

Método Alternativo para Cálculo de Indicadores Médios de Continuidade e VTCDs em Sistemas de Distribuição

Homero Krauss Ribeiro Filho; José Maria de Carvalho Filho; Paulo Vitor Grillo de Souza; Thiago Clé de Oliveira

Universidade Federal de Itajubá

homerokrauss@yahoo.com.br, jmariacarvalho@gmail.com, pvgrillo@hotmail.com, thiagocle@unifei.edu.br

Resumo— Este artigo tem como objetivo apresentar um método alternativo para a obtenção de indicadores médios de continuidade e VTCDs em sistemas de distribuição. O artigo traz resultados semelhantes àqueles obtidos com o método de simulação de faltas utilizando o procedimento de simulação de Monte Carlo, utilizando como caso teste o sistema IEEE 34 barras. Os resultados obtidos foram comparados, concluindo-se que método proposto é eficiente, com implementação simples e rápida. Finalmente, são apresentadas as vantagens e desvantagens de cada método, ressaltando as situações onde cada um deve ser aplicado.

Palavras-chave—Qualidade de Energia Elétrica, Indicadores de Continuidade, VTCDs, Seletividade e Coordenação.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica (QEE) tem sido foco de discussões do setor elétrico com mais frequência, devido à preocupação comum existente dos distribuidores e consumidores de energia. Com a evolução das cargas, antes de predominância mecânica, para eletrônicas, houve um grande aumento da eficiência dos processos. Porém, aliado a isso, também houve um aumento da sensibilidade dos equipamentos aos distúrbios da QEE, principalmente as variações de tensão de curta duração (VTCDs) [1] e [2].

A filosofia de proteção tem impacto direto na qualidade da energia elétrica fornecida. O ideal é que para curtos temporários, não haja interrupção de longa duração, e se o defeito for permanente, que o menor número de clientes fique sem energia. Assim, a filosofia de proteção determina a duração dos eventos e a classificação destes em temporários ou permanentes, existindo assim uma relação entre a filosofia aplicada na rede e os distúrbios de QEE (VTCDs e interrupções) [3].

Diante das consequências com que os consumidores industriais podem ser submetidos devido à ocorrência destes distúrbios, a implantação de uma cliente industrial em um determinado local da rede de distribuição pode ter a qualidade da energia elétrica como fator determinante. Sendo assim, as distribuidoras de energia têm sido cobradas a fornecer um diagnóstico da qualidade da energia elétrica nos pontos de interesse, a fim de subsidiar a análise para viabilidade da instalação ou não daquele cliente [4].

As medições se mostram como a melhor maneira de avaliação do desempenho do sistema elétrico. Porém, principalmente para as VTCDs, é necessário um grande período de monitoração, devido à aleatoriedade destes eventos, tornando

o processo muitas vezes inviável. Para contornar esta situação, métodos de simulação podem ser utilizados como formas de estimação do comportamento ao longo dos anos. Um deles é o método de simulação de faltas utilizando o procedimento de Monte Carlo [3]. Entretanto, muitas vezes não é possível representar o sistema elétrico de maneira minimamente confiável.

A ausência de dados para modelagem, aliado a alta dinâmica de expansão do sistema na distribuição, pode trazer resultados de simulações duvidosos.

Neste contexto, o objetivo deste artigo é apresentar um método alternativo, algébrico, para contabilização de indicadores de continuidade e VTCDs em sistemas de distribuição. Será apresentada uma análise comparativa entre os resultados encontrados pelo método da simulação de faltas de Monte Carlo [4] e o método aqui denominado de algébrico [5]. Em ambos os casos, a contabilização será feita para diferentes filosofias de proteção, comprovando a sua influência nos indicadores de qualidade da energia elétrica.

II. FILOSOFIAS DE PROTEÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Basicamente existem dois tipos de filosofias de proteção: seletiva ou coordenada. Ambos os métodos se baseiam no fato de que a grande probabilidade de ocorrência de faltas no sistema elétrico pertence à categoria transitória (70-90%) [6].

Um sistema é dito seletivo quando o equipamento de proteção mais próximo ao defeito opere independentemente do tipo de falta.

Já um sistema coordenado depende da existência de relógios automáticos. Nesse caso, o sistema será coordenado se, na ocorrência de uma falta na rede, o dispositivo mais próximo ao defeito só atuará depois de algumas tentativas de religamento da proteção a montante [7].

Na Fig. 1, para uma falta no local indicado, na filosofia seletiva, somente o fusível F1 irá atuar. Já para o sistema coordenado, com uma falta no mesmo local, o religador R a montante do sistema deverá atuar e posteriormente religar, restabelecendo o fornecimento de energia caso a falta seja temporária.

Em contrapartida, se a falta for permanente, o religador fará algumas tentativas de energização do trecho a jusante para restabelecer o funcionamento da rede, e antes que seja bloqueado (*lockout*), o elo fusível atuará e isolará o trecho defeituoso.

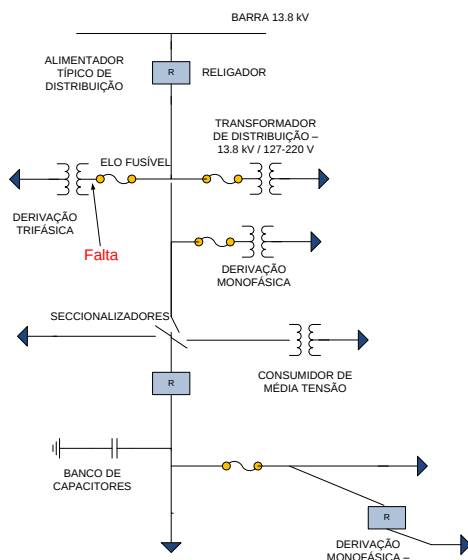


Fig. 1. Ocorrência de Falta em um Sistema Elétrico de Distribuição.

Variações das filosofias seletivas e coordenadas são utilizadas pelas distribuidoras de energia no Brasil.

Para as filosofias seletivas, não deve haver a presença de religamentos pela curva rápida, porém podem-se ter religamentos pela curva lenta. Neste caso, faltas no tronco principal protegido pelo religador serão sucedidas de tentativas de religamento, com o religador indo a bloqueio se a falta for permanente. Já os defeitos ocorridos em ramais protegidos por fusível, sempre terão a atuação prioritária deste último, isolando localmente o defeito. Outra maneira é utilizar a filosofia totalmente seletiva, onde o religador é ajustado para realizar somente uma operação pela curva lenta.

Para as filosofias coordenadas, há a ocorrência de religamentos pela curva rápida. Para faltas no tronco principal, haverá sempre a atuação do religador realizando o número de operações de acordo como foi ajustado, entre curvas rápidas e lentas, dependendo claro do tipo de falta (permanente ou transitória). Já para ocorrências nos ramais protegidos por eles fusíveis, haverá a atuação prioritária do religador antes da queima do elemento fusível, quantas vezes forem ajustadas a curva rápida do religador. Em caso de persistência do defeito, o fusível irá atuar, isolando o trecho em questão [8]. Na maioria das concessionárias de energia Brasileiras, é parametrizada uma atuação do religador pela curva rápida, sendo que em alguns casos, poderá haver duas curvas rápidas ajustadas.

III. SIMULAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Uma falta no sistema elétrico, dependendo de sua localização, do sistema de proteção, da resistência de falta e do tipo de falta, pode causar diversos distúrbios de qualidade da energia elétrica, dentre eles: afundamentos de tensão, elevações de tensão, interrupções de curta ou de longa duração.

As faltas podem ser aplicadas deterministicamente no sistema elétrico, ou seja, os pontos de falta são previamente definidos e os defeitos são aplicados em cada ponto de acordo com o interesse do estudo em questão. Entretanto, para se aproximar mais da realidade, outros métodos de simulação foram criados, se destacando o método das posições de falta

(também conhecido como curto-circuito deslizante ou enumeração de estados).

Buscando se aproximar ainda mais do comportamento do sistema real, onde a localização da falta é uma das variáveis aleatórias, foi criado o método de simulação de faltas utilizando o procedimento de Monte Carlo [9].

Neste método, funções de distribuição de probabilidade adequadas podem ser utilizadas para a representação das variáveis envolvidas, criando cenários que levam em conta as incertezas presentes no sistema real, em um longo prazo de análise. Dessa maneira, o método de Monte Carlo pode se tornar o mais atrativo para a simulação de faltas [10] e [4].

No processo, sempre haverá um erro associado. Entretanto, quanto maior for o horizonte de simulações, menor será o erro observado nos resultados [10]. Ao final da simulação, podem-se obter as diversas estatísticas desejadas como a média e desvio padrão dos indicadores. Vale dizer que a variabilidade dos indicadores (desvio padrão) não pode ser obtida através dos outros métodos de simulação citados.

Em paralelo à análise de indicadores, uma modelagem adequada da rede, assim como da proteção associada fornece valores de intensidade e duração dos eventos mais aderentes a realidade.

Na Fig. 2, é apresentado um fluxograma que ilustra o processo de simulação de faltas pelo método de Monte Carlo. Tal metodologia foi apresentada de maneira detalhada nos trabalhos [4] e [11]. Como o interesse aqui é também analisar eventos de continuidade (interrupções de curta e longa duração), além de VTCDs, algumas modificações foram feitas.

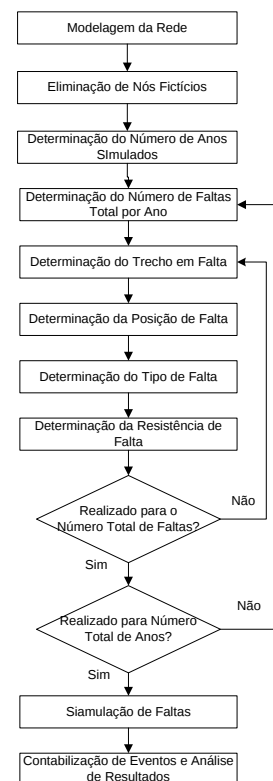


Fig. 3. Fluxograma do Procedimento de Simulação

A taxa de falta utilizada para a simulação deve ser obtida através de um longo período de observação no sistema que

está em estudo. Entretanto, alternativamente, embora não seja ideal, podem-se utilizar dados típicos obtidos de outros trabalhos publicados na área [4] e [11].

IV. PROPOSTA DE MÉTODO ALGÉBRICO PARA O CÁLCULO DE INDICADORES

A proposta deste artigo é apresentar um método alternativo ao de simulação de faltas utilizando o procedimento de Monte Carlo para contabilização de indicadores em sistemas de distribuição, que pode ser facilmente implementado em qualquer *software* que disponha de ferramentas matemáticas, como o Excel [5].

Como apresentado no item anterior, a simulação de faltas é uma ferramenta poderosa para o cálculo e análise de indicadores do sistema elétrico. Entretanto, muitas vezes o preparo e simulação de uma base de dados requerem um tempo relativamente alto.

Quando não se deseja aprofundar nas análises de variabilidade dos indicadores, mas busca-se obter apenas um valor médio estimado para os indicadores, pode-se utilizar um método algébrico, sem a utilização da simulação já abordada. Este método se baseia em equações dependentes das variáveis: taxas de falta das linhas de distribuição, da localização da barra monitorada no sistema (barra à montante de todos dispositivos de proteção, barra no tronco principal ou barra no ramal), filosofia e dispositivos de proteção utilizados (padrão de eventos ocorridos para uma falta permanente ou transitória), comprimento de rede do tronco principal e ramais e comprimento da área de vulnerabilidade equivalente para o ponto de monitoramento desejado.

A. Premissas para o Método Algébrico Proposto

- 1) Afundamentos de tensão seguidos de interrupções são contabilizados como sendo interrupções, já que é o evento mais severo;
- 2) São consideradas faltas permanentes e transitórias, sendo que os defeitos transitórios podem ser eliminados no 1º, 2º ou 3º religamento, cada qual com uma probabilidade de sucesso associada;
- 3) Cálculos válidos para sistemas protegidos por religadores (tronco principal) e fusíveis (ramais), onde a proteção é adequadamente ajustada para toda rede;
- 4) É considerado somente um alimentador para análise, muito embora a análise possa ser estendida quando o sistema possui diversos alimentadores;
- 5) As equações dependem da filosofia de proteção adotada.

B. Metodologia Proposta

Para o cálculo do valor médio dos indicadores utilizando o método alternativo, propõe-se utilizar a metodologia sintetizada no fluxograma apresentado na Fig.3. Para sua melhor visualização, simplificou-se o termo “área de vulnerabilidade equivalente” por “A.V.E”. Abaixo também são mostradas algumas definições necessárias para o entendimento do fluxograma.

Definição do tipo de barra a ser monitorada: são consideradas três tipos possíveis de barras: barra localizada a montante

de todos os dispositivos de proteção (secundário do transformador da subestação de distribuição, por exemplo), barra localizada no tronco principal e barra localizada em ramais. Esta localização influenciará diretamente em qual equação utilizar para o cálculo dos indicadores, já que o perfil de eventos sofridos em cada barramento também se altera, para faltas no tronco ou nos ramais.

Busca pelo comprimento dos trechos e A.V.E: Interrupções estão intimamente ligadas ao comprimento do trecho (zona de proteção) de cada dispositivo. Já as VTCDs estão ligadas ao comprimento da A.V.E. Ao multiplicar-se o valor da taxa de falta (número de faltas ao ano por quilômetro de rede) pelo comprimento do trecho ou A.V.E, tem-se o número esperado do indicador.

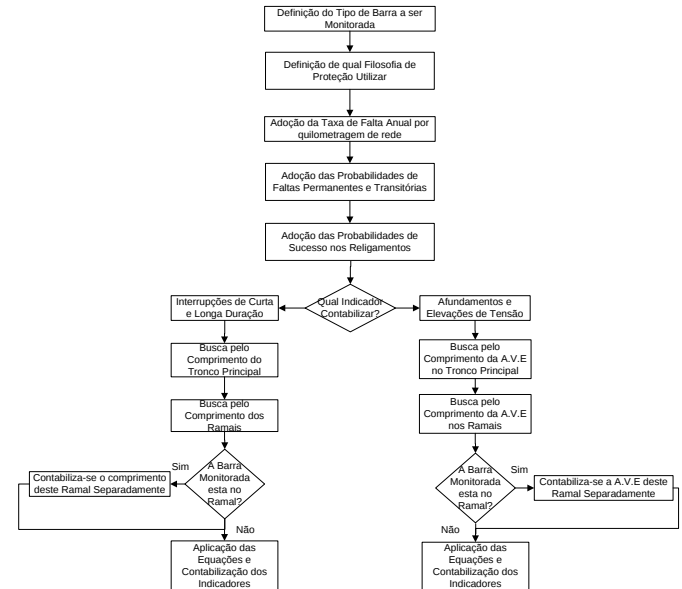


Fig. 3. Fluxograma do Procedimento Alternativo Proposto.

O conceito de área de vulnerabilidade nada mais é que a região do sistema onde a ocorrência de faltas irá causar afundamentos e/ou elevações de tensão em determinado ponto de interesse. Como afundamentos e elevações de tensão são eventos distintos, cada um dá origem a uma área de vulnerabilidade diferente, para uma mesma barra monitorada. Além disso, cada tipo de falta tem um determinado impacto no sistema, e com isso gera diferentes comprimentos para a área de vulnerabilidade. Daí surge o conceito de área de vulnerabilidade equivalente, calculado de acordo com a equação (1).

$$AVE = P_{FT} \times AV_{FT} + P_{FF} \times AV_{FF} + P_{FFT} \times AV_{FFT} + P_{3F} \times AV_{3F} \quad (1)$$

Onde: $P_{FT}, P_{FF}, P_{FFT}, P_{3F}$ são as probabilidades de ocorrência de cada falta considerada; $AV_{FT}, AV_{FF}, AV_{FFT}, AV_{3F}$ são as áreas de vulnerabilidade calculadas para o evento considerado (elevação ou afundamento de tensão).

C. Equações Gerais Propostas

A partir da metodologia apresentada, podem-se definir equações para o cálculo de indicadores de qualidade da energia elétrica, dependentes da filosofia de proteção adotada e do ponto de monitoramento analisado. Como já dito, tem-se três

pontos de monitoramento possíveis: barramento à montante de todo sistema de distribuição, barramento no tronco principal e barramento localizado no ramal.

Os dois primeiros casos citados estão no tronco principal, com a única diferença para a localização do religador. Sendo assim, a equação para ambos os casos se torna a mesma, alterando apenas o padrão de eventos para cada uma das barras, que dependem exclusivamente da filosofia de proteção adotada. Já para barramentos localizados em ramais, há uma equação proposta separadamente, dependente também do padrão de eventos. Esse padrão de eventos é apresentado detalhadamente em [4], descritos para 4 diferentes filosofias de proteção conforme tabelas apresentadas no anexo. Resumidamente, pode-se entender este padrão como sendo os eventos sofridos por um barramento, para uma falta localizada no tronco principal ou ramal, em cada uma das situações: sucesso no 1°, 2°, 3° ou falta permanente. Tal situação se repete, dependendo apenas da localização da barra monitorada, do ponto de falta e da filosofia de proteção utilizada [5]. De maneira geral, se quantifica os eventos para pontos de monitoramento no tronco principal, através da equação (2) e barras de monitoramento em ramais através da equação (3):

$$NE_{BTP} = TF \times [C_{TP} \times (T_1 \times E_{T1BTP} + T_2 \times E_{T2BTP} + T_3 \times E_{T3BTP} + FP \times E_{TPBTP}) + C_R \times (T_1 \times E_{R1BTP} + T_2 \times E_{R2BTP} + T_3 \times E_{R3BTP} + FP \times E_{RPBTP})] \quad (2)$$

$$NE_{BR} = TF \times [C_{TP} \times (T_1 \times E_{T1BR} + T_2 \times E_{T2BR} + T_3 \times E_{T3BR} + FP \times E_{TPBR}) + C_{OR} \times (T_1 \times E_{OR1BR} + T_2 \times E_{OR2BR} + T_3 \times E_{OR3BR} + FP \times E_{ORPBR}) + C_{PR} \times (T_1 \times E_{PR1BR} + T_2 \times E_{PR2BR} + T_3 \times E_{PR3BR} + FP \times E_{PRPBR})] \quad (3)$$

Nas equações: NE_B é o número de eventos esperado no local da barra monitorada (tronco ou ramal); TF é a taxa de falta; T_1, T_2 e T_3 são as probabilidades de sucesso no 1°, 2° ou 3° religamento, respectivamente; FP é a probabilidade da falta ser permanente; C_{TP} e C_R são os comprimentos de trechos de acordo com o indicador de interesse – para interrupções: comprimento do tronco e ramais – para AMTs e EMTs: A.V.E: área de vulnerabilidade equivalente do tronco e ramais para a fundação e elevações de tensão. Por fim, o índice E_{ZXY} representa o padrão de eventos, dependente da filosofia de proteção, sofridas pela barra Y (tronco principal (TP) ou ramal (R)) devido a uma falta Z transitória (1, 2, 3) ou permanente (P) no local X (tronco principal (T) ou ramal (R)) [5].

Vale ressaltar que para barras monitoradas em ramais, tem-se uma terceira parcela somada que é referente aos eventos oriundos de defeitos no próprio ramal (PR) de monitoração. Essa divisão é necessária, pois os padrões de eventos para faltas em outros ramais (OR) são diferentes dos padrões para faltas no próprio ramal de monitoramento.

V. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MÉTODO ALGÉBRICO

O sistema de distribuição utilizado como caso teste é o IEEE 34 barras [12], disponibilizado na base de dados do IEEE. A modelagem do sistema e configuração dos dados de proteção, além das simulações de faltas, foram realizadas no *software* ASPEN DistriView [13].

O estudo é dividido em duas etapas, onde primeiramente aplica-se o método de simulação de Monte Carlo para aplicação de faltas, explorando a variabilidade dos resultados obtidos. Além disso, o método algébrico também é aplicado, e os resultados são comparados com aqueles encontrados pelo outro método. Apresentam-se também as principais vantagens e desvantagens de cada metodologia, mencionando as situações mais apropriadas para a aplicação de cada um deles. Para validação do método é utilizado como exemplo quatro filosofias de proteção: 1L (totalmente seletiva – uma atuação pela curva lenta), 4L (4 atuações pela curva lenta, 1R3L (uma curva rápida e três lentas ajustadas) e 2R2L (duas curvas rápidas e duas lentas ajustadas).

A. IEEE 34 Barras Modificado

Foram realizadas algumas modificações e simplificações que serão enumeradas a seguir [5]:

- 1) Representação de um equivalente de suprimento para o estudo de curto circuito. O valor da potência de curto-circuito trifásica atribuída foi de 676 MVA, com uma relação X/R de 4,33. Para a potência de curto-circuito monofásica, o valor é 467 MVA, com X/R = 4,02;
- 2) Retirada do circuito original alimentado em 4,16 kV;
- 3) Alteração da potência e impedância do transformador de entrada para 5 MVA e 7% com X/R = 12, respectivamente;
- 4) Inclusão dos dispositivos de proteção, basicamente, religador na saída da subestação e elos fusíveis nos ramais, conforme [5].

Na Fig. 4 é mostrado o sistema já com tais modificações inseridas no *software* ASPEN DistriView [13], com as barras de interesse em destaque: 800: tronco a montante de todo sistema, 812: tronco principal protegido por religador e 840: ramal protegido por fusível. Dessa forma são contemplados os três tipos de barramento conforme classificação já apresentada.

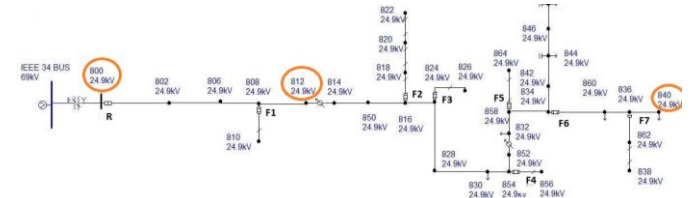


Fig.4. IEEE 34 Barras Modificado.

B. Resultados - Simulação de Faltas pelo Método de Monte Carlo

Os parâmetros utilizados como dados de entrada foram:

- Taxa de falta de 30 faltas por 100 km ao ano;
- Foram simulados 100 anos;
- O valor da resistência de falta é sorteado segundo a distribuição uniforme entre zero e o valor máximo. O valor máximo é atribuído para cada tipo de falta, sendo 10 Ohms para falta trifásica-terra, 30 Ohms para falta bifásica-terra, 20 Ohms para falta bifásica e 30 Ohms para falta fase-terra [4];
- As probabilidades para cada tipo de falta são: trifásica – 3%, bifásica – 9%, bifásica-terra: 10% e fase-terra: 78% [14];

- A probabilidade de ocorrência de faltas permanentes é de 20% e de faltas temporárias é de 80% [6];
- Das faltas temporárias, 90% são eliminadas no 1º religamento, 9% no 2º religamento e 1% no 3º religamento [4];

Como a proposta do artigo é a validação do método algébrico para contabilização de indicadores com base nos resultados encontrados no método de Monte Carlo, por questões de espaço, serão apresentados graficamente apenas os resultados para a barra 800, conforme Fig. 5.

O barramento 800, por estar localizado a montante de todos os dispositivos de proteção do alimentador, sofre apenas AMTs. As elevações não foram registradas, devido a localização da barra 800 (barra localizada junto ao transformador da SE) [5]. Na Fig. 5, é apresentado o resultado ano a ano (100 anos), com média e desvio padrão para os eventos de afundamentos de tensão.

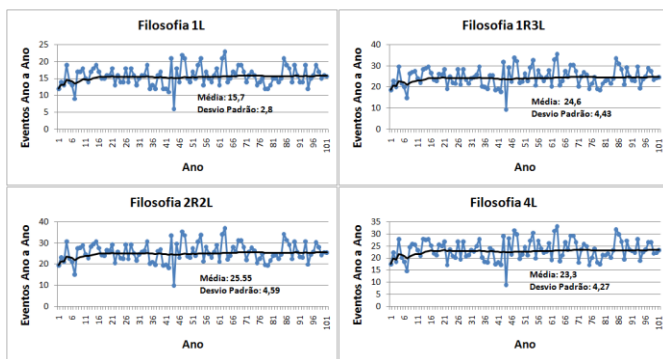


Fig. 5. Distribuição Anual de AMTs na Barra 800 – Variabilidade de Eventos

Da Fig. 5, pode se perceber que os AMTs podem sofrer variações bruscas de ano para ano. Isso se deve a aleatoriedade do evento. Por exemplo, para a filosofia 2R2L, pode-se ter de 9 a 37 eventos. No entanto, constata-se que o número médio de eventos converge para um valor final, que será comparado com os resultados obtidos pelo método alternativo.

C. Resultados Obtidos – Método Algébrico

Conforme já comentado, outra maneira para analisar a contabilização de indicadores de qualidade da energia elétrica, porém sem o uso da simulação de Monte Carlo é o método algébrico proposto neste artigo.

As premissas utilizadas para aplicação do método alternativo são basicamente as mesmas adotadas no método de Monte Carlos, acrescidas dos comprimentos do tronco principal e ramais - O comprimento do tronco principal, C_{TP} , referente ao IEEE 34 Barras Modificado é de 57,59 km. Já o comprimento dos ramais, C_R , é 32,86 km;

Para a validação do procedimento alternativo, será feita uma comparação com valores médios encontrados dos indicadores para o cenário de 100 anos de simulação de faltas pelo método de Monte Carlo. A resistência de falta utilizada para esta comparação foi 0 ohms em ambos os métodos.

A Tabela I apresenta os valores das A.V.E calculadas para o IEEE 34 Barras Modificado, em cada ponto de monitoração, considerando resistência de falta igual a 0 Ohms. Como ressaltado anteriormente, é necessária a divisão do compri-

mento de ramais, quando o ponto de interesse é um ramal. Para visualização, os termos “Outros Ramais” e “Próprio Ramal” foram abreviados por “O. Ramais” e “P. Ramal”, respectivamente.

TABELA I – A.V.E PARA RESISTÊNCIA DE FALTA IGUAL A 0 OHMS.

Barra	Local	A.V.E (km) Afundamentos	A.V.E (km) - Elevações
800	Tronco	51,42	0,00
	Ramal	29,11	0,00
812	Tronco	57,59	25,88
	Ramal	32,86	22,02
840	Tronco	57,59	41,79
	O. Ramais	31,17	31,17
	P. Ramal	1,69	1,69

A Tabela II apresenta uma compilação com os resultados encontrados no método de Monte Carlo e no método Algébrico, para as interrupções de longa e curta duração, afundamento e elevações de tensão.

Como pode ser observado pelo erro percentual calculado em relação aos resultados obtidos da simulação de Monte Carlo, o método algébrico utilizado para o cálculo de indicadores médios se mostrou bastante satisfatório. O erro não ultrapassou 3,19 %, o que não é significativo no campo de aplicação da engenharia.

TABELA II – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS RESULTANTES DO MÉTODO ALGÉBRICO E DA SIMULAÇÃO DE FALTAS.

Filosofia de Proteção	Barra Monitorada	Eventos	Contabilização		Diferença Percentual
			Método Alternativo	Simulação de Faltas	
1L	800	1L	0,00	0,00	0,00
		I.C	0,00	0,00	0,00
		AMT	24,16	24,10	0,24
		EMT	0,00	0,00	0,00
	812	1L	17,28	17,10	1,04
		I.C	0,00	0,00	0,00
		AMT	9,86	9,90	-0,44
		EMT	14,37	14,52	-1,03
	840	1L	17,78	17,52	1,51
		I.C	0,00	0,00	0,00
		AMT	9,35	9,48	-1,36
		EMT	22,39	22,18	0,96
1R3L	800	1L	0,00	0,00	0,00
		I.C	0,00	0,00	0,00
		AMT	37,22	37,09	0,34
		EMT	0,00	0,00	0,00
	812	1L	3,46	3,42	1,04
		I.C	35,56	35,34	0,62
		AMT	0,00	0,00	0,00
		EMT	21,56	21,81	-1,13
	840	1L	3,60	3,54	1,69
		I.C	35,57	35,34	0,63
		AMT	0,00	0,00	0,00
		EMT	33,78	33,42	1,07
2R2L	800	1L	0,00	0,00	0,00
		I.C	0,00	0,00	0,00
		AMT	39,03	38,92	0,29
		EMT	0,00	0,00	0,00
	812	1L	3,46	3,42	1,04
		I.C	38,32	38,12	0,55
		AMT	0,00	0,00	0,00
		EMT	22,94	23,19	-1,08
	840	1L	3,56	3,51	1,53
		I.C	38,33	38,12	0,55
		AMT	0,00	0,00	0,00
		EMT	35,83	35,47	1,01
4L	800	1L	0,00	0,00	0,00
		I.C	0,00	0,00	0,00
		AMT	34,77	34,63	0,42
		EMT	0,00	0,00	0,00
	812	1L	3,46	3,42	1,04
		I.C	25,71	25,44	1,04
		AMT	9,86	9,90	-0,44
		EMT	19,71	19,96	-1,22
	840	1L	3,96	3,84	3,19
		I.C	25,71	25,44	1,04
		AMT	9,35	9,48	-1,36
		EMT	31,02	30,66	1,16

O método algébrico foi calculado para o caso mais crítico – resistência de falta 0 ohms. Porém, pode ser calculado para vários cenários de resistência de falta.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia alternativa para a contabilização de indicadores médios de continuidade e VTCDs, através da utilização de equações algébricas simples, sem a necessidade de utilizar a simulação de faltas pelo método Monte Carlo.

A validação do método algébrico foi obtida com sucesso, utilizando como caso teste o sistema IEEE 34 barras, e pode-se concluir que os erros encontrados foram muito pequenos, praticamente desprezíveis.

O procedimento proposto se mostrou satisfatório, de implementação simples e rápida e sem a necessidade de realizar todo o procedimento associado à simulação estocástica de eventos. Adicionalmente, o novo método permite realizar uma estimativa dos indicadores médios em cenários diferentes, o que se mostra bastante adequado quando se deseja realizar uma análise preliminar de desempenho determinado barramento do sistema elétrico de distribuição de interesse.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARVALHO FILHO, J. M. **Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis – Proposta de Novos Indicadores**, 2000. Tese de Doutorado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá
- [2] PRODIST. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 2017.
- [3] CLÉ DE OLIVEIRA, T.; CARVALHO FILHO, J. M. DE; GODINHO CARVALHO, J. **Influência da Proteção nos Indicadores de Continuidade e de Variações de Tensão de Curta Duração**. Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica. Cuiabá, 2011.
- [4] HONORATO, K. **Simulação Estocástica de VTCDs em Sistemas de Distribuição**, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Dezembro de 2014.
- [5] KRAUSS, H. R. F. **Impacto de Diferentes Filosofias de Proteção na Qualidade da Energia Elétrica**, Dissertação de Mestrado, UNIFEI, Março de 2017.
- [6] GUIGUER. Proteção de Sistemas de Distribuição. Editora Sagra, 1ª Edição. Porto Alegre, 1988.
- [7] KOJOVIC, L. A.; HASSLER, S. P.; LEIX, K. L.; WILLIAMS, C. W.; BAKER, E. E. **Comparative Analysis of Expulsion and Current-limiting Fuse Operation in Distribution System for Improved Power Quality and Protection**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 13, 1998.
- [8] ELETROBRÁS – Eletrobrás Comitê de Distribuição; **Proteção de sistemas aéreos de distribuição** – Volume 2; Rio de Janeiro: Campus, 1982; 233 páginas.
- [9] BOLLEN, M. H. J. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions**. 2000.
- [10] OLIVEIRA, T. C. DE. **Afundamentos de Tensão: Avaliação Estatística de Resultados de Medição com Base em Simulações**, 2008. Tese de Doutorado, Unifei.
- [11] HONORATO, K., FILHO, J. M. C., DE OLIVEIRA, T. C., FILHO, J. M., SIQUEIRA, M. J. V., PEREIRA, N. B., PEREIRA, J. R. **Simulação Estocástica de Variações de Tensão de Curta Duração em Sistemas de Distribuição**, SBSE, 2014.
- [12] IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee, Distribution test Feeders – Online. (2015). Disponível em: <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>
- [13] ASPEN. DistriView. Disponível em: http://www.aspeninc.com/web/index27cb.html?option=com_content&view=article&id=87&Itemid=68.
- [14] GARCIA, C. P.; ALVES, M. F. **Dimensionamento de Compensadores Série Considerando a Frequência de Ocorrência dos Afundamentos**. Anais do IX CBQEE, p. 255–259, 2011. Cuiabá.
- [15] SEMI F47-0200. Specification for semiconductor processing equipment. Power Standards Ltd. 1999.

VIII. ANEXOS

Esta seção tem como objetivo apresentar os padrões de eventos para as filosofias de proteção analisadas no trabalho. Esses valores dependem da localização da barra monitorada e do local da falta, com distinção para faltas transitórias e permanentes. De maneira geral, nada mais é que o resultado em uma barra de interesse, devido a um tipo de falta em algum local do sistema ajustado com uma filosofia de proteção.

Algumas abreviações foram utilizadas para melhor visualização da tabela. São elas: T.P – tronco principal; Int. Longa – interrupções de longa duração; Int. Curta – interrupções de curta duração; Suc. X° Rel. – falta com sucesso no religamento X; Falt. Perm. - falta permanente. Na Tabela III, é apresentado um resumo com os padrões de eventos para os 3 tipos de barramentos explorados no trabalho, considerando os indicadores (interrupção de longa e curta duração, VTCDs), as 4 filosofias de proteção consideradas no artigo e o local de aplicação da falta.

TABELA III – RESUMO DOS PADRÕES DE EVENTOS PARA O MÉTODO ALGÉBRICO.

Filosofia 1L											
Barra Monitorada - Montante de Todo Sistema						Barra Monitorada - Tronco Principal					
Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P	Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P
IL	T.P	0				IL	T.P	1	1	1	1
	Ramais	0					Ramais	0			
IC	T.P	0				IC	T.P	0			
	Ramais	0					Ramais	0			
AMT	T.P	1	1	1	1	AMT	T.P	0			
	Ramais	1	1	1	1		Ramais	1	1	1	1
EMT*	T.P	1	1	1	1	EMT	T.P	1	1	1	1
	Ramais	1	1	1	1		Ramais	1	1	1	1
Filosofia 1R3L											
Barra Monitorada - Montante de Todo Sistema						Barra Monitorada - Tronco Principal					
Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P	Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P
IL	T.P	0				IL	T.P	0	0	0	1
	Ramais	0					Ramais	0			
IC	T.P	0				IC	T.P	1	2	3	3
	Ramais	0					Ramais	1	1	1	1
AMT	T.P	1	2	3	4	AMT	T.P	0			
	Ramais	1	2	2	2		Ramais	0			
EMT*	T.P	1	2	3	4	EMT	T.P	1	2	3	4
	Ramais	1	2	2	2		Ramais	1	2	2	2
Filosofia 2R2L											
Barra Monitorada - Montante de Todo Sistema						Barra Monitorada - Tronco Principal					
Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P	Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P
IL	T.P	0				IL	T.P	0	0	0	1
	Ramais	0					Ramais	0			
IC	T.P	0				IC	T.P	1	2	3	3
	Ramais	0					Ramais	1	2	2	2
AMT	T.P	1	2	3	4	AMT	T.P	0			
	Ramais	1	2	3	3		Ramais	0			
EMT*	T.P	1	2	3	4	EMT	T.P	1	2	3	4
	Ramais	1	2	3	3		Ramais	1	2	3	3
Filosofia 4L											
Barra Monitorada - Montante de Todo Sistema						Barra Monitorada - Tronco Principal					
Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P	Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P
IL	T.P	0				IL	T.P	0	0	0	1
	Ramais	0					Ramais	0			
IC	T.P	0				IC	T.P	1	2	3	3
	Ramais	0					Ramais	1	2	2	2
AMT	T.P	1	2	3	4	AMT	T.P	0			
	Ramais	1	2	3	3		Ramais	0			
EMT*	T.P	1	2	3	4	EMT	T.P	1	2	3	4
	Ramais	1	2	3	3		Ramais	1	2	3	3
Filosofia 1L											
Barra Monitorada - Montante de Todo Sistema						Barra Monitorada - Tronco Principal					
Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P	Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P
IL	T.P	0				IL	T.P	0	0	0	1
	Ramais	0					Ramais	0			
IC	T.P	0				IC	T.P	1	2	3	3
	Ramais	0					Ramais	0			
AMT	T.P	1	2	3	4	AMT	T.P	0			
	Ramais	1	2	1	1		Ramais	1	1	1	1
EMT*	T.P	1	2	3	4	EMT	T.P	1	2	3	4
	Ramais	1	1	1	1		Ramais	1	1	1	1
Filosofia 1R3L											
Barra Monitorada - Ramal						Barra Monitorada - Ramal					
Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P	Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P
IL	T.P	1	1	1	1	IL	T.P	0	0	0	1
	Próprio Ramal	1	1	1	1		Próprio Ramal	0	1	1	1
IC	T.P	0				IC	T.P	0			
	Próprio Ramal	0					Próprio Ramal	1	2	3	3
AMT	T.P	0				AMT	T.P	1	1	1	1
	Próprio Ramal	0					Próprio Ramal	1	1	1	1
EMT	T.P	1	1	1	1	EMT	T.P	1	2	3	4
	Próprio Ramal	1	1	1	1		Próprio Ramal	1	2	2	2
Filosofia 2R2L						Filosofia 4L					
Barra Monitorada - Ramal						Barra Monitorada - Ramal					
Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P	Eventos	Falta	R1	R2	R3	F.P
IL	T.P	0	0	0	1	IL	T.P	0	0	0	1
	Próprio Ramal	0	0	1	1		Próprio Ramal	1	1	1	1
IC	T.P	1	2	3	3	IC	T.P	1	2	3	3
	Próprio Ramal	1	2	2	2		Próprio Ramal	0			
AMT	T.P	1	2	2	2	AMT	T.P	0			
	Próprio Ramal	1	2	2	2		Próprio Ramal	0			
EMT	T.P	1	2	3	3	EMT	T.P	1	2	3	4
	Próprio Ramal	1	2	3	3		Próprio Ramal	1	1	1	1