f_4 \cdot (1 + 2 \cdot \beta)] + 4 \cdot \alpha_F \cdot (1 - K_2) + K_4 \quad (7)$$

$$B_2 = (1 + \alpha_F \cdot K_2) \cdot [f_2 \cdot \alpha_D \cdot (NV - 1) + (1 + 2 \cdot \beta) \cdot f_4] + 2 \cdot f_1 \cdot (1 - \beta) \quad (8)$$

$$B_3 = 2 \cdot f_4 \cdot [(1 + \alpha_F \cdot K_2) \cdot (1 + 2 \cdot \beta)] \quad (9)$$

$$B_4 = f_2 \cdot \alpha_L \cdot (1 + \alpha_F \cdot K_2) + 2 \cdot \alpha_F \cdot (1 - K_2) \quad (10)$$

$$\lambda_{D1/2}^{DP} = [B_1 \cdot \lambda_{CH}^A + B_2 \cdot \lambda_{DJ}^A + B_3 \cdot \lambda_{TC}^A + B_4 \cdot \lambda_B^A] \cdot P \quad (11)$$

$$U_{D1/2}^{DP} = [B_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot S_{CH} + B_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot t_c] \cdot P + (B_3 \cdot \lambda_{TC}^A \cdot S_{TC} + B_4 \cdot \lambda_B^A \cdot S_B) \cdot P \quad (12)$$

$$\alpha_D = 0 - \text{Link sem DJ ou 1 vão e sem Link.}$$

$$= 1 - \text{Link com DJ ou} \geq 2 \text{ vãos.}$$

$$f_1 = 0 - \text{Se o NF} \neq 2.$$

$$= 1 - \text{Se o NF} = 2.$$

$$f_2 = (1 + K_1) - \text{Se o NF} \geq 2$$

$$= 1 - \text{Se o NF} = 1 \text{ ou D1/2 invertido.}$$

$$f_4 = (1 - K_1) - \text{Se o NF} \geq 2$$

$$= K_1 - \text{Se o NF} = 1 \text{ ou D1/2 invertido.}$$

$$K_1 = 0 - \text{para PC no vão com fonte.}$$

$$= 1 - \text{para PC no vão sem fonte.}$$

$$K_2 = 0 - \text{para PC no lado da barra com fonte.}$$

$$= 1 - \text{para PC no lado da barra sem fonte.}$$

$$= 1 - \text{se existir PC na barra.}$$

$$= 0 - \text{se não existir.}$$

$$NV - \text{Número de vãos (completos e incompletos).}$$

4.2.2 Arranjo Físico D1/2 Modificado

O conjunto de equações descritas abaixo permite simular configurações com chaves seccionadoras operando normalmente abertas, servindo como bypass dos barramentos e alimentação dos pontos de carga conectados diretamente nos barramentos pelos disjuntores mais próximos.

Contribuição das Falhas Passivas

$$\lambda_{D1/2M}^P = (1 - K_3) \cdot \lambda_B^P \quad (13)$$

$$U_{D1/2M}^P = (1 - K_3) \cdot \lambda_B^P \cdot r_B \quad (14)$$

$$K_3 = 0 - \text{para PC sem chave de bypass.}$$

$$= 1 - \text{para PC com chave de bypass.}$$

Contribuição das Falhas Ativas

$$C_1 = NV + 2 \cdot \alpha_F + K_3 \quad (15)$$

$$C_2 = NV + \alpha_F(1 + K_2) + \beta \quad (16)$$

$$C_3 = 2 \cdot \alpha_F \quad (17)$$

$$\lambda_{D1/2M}^A = C_1 \cdot \lambda_{CH}^A + C_2 \cdot \lambda_{DJ}^A + C_3 \cdot \lambda_{TC}^A + K_3 \cdot \lambda_B^A \quad (18)$$

$$U_{D1/2M}^A = C_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot S_{CH} + C_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot t_c + C_3 \cdot \lambda_{TC}^A \cdot S_{TC} + K_3 \cdot \lambda_B^A \cdot S_B \quad (19)$$

Contribuição das Falhas por Disjuntor Preso

$$D_1 = 2(N + 2 \cdot \beta + \alpha_F(2 \cdot K_2 + K_5)) \quad (20)$$

$$D_2 = N + \alpha_f \cdot K_5 + 2 \cdot f_1 \cdot K_2 \quad (21)$$

$$D_3 = 4 \cdot (\beta + K_2 \cdot \alpha_F) + 2 \cdot N \quad (22)$$

$$D_4 = K_5 \cdot \alpha_F \quad (23)$$

$K_5 = 1$ - para NF = 1 no vão incompleto.
 $= K_2$ - para NF = 1 ou NF ≥ 2 no vão completo.

$$\lambda_{D1/2M}^{DP} = (D_1 \cdot \lambda_{CH}^A + D_2 \cdot \lambda_{DJ}^A + D_3 \cdot \lambda_{TC}^A \cdot p + D_4 \cdot \lambda_B^A) \cdot p \quad (24)$$

$$U_{D1/2M}^{DP} = (D_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot R_{CH} + D_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot R_{DJ}) \cdot p + (D_3 \cdot \lambda_{TC}^A \cdot R_{TC} + D_4 \cdot \lambda_B^A \cdot R_B) \cdot p \quad (25)$$

$N = NV$ - se NF ≥ 2
 $= NV - 1$ - se NF = 1

4.2.3 Arranjo Físico BD-4CH

O conjunto de equações descritas abaixo permite simular a operação do arranjo com um e os dois barramentos energizados. Permite também avaliar a influência do disjuntor de transferência (DT) operando normalmente aberto (NA) ou fechado (NF).

Contribuição das Falhas Passivas

Não existe contribuição aos índices de confiabilidade totais devido às falhas passivas de primeira ordem. As contribuições de segunda ordem são:

$$P_1 = \lambda_{B,B}^P + \lambda_{DJ,DJ}^P + 2 \cdot \lambda_{DJ,B}^P + 3 \cdot \lambda_{CH,CH}^P + 4 \cdot (\lambda_{CH,B}^P + \lambda_{CH,DJ}^P) \quad (26)$$

$$P_2 = \lambda_{B,B}^P + 3 \cdot \lambda_{DJ,DJ}^P + 4 \cdot \lambda_{DJ,B}^P + 8 \cdot \lambda_{B,CH}^P + 9 \cdot \lambda_{CH,CH}^P + 12 \cdot \lambda_{CH,DJ}^P \quad (27)$$

$$P_3 = \lambda_{B,B}^P \cdot r_{B,B} + \lambda_{DJ,DJ}^P \cdot r_{DJ,DJ} + 2 \cdot \lambda_{DJ,B}^P \cdot r_{DJ,B} + 3 \cdot \lambda_{CH,CH}^P \cdot r_{CH,CH} + 4 \cdot (\lambda_{CH,B}^P \cdot r_{CH,B} + \lambda_{CH,DJ}^P \cdot r_{CH,DJ}) \quad (28)$$

$$P_4 = 3 \cdot \lambda_{CH,CH}^P \cdot r_{CH,CH} + 4 \cdot (\lambda_{CH,B}^P \cdot r_{CH,B} + \lambda_{CH,DJ}^P \cdot r_{CH,DJ}) + 8 \cdot \lambda_{B,CH}^P \cdot r_{B,CH} + 9 \cdot \lambda_{CH,CH}^P \cdot r_{CH,CH} + 12 \cdot \lambda_{CH,DJ}^P \cdot r_{CH,DJ} \quad (29)$$

$$\lambda_{BD_4CH}^P = (1 - \alpha_F) \cdot P_1 + \alpha_F \cdot P_2 \quad (30)$$

$$U_{BD_4CH}^P = (1 - \alpha_F) \cdot P_3 + \alpha_F \cdot P_4 \quad (31)$$

$$\lambda_{I,J}^P = \frac{\lambda_I^P \cdot \lambda_J^P \cdot (r_I + r_J)}{8760} \quad r_{I,J} = \frac{r_I \cdot r_J}{(r_I + r_J)} \quad (32)$$

I, J = representa as combinações dos equipamentos.

Contribuição das Falhas Ativas

$$E_1 = (1 + \alpha_F + \alpha_T) + NF_1 + NC_1 \quad (33)$$

$$E_2 = \alpha_T + NF_1 + NC_1 \quad (34)$$

$$\lambda_{BD_4CH}^A = E_1 \cdot \lambda_{CH}^A + E_2 \cdot \lambda_{DJ}^A + \lambda_B^A \quad (35)$$

$$U_{BD_4CH}^A = E_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot S_{CH} + E_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot t_c + \lambda_B^A \cdot S_B \quad (36)$$

NF_1 - N° de FTs conectadas no barramento onde está instalado o PC em análise.

NC_1 - N° de PCs conectados ao barramento onde está instalado o PC em análise.

$\alpha_T = 0$ - DT operando NA.

$= 1$ - DT operando NF.

Contribuição das Falhas por Disjuntor Preso

$$F_1 = \alpha_C \cdot [\beta_1 \cdot NF_1 + NC_1 - 1 + \alpha_T \cdot (1 + NF_2 + NC_2)] \quad (37)$$

$$F_2 = \alpha_C \cdot \alpha_T \cdot (NF_2 + NC_2) \quad (38)$$

$$\lambda_{BD_4CH}^{DP} = (F_1 \cdot \lambda_{CH}^A + F_2 \cdot \lambda_{DJ}^A + \alpha_C \cdot \alpha_T \cdot \lambda_B^A) \cdot p \quad (39)$$

$$U_{BD_4CH}^{DP} = (F_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot R_{CH} + F_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot R_{DJ}) \cdot p + \alpha_C \cdot \alpha_T \cdot \lambda_B^A \cdot R_B \cdot p \quad (40)$$

NF_2 - N° de FTs conectadas ao barramento oposto.

NC_2 - N° de PCs conectados ao barramento oposto.

$\alpha_C = 0$ - se o NF = 1 e NC = 1.

$= 1$ - se o NF ≥ 1 e NC ≥ 2

4.2.4 Arranjo Físico BD-5CH

Da mesma forma que no arranjo BD_4CH, o conjunto de equações descritas abaixo permite simular a operação do arranjo com um e os dois barramentos energizados. Permitem também avaliar a influência do disjuntor de transferência operando normalmente aberto ou fechado.

Contribuição das Falhas Passivas

Não existe contribuição aos índices de confiabilidade totais devido às falhas passivas de primeira ordem. As contribuições de segunda ordem são:

$$Q_1 = \lambda_{B,B}^P + \lambda_{DJ,DJ}^P + 2 \cdot \lambda_{DJ,B}^P + 6 \cdot (\lambda_{CH,B}^P + \lambda_{CH,DJ}^P) + 9 \cdot \lambda_{CH,CH}^P \quad (41)$$

$$Q_2 = 2 \cdot (\lambda_{DJ,B}^P + \lambda_{DJ,DJ}^P) + 6 \cdot \lambda_{B,CH}^P + 12 \cdot \lambda_{CH,DJ}^P + 17 \cdot \lambda_{CH,CH}^P \quad (42)$$

$$Q_3 = \lambda_{B,B}^P \cdot r_{B,B} + \lambda_{DJ,DJ}^P \cdot r_{DJ,DJ} + 2 \cdot \lambda_{DJ,B}^P \cdot r_{DJ,B} + 6 \cdot (\lambda_{CH,B}^P \cdot r_{CH,B} + \lambda_{CH,DJ}^P \cdot r_{CH,DJ}) + 9 \cdot \lambda_{CH,CH}^P \cdot r_{CH,CH} \quad (43)$$

$$Q_4 = 2 \cdot (\lambda_{DJ,B}^P \cdot r_{DJ,B} + \lambda_{DJ,DJ}^P \cdot r_{DJ,DJ}) + 6 \cdot \lambda_{B,CH}^P + 12 \cdot \lambda_{CH,DJ}^P \cdot r_{CH,DJ} + 17 \cdot \lambda_{CH,CH}^P \cdot r_{CH,CH} \quad (44)$$

$$\lambda_{BD_5CH}^P = Q_1 + \alpha_F \cdot Q_2 \quad (45)$$

$$U_{BD_5CH}^P = Q_3 + \alpha_F \cdot Q_4 \quad (46)$$

Contribuição das Falhas Ativas

$$G_1 = (NF_1 + NC_1) \quad (47)$$

$$\lambda_{BD_5CH}^A = \lambda_{BD_4CH}^A + G_1 \cdot \lambda_{CH}^A \quad (48)$$

$$U_{BD_5CH}^A = U_{BD_4CH}^A + G_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot S_{CH} \quad (49)$$

Contribuição das Falhas por Disjuntor Preso

$$\lambda_{BD_5CH}^{DP} = \lambda_{BD_4CH}^{DP} + F_2 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot P \quad (50)$$

$$U_{BD_5CH}^{DP} = U_{BD_4CH}^{DP} + F_2 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot R_{CH} \cdot P \quad (51)$$

4.2.5 Arranjo Físico BD-6CH

Da mesma forma que nos arranjos BD_4CH e BD_5CH, o conjunto de equações descritas abaixo permite simular a operação do arranjo com um e dois barramentos energizados, e a operação disjuntor de transferência - normalmente aberto ou fechado.

Contribuição das Falhas Passivas

Não existe contribuição aos índices de confiabilidade totais devido às falhas passivas de primeira ordem. As contribuições de segunda ordem são:

$$T_1 = \lambda_{B,B}^P + \lambda_{DJ,DJ}^P + 7 \cdot \lambda_{CH,CH}^P + 2 \cdot \lambda_{DJ,B}^P + 5 \cdot \lambda_{DJ,CH}^P + 6 \cdot \lambda_{B,CH}^P \quad (52)$$

$$T_2 = \lambda_{DJ,DJ}^P + \lambda_{CH,CH}^P + 2 \cdot \lambda_{DJ,CH}^P \quad (53)$$

$$T_3 = \lambda_{B,B}^P \cdot r_{B,B} + \lambda_{DJ,DJ}^P \cdot r_{DJ,DJ} + 7 \cdot \lambda_{CH,CH}^P \cdot r_{CH,CH} + 2 \cdot \lambda_{DJ,B}^P \cdot r_{DJ,B} + 5 \cdot \lambda_{DJ,CH}^P \cdot r_{DJ,CH} + 6 \cdot \lambda_{B,CH}^P \cdot r_{B,CH} \quad (54)$$

$$T_4 = \lambda_{DJ,DJ}^P \cdot r_{DJ,DJ} + \lambda_{CH,CH}^P \cdot r_{CH,CH} + 2 \cdot \lambda_{DJ,CH}^P \cdot r_{DJ,CH} \quad (55)$$

$$\lambda_{BD_6CH}^P = T_1 + \alpha_F \cdot T_2 \quad (56)$$

$$U_{BD_6CH}^P = T_3 + \alpha_F \cdot T_4 \quad (57)$$

Contribuição das Falhas Ativas

Em relação ao arranjo BD_4CH:

$$H_1 = \alpha_f + NF_1 + NG_{1/5CH} + 2 \cdot NF_{1/6CH} \quad (58)$$

$$H_2 = 2 \cdot NF_{1/6CH} \quad (59)$$

$$\lambda_{BD_6CH}^A = \lambda_{BD_4CH}^A + H_1 \cdot \lambda_{CH}^A + H_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \quad (60)$$

$$U_{BD_6CH}^{DP} = U_{BD_4CH}^{DP} + H_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot S_{CH} + H_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot t_c \quad (61)$$

Em relação ao arranjo BD_5CH:

$$I_1 = \alpha_f + 2 \cdot NF_{1/6CH} \quad (62)$$

$$\lambda_{BD_6CH}^A = \lambda_{BD_5CH}^A + I_1 \cdot \lambda_{CH}^A + H_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \quad (63)$$

$$U_{BD_6CH}^A = U_{BD_5CH}^A + I_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot S_{CH} + H_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot t_c \quad (64)$$

Contribuição das Falhas por Disjuntor Preso

Em relação ao arranjo BD_4CH:

$$J_1 = \alpha_C \cdot (2 \cdot \alpha_T \cdot NF_{2/6CH} + 4 \cdot \beta_1 \cdot NF_{1/6CH}) \quad (65)$$

$$J_2 = \alpha_C \cdot (2 \cdot \alpha_T \cdot NF_{2/6CH}) \quad (66)$$

$$\lambda_{BD_6CH}^{DP} = \lambda_{BD_4CH}^{DP} + [(F_2 + J_1) \cdot \lambda_{CH}^A + J_2 \cdot \lambda_{DJ}^A] \cdot P \quad (67)$$

$$U_{BD_6CH}^{DP} = U_{BD_4CH}^{DP} + [(F_2 + J_1) \cdot \lambda_{CH}^A \cdot R_{CH} + J_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot R_{DJ}] \cdot P \quad (68)$$

Em relação ao arranjo BD_5CH:

$$\lambda_{BD_6CH}^{DP} = \lambda_{BD_5CH}^{DP} + J_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot P + J_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot P \quad (69)$$

$$U_{BD_6CH}^{DP} = U_{BD_5CH}^{DP} + J_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot R_{CH} \cdot P + J_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot R_{DJ} \cdot P \quad (70)$$

4.2.6 Arranjo Físico BPT

O conjunto de equações descritas abaixo permitem calcular os índices de confiabilidade para configurações com vãos completos e incompletos.

Contribuição das Falhas Passivas

$$V_2 = (1 - BI_C) + \alpha_F \cdot (1 - BI_F) \quad (71)$$

$$\lambda_{BPT}^P = \lambda_B^P + V_2 \cdot \lambda_{CH}^P \quad (72)$$

$$U_{BPT}^P = \lambda_B^P \cdot r_B + V_2 \cdot \lambda_{CH}^P \cdot r_{CH} \quad (73)$$

$BI_C = 1$ - Se o vão da carga for completo

0 - Se o vão da carga for incompleto.

$BI_F = 1$ - Se o vão da fonte for completo

0 - Se o vão da fonte for incompleto.

Contribuição das Falhas Ativas

$$L_1 = f + NPC + NFC + (1 - \alpha_f) \cdot NFI + \alpha_f \cdot BIF + BIC \quad (74)$$

$$L_2 = NPC + NFC \quad (75)$$

$$\lambda_{BPT}^A = L_1 \cdot \lambda_{CH}^A + L_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \quad (76)$$

$$U_{BPT}^A = L_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot S_{CH} + L_2 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot t_c \quad (77)$$

NPI = N° de PC incompletos.

NPC = N° de pontos de carga completos.

NFI = N° de fontes incompletas.

NFC = N° de fontes completas.

$f = NPI$ - Se $BI_C = 1$ (vão completo).

$NPI - 1$ - Se $BI_C = 0$ (vão incompleto).

Contribuição das Falhas por Disjuntor Preso

$$M_1 = \alpha_C \cdot [(1 - \alpha_f) \cdot NFC + (NPC - BIC)] \quad (78)$$

$$\lambda_{BPT}^{DP} = M_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot P \quad (79)$$

$$U_{BPT}^{DP} = M_1 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot R_{CH} \cdot P \quad (80)$$

4.2.7 Arranjo Físico BS

O conjunto de equações descritas abaixo permitem calcular os índices de confiabilidade para configurações com vãos completos e incompletos.

Contribuição das Falhas Passivas

$$N_1 = 1 + BI_C + \alpha_F \cdot (1 + BI_F) \quad (81)$$

$$N_{21} = BI_C + \alpha_F \cdot BI_F \quad (82)$$

$$\lambda_{BS}^P = \lambda_B^P + N_1 \cdot \lambda_{CH}^P + N_2 \cdot \lambda_{DJ}^P \quad (83)$$

$$U_{BS}^P = \lambda_B^P \cdot r_B + N_1 \cdot \lambda_{CH}^P \cdot r_{CH} + N_2 \cdot \lambda_{DJ}^P \cdot r_{DJ} \quad (84)$$

Contribuição das Falhas Ativas

$$N_3 = (1 - \alpha_f) \cdot (NFC + NFI) + NPC + NPI - 1 \quad (85)$$

$$N_4 = (1 - \alpha_f) \cdot NFC + NPC - BIC \quad (86)$$

$$\lambda_{BS}^A = N_3 \cdot \lambda_{CH}^A + N_4 \cdot \lambda_{DJ}^A \quad (87)$$

$$U_{BS}^A = N_3 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot S_{CH} + N_4 \cdot \lambda_{DJ}^A \cdot t_c \quad (88)$$

Contribuição das Falhas por Disjuntor Preso

$$N_5 = \alpha_C \cdot [(1 - \alpha_F) \cdot N_{FC} + N_{PC} - BIC] \quad (89)$$

$$\lambda_{BS}^{DP} = N_5 \cdot \lambda_{CH}^A \cdot p \quad (90)$$

$$U_{BS}^{DP} = N_5 \lambda_{CH}^A \cdot R_{CH} \cdot p \quad (91)$$

5.0 ESTUDOS DE CASOS

Este item ilustra a precisão dos índices de confiabilidade calculados e a simplicidade de uso da metodologia desenvolvida através de estudos de casos, envolvendo os diversos tipos de arranjos mencionados anteriormente. Os dados utilizados nas análises dos arranjos estão apresentados nas Tabela 1 e 2.

TABELA 1: Dados dos Arranjos D1/2 e D1/2M

Equipamentos	Falhas Passivas		Falhas Ativas			
	λ^p	r	λ^A	S	t_c	P
Barramento	0,020	8,2	0,020	3,0		
Disjuntor	0,025	72	0,025	0,5		0,005
Chave	0,003	6	0,003	3,0	0,5	
T. Corrente	0,008	12	0,008	0,5		

TABELA 2: Arranjos BD_6CH, BD_5CH, BD_4CH, BPT e BS

Equipamentos	Falhas Passivas		Falhas Ativas			
	λ^p	r	λ^A	S	t_c	P
Barramento	0,028	9,9	0,020	3,0		
Disjuntor	0,045	72	0,025	0,5		0,005
Chave	0,003	6	0,003	3,0	0,5	
T. Corrente	0,0054	12	0,0054	0,5		

As Tabelas 3 a 9 apresentam os índices de confiabilidade por ponto de carga, traduzidos em termos de Frequência de interrupção (F – falha/ano), Duração média de interrupção (D – hora) e Indisponibilidade (U – hora/ano), associados a cada um dos arranjos.

5.1 Caso 1: Arranjo D1/2

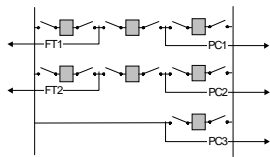


FIGURA 1: Caso 1 - Arranjo D1/2

Neste caso, os coeficientes das equações têm os seguintes valores: $\alpha_L = 1$, $\alpha_F = 0$, $\alpha_D = 1$, $NV = 3$, $K_2 = 1$, $K_4 = 0$, $\beta = 0$, $f_1 = 1$, $f_2 = (1 + K_1)$, $f_4 = (1 - K_1)$, $K_1 = 0$ e $(PC3 \Rightarrow K_1 = 1)$

TABELA 3: Índices de Confiabilidade do Arranjo D1/2

Pontos de Carga	Metodologia			CST		
	F	D	U	F	D	U
PC1 e PC2	0,073	0,71	0,052	0,073	0,72	0,052
PC3	0,073	0,71	0,052	0,073	0,72	0,052

5.2 Caso 2: Arranjo D1/2M

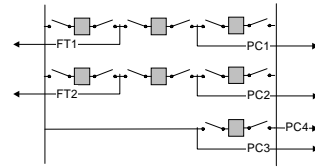


FIGURA 2: Caso 2 - Arranjo D1/2M

Neste caso, os coeficientes das equações têm os seguintes valores: $\alpha_L = 1$, $\alpha_F = 0$, $\alpha_D = 1$, $NV = 3$, $K_3 = 1$, $K_4 = 0$, $\beta = 0$, $f_1 = 1$, $f_2 = (1 + K_1)$, $f_4 = (1 - K_1)$, $K_1 = 0$, $(PC3 \Rightarrow K_1 = 1)$, $(PC4 \Rightarrow K_3 = 0, K_5 = K_2)$.

TABELA 4: Índices de Confiabilidade do Arranjo D1/2M

Pontos de Carga	Metodologia			CST		
	F	D	U	F	D	U
PC1, PC2	0,073	0,71	0,052	0,073	0,72	0,052
PC3	0,073	0,71	0,052	0,073	0,72	0,052
PC4	0,105	2,18	0,229	0,105	2,18	0,229

5.3 Caso 3: Arranjo Físico BD_4CH

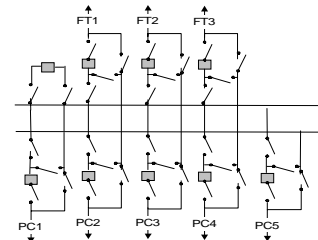


FIGURA 3: Caso 3 - Arranjo BD_4CH

Neste caso, os coeficientes das equações têm os seguintes valores: $\alpha_T = 1$, $\alpha_F = 0$, $\alpha_C = 1$, $\beta_1 = 1$ (para barra B1 - barra superior) e $\beta_1 = 0$ (para barra B2 - barra inferior), $NF_1 = 2$, $NC_1 = 3$, $NF_2 = 1$, $NC_2 = 2$.

TABELA 5: Índices de Confiabilidade do Arranjo BD_4CH

Pontos de Carga	Metodologia			CST		
	F	D	U	F	D	U
*PC1, 3 e 5	0,320	0,89	0,285	0,320	0,89	0,285
+PC2 e 4	0,224	0,99	0,222	0,224	0,99	0,222

* Barramento superior + Barramento inferior

5.4 Caso 4: Arranjo Físico BD_5CH

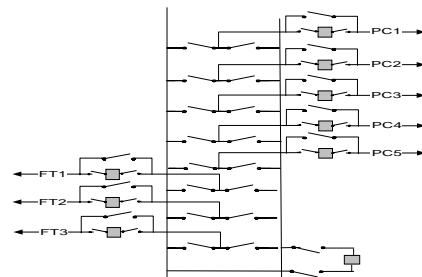


FIGURA 4: Caso 4 - Arranjo BD_5CH

Neste caso, os coeficientes das equações têm os seguintes valores: $\alpha_T = 0$, $\alpha_F = 0$, $\alpha_C = 1$, $\beta_1 = 1$, $NF_1 = 3$, $NC_1 = 5$.

TABELA 6: Índices de Confiabilidade do Arranjo BD_5CH

Pontos de Carga	Metodologia			CST		
	F	D	U	F	D	U
PC1 a PC4	0,439	0,95	0,419	0,439	0,95	0,419

5.5 Caso 5: Arranjo Físico BD_6CH

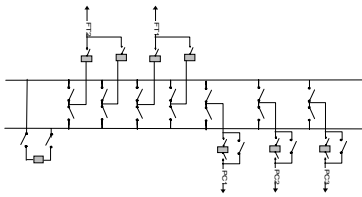


FIGURA 5: Caso 5 - Arranjo BD_6CH

Neste caso, os coeficientes das equações têm os seguintes valores: $\alpha_T = 0$, $\alpha_F = 0$, $\alpha_C = 1$, $\beta_1 = 1$, $NF_{1/5ch} = 0$, $NF_{1/6ch} = 2$, $NC1 = 3$

TABELA 7: Índices de Confiabilidade do Arranjo BD_6CH

Pontos de Carga	Metodologia			CST		
	F	D	U	F	D	U
PC1 a PC3	0,376	0,91	0,342	0,376	0,91	0,342

5.6 Caso 6: Arranjo Físico BPT

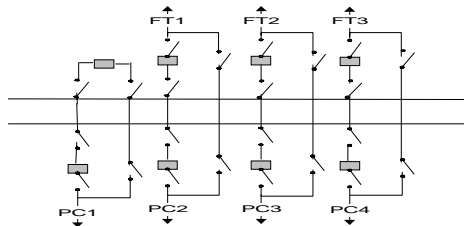


FIGURA 6: Caso 6 - Arranjo BPT

Neste caso, os coeficientes das equações têm os seguintes valores: $\alpha_F = 0$, $\alpha_C = 1$, $f = NPI = 0$, $NPI = 0$, $NFI = 0$, $NFC = 3$, $NPC = 4$, $BI_c = 1$, $BI_f = 1$.

TABELA 8: Índices de Confiabilidade do Arranjo BPT

Pontos de Carga	Metodologia			CST		
	F	D	U	F	D	U
PC1 a PC4	0,367	1,38	0,508	0,367	1,38	0,508

5.7 Caso 7: Arranjo Físico BS

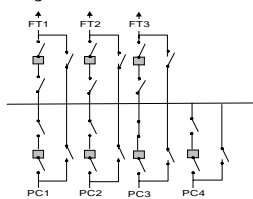


FIGURA 7: Caso 7 - Arranjo BS

Neste caso, os coeficientes das equações têm os seguintes valores: $\alpha_F = 0$, $\alpha_C = 1$, $NPI = 0$, $NFI = 0$, $NFC = 3$, $NPC = 4$, $BI_C = 1$, $BI_F = 1$.

TABELA 9: Índices de Confiabilidade do Arranjo BS

Pontos de Carga	Metodologia			CST		
	F	D	U	F	D	U
PC1 a PC4	0,367	10,19	3,74	0,367	10,19	3,74

6.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um método alternativo aos derivados dos conjuntos de cortes mínimos, para calcular índices de confiabilidade dos pontos de carga de vários tipos de esquemas de manobras de subestações. Com este método é possível avaliar a influência da:

- ✓ Quantidade de circuitos conectados nos arranjos;
- ✓ Instalação de links para interligação de barramentos;
- ✓ Instalação de chaves seccionadoras de bypass dos PCs conectados diretamente aos barramentos;
- ✓ Forma de conexão de FT e PC nos vãos;
- ✓ Políticas operativas de barramentos e disjuntores de acoplamento.

Da forma como foi concebido o conjunto de equações, fica facilitada a derivação de expressões para análise de sensibilidades dos índices de confiabilidade dos arranjos com relação às variações nos parâmetros estocásticos. Desta forma, a metodologia permite que as sensibilidades sejam calculadas simultaneamente com os índices de confiabilidade dos pontos de carga sem o reprocessamento de casos.

O método desenvolvido, por ser analítico, as informações relacionadas à topologia do arranjo e ao porte da subestação, como a quantidade de fontes de alimentação e quantidade de pontos de carga conectados, são explicitadas nas equações através de coeficientes que permitem simular configurações de vãos completos e incompletos instalados em cada um dos arranjos anteriormente citados. Este é a principal inovação em relação aos modelos existentes para análise e avaliação de confiabilidade de arranjos de subestações.

7.0 BIBLIOGRAFIA

- [1] Eletrosul: “Modelo Computacional CST – Confiabilidade de Sistemas de Transmissão – Metodologia de Cálculo de Índices de Confiabilidade de Subestações”, 1985;
- [2] Endrenyi, J.: “Reliability Modeling in Including Electric Power Systems”. John Wiley & Sons.