

**IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO DE PROTEÇÃO DE CAPACITOR SÉRIE DO TIPO
GAP CENTELHADOR EM UM PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITOS**

LIANA NOGUEIRA LEVY

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

APROVADO POR:

Prof. Alessandro Manzoni, D.Sc.
(Orientador)

Eng. Juan Ignacio Patricio Rossi, M.Sc.
(Co-orientador)

Prof. Sebastião Ercules Melo de Oliveira, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2008

A todos aqueles que nunca me
impediram de sonhar.
“The key to happiness is having
dreams... The key to success is
making dreams come true.”

Agradecimentos

Ao Eng. Sergio Porto Roméro, pesquisador do CEPTEL, por todos os conhecimentos que adquiri nos últimos dois anos.

Ao Eng. Juan Ignacio P. Rossi, pesquisador do CEPTEL, por toda a ajuda para a realização deste trabalho e toda a paciência que sempre teve ao tirar minhas dúvidas.

Ao professor Alessandro manzoni, pela orientação deste trabalho.

Aos colegas estagiários do CEPTEL, pela amizade e companheirismo. Nada como trabalhar em um ambiente de trabalho amistoso e agradável.

À minha querida amiga Roberta, pela amizade. Agradeço toda a ajuda e as palavras de estímulo.

Aos meus pais, Alain e Marise, por terem me permitido estar aqui hoje e terem me apoiado em todas as etapas da minha vida.

À minha irmã Bia, pelo companheirismo de sempre, e à minha irmã Gisele, pois todas as diferenças do mundo não mudam o fato de sermos irmãs.

Ao meu namorado Thiago, por todo o apoio e carinho. Tudo fica mais fácil quando se tem amor.

Á minha professora de inglês, Lúcia, por ter me proporcionado momentos alegres mesmo nos dias mais difíceis.

Aos meus animais que aqui ainda estão, Luppy, Pedrita e Lady, pois os animais se expressam muito melhor sem palavras do que a maior parte das pessoas que já conheci, e aos que não mais aqui estão, Minou, Lobo e Shana, pois sei que de algum lugar estão torcendo por mim.

A todos os autores que sempre me inspiraram, pois os mundos mágicos que conheci fizeram parte da minha vida universitária e foram todos inesquecíveis.

Resumo do projeto submetido ao corpo docente do departamento de engenharia elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de engenheiro eletricitista.

IMPLEMENTAÇÃO DE MODELO DE PROTEÇÃO DE CAPACITOR SÉRIE DO TIPO GAP CENTELHADOR EM UM PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE CURTO-CIRCUITOS

LIANA NOGUEIRA LEVY
Dezembro / 2008

Orientador: Alessandro Manzoni, D.Sc.

Co-orientador: Juan Ignacio Patricio Rossi, M.Sc.

Este trabalho trata da implementação do disparo automático de *gap* em capacitores série, em um programa de cálculo de curto-circuito, o ANAFAS, de propriedade do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL.

Os *gaps* centelhadores foram durante muito tempo empregados isoladamente para a proteção de capacitores série e passaram posteriormente a serem utilizados em conjunto com os Varistores de Óxido Metálico (Metal Oxide Varistors – MOVs), dispositivos estes não lineares.

Este trabalho complementa a implementação previamente existente da condução de MOVs em capacitores série, acrescentando o efeito do fechamento de *gaps* que ocorre quando tensões excessivamente altas ocorrem nos terminais de um capacitor, sendo capazes de danificá-lo. Desconsiderar estes eventuais fechamentos pode levar à obtenção de resultados distantes da realidade.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
CAPÍTULO I INTRODUÇÃO	1
I.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
I.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO II CAPACITORES SÉRIE	6
II.1 INTRODUÇÃO	6
II.2 COMPENSAÇÃO ÓTIMA	7
II.3 LOCALIZAÇÃO NA LINHA	7
II.4 EFEITOS DECORRENTES DA INTRODUÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE EM UM SISTEMA	9
II.4.1 <i>VANTAGENS PARA O SISTEMA</i>	9
II.4.2 <i>DESVANTAGENS PARA O SISTEMA</i>	15
II.5 TIPOS CONSTRUTIVOS E ESQUEMAS DE PROTEÇÃO	17
II.5.1 <i>GAP SIMPLES</i>	18
II.5.2 <i>GAP DUPLO</i>	19
II.5.3 <i>METAL OXIDE VARISTOR (MOV)</i>	20
II.6 UTILIZAÇÃO DE CAPACITORES SÉRIE NO BRASIL	24
II.7 SUMÁRIO DO CAPÍTULO	29
CAPÍTULO III IMPLEMENTAÇÃO E CRITÉRIOS PARA DISPARO	30
III.1 CONSIDERAÇÕES	30
III.2 METODOLOGIA UTILIZADA PELO PROGRAMA	30
III.3 DADOS DE ENTRADA	36
III.4 MÉTODO BÁSICO PREVIAMENTE EXISTENTE	37

III.5	AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DE ATUAÇÃO DAS PROTEÇÕES.....	41
III.5.1	NECESSIDADE DE CONDUÇÃO DE MOV	41
III.5.2	NECESSIDADE DE DISPARO DE GAP	44
III.6	MODIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DO PROGRAMA DEVIDO À PRESENÇA DE GAPS DISPARADOS.....	47
III.7	SUMÁRIO DO CAPÍTULO	54
CAPÍTULO IV	RESULTADOS	55
IV.1	CONSIDERAÇÕES.....	55
IV.2	INTERLIGAÇÃO NORTE-SUL	55
IV.2.1	CURTO TRIFÁSICO AO LONGO DA LINHA IMPERATRIZ-COLINAS	56
IV.2.2	CURTO MONOFÁSICO AO LONGO DA LINHA IMPERATRIZ-COLINAS	66
IV.2.3	ALTERAÇÕES DE NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO.....	75
IV.3	SUMÁRIO DO CAPÍTULO	79
CAPÍTULO V	CONCLUSÕES.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		82

Lista de Figuras

FIGURA 1: LINHA DE TRANSMISSÃO COMPENSADA.....	3
FIGURA 2: LOCALIZAÇÕES TÍPICAS DE CAPACITORES SÉRIE EM UMA LINHA.....	8
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO DE DOIS SISTEMAS INTERLIGADOS POR UMA LINHA.....	9
FIGURA 4: SISTEMA DE TRANSMISSÃO COMPENSADO.....	11
FIGURA 5: CURVAS POTÊNCIA-ÂNGULO PARA CURTO TRIFÁSICO NA BARRA C.....	12
FIGURA 6: CURVAS POTÊNCIA-ÂNGULO PARA REINSERÇÃO RÁPIDA.....	14
FIGURA 7: SISTEMA DE DUAS LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE.....	16
FIGURA 8: PERFIL DA TENSÃO ATRAVÉS DE UM CAPACITOR SÉRIE DEVIDO À OCORRÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ITAIPU.....	17
FIGURA 9: CAPACITOR SÉRIE COM PROTEÇÃO DO TIPO <i>GAP</i> SIMPLES.....	18
FIGURA 10: CAPACITOR SÉRIE COM PROTEÇÃO DO TIPO <i>GAP</i> DUPLO.....	19
FIGURA 11: CAPACITOR SÉRIE COM PROTEÇÃO MOV.....	20
FIGURA 12: CORRENTES NO CAPACITOR E NO MOV E CORRENTE TOTAL QUANDO O MOV ENCONTRA-SE EM CONDUÇÃO.....	21
FIGURA 13: MODELO UTILIZADO NO ESTUDO DE CAPACITORES SÉRIE PROTEGIDOS POR MOVs.....	22
FIGURA 14: IMPEDÂNCIA NORMALIZADA EM FUNÇÃO DA CORRENTE NORMALIZADA.....	23
FIGURA 15: MAPA DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL.....	25
FIGURA 16: SISTEMA DE TRANSMISSÃO ITAIPU-SÃO PAULO COM REPRESENTAÇÃO DE COMPENSAÇÃO SÉRIE.....	26
FIGURA 17: REPRESENTAÇÃO DE DOIS CAPACITORES SÉRIE POR FASE.....	27
FIGURA 18: REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DA INTERLIGAÇÃO NORTE-SUL.....	28
FIGURA 19: CONJUNTOS DE BARRAS UTILIZADOS NO CÁLCULO DE CURTO.....	31
FIGURA 20: SISTEMA EXEMPLO PARA DEMONSTRAÇÃO DE MÉTODO DE CURTO.....	33
FIGURA 21: MATRIZES DE ADMITÂNCIA DE BARRA DOS DIAGRAMAS DE SEQUÊNCIA REDUZIDOS E COMBINAÇÃO DAS TRÊS SEQUÊNCIAS NA MATRIZ Y_{012} QUANDO NÃO CONSIDERADO O DISPARO DE <i>GAP</i>	33
FIGURA 22: MATRIZ DE ADMITÂNCIA DE BARRA EM COORDENADAS DE FASE DO SISTEMA REDUZIDO QUANDO CONSIDERADO O DISPARO DE <i>GAP</i>	34
FIGURA 23: FLUXOGRAMA APRESENTANDO O MÉTODO ITERATIVO UTILIZADO PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA CONDUÇÃO DE MOVs.....	40
FIGURA 24: FLUXOGRAMA REPRESENTANDO A VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE INCLUSÃO DE MOV.....	43
FIGURA 25: FLUXOGRAMA REPRESENTANDO A VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE DISPARO DE <i>GAP</i>	46
FIGURA 26: FLUXOGRAMA GERAL REPRESENTANDO A AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DE ATUAÇÃO DAS PROTEÇÕES.....	47
FIGURA 27: MUDANÇA DE IMPEDÂNCIA DEVIDO AO DISPARO DE <i>GAP</i>	48

FIGURA 28: MATRIZES DE ADMITÂNCIA DE BARRA DOS DIAGRAMAS DE SEQUÊNCIA REDUZIDOS E COMBINAÇÃO DAS TRÊS SEQUÊNCIAS NA MATRIZ Y_{012} , QUANDO CONSIDERADO O DISPARO DE <i>GAP</i>	49
FIGURA 29: MATRIZ DE ADMITÂNCIA DE BARRA EM COORDENADAS DE FASE DO SISTEMA REDUZIDO QUANDO CONSIDERADO O DISPARO DE <i>GAP</i>	50
FIGURA 30: REPRESENTAÇÃO DAS FASES DO CAPACITOR COM DISPARO DE <i>GAP</i> NA FASE A.....	50
FIGURA 31: FLUXOGRAMA APRESENTANDO AS ETAPAS NECESSÁRIAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE CONDUÇÃO DE MOV E DISPARO DE <i>GAP</i>	53
FIGURA 32: SISTEMA DE TRANSMISSÃO IMPERATRIZ-COLINAS.....	56
FIGURA 33: VARIAÇÃO DA CORRENTE I1 AO LONGO DA LINHA (CURTO TRIFÁSICO).....	57
FIGURA 34: VARIAÇÃO DA CORRENTE I2 AO LONGO DA LINHA (CURTO TRIFÁSICO).....	58
FIGURA 35: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA TRIFÁSICA A 0% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	61
FIGURA 36: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA TRIFÁSICA A 0% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	61
FIGURA 37: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA TRIFÁSICA A 40% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	62
FIGURA 38 :RESULTADO OBTIDO PARA FALTA TRIFÁSICA A 40% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	62
FIGURA 39: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA TRIFÁSICA A 63% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	63
FIGURA 40: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA TRIFÁSICA A 63% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	63
FIGURA 41: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA TRIFÁSICA A 100% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	64
FIGURA 42: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA TRIFÁSICA A 100% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	64
FIGURA 43: VARIAÇÃO DA CORRENTE I1 AO LONGO DA LINHA (CURTO MONOFÁSICO)	66
FIGURA 44: VARIAÇÃO DA CORRENTE I2 AO LONGO DA LINHA (CURTO MONOFÁSICO)	67
FIGURA 45: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA MONOFÁSICA A 0% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	70
FIGURA 46: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA MONOFÁSICA A 0% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	70
FIGURA 47: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA MONOFÁSICA A 17% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	71
FIGURA 48: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA MONOFÁSICA A 17% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	71
FIGURA 49: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA MONOFÁSICA A 90% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	72
FIGURA 50: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA MONOFÁSICA A 90% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	72

FIGURA 51: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA MONOFÁSICA A 100% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS ANTES DA IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	73
FIGURA 52: RESULTADO OBTIDO PARA FALTA MONOFÁSICA A 100% DA LT IMPERATRIZ-COLINAS APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO DISPARO AUTOMÁTICO DE <i>GAP</i>	73
FIGURA 53: DIAGRAMA UNIFILAR REPRESENTANDO A REGIÃO EM ESTUDO	75
FIGURA 54: REDUÇÕES PERCENTUAIS DE NÍVEIS DE CURTO TRIFÁSICOS	78
FIGURA 55: REDUÇÕES PERCENTUAIS DE NÍVEIS DE CURTO MONOFÁSICOS.....	78

Lista de Tabelas

TABELA 1: PARÂMETROS DOS CAPACITORES DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CA DE ITAIPU.....	28
TABELA 2: DADOS DOS CAPACITORES DA LINHA IMPERATRIZ-COLINAS.....	56
TABELA 3: SITUAÇÕES DOS CAPACITORES SÉRIE PARA CURTO TRIFÁSICO APLICADO AO LONGO DA LINHA IMPERATRIZ-COLINAS.....	59
TABELA 4: CORRENTES NOS CAPACITORES E CORRENTE DE CURTO NA LINHA COM DEFEITO PARA DIVERSAS POSIÇÕES DE APLICAÇÃO DO CURTO.....	65
TABELA 5: REDUÇÃO DE AMPLITUDE DAS CORRENTES DA TABELA 4 QUANDO O DISPARO DE GAP É EFETUADO.....	65
TABELA 6: SITUAÇÕES DOS CAPACITORES SÉRIE PARA CURTO MONOFÁSICO APLICADO AO LONGO DA LINHA IMPERATRIZ-COLINAS.....	68
TABELA 7: CORRENTES NOS CAPACITORES E CORRENTE DE CURTO NA LINHA COM DEFEITO PARA DIVERSAS POSIÇÕES DE APLICAÇÃO DO CURTO.....	74
TABELA 8: REDUÇÃO DE AMPLITUDE DAS CORRENTES DA TABELA 7 QUANDO O DISPARO DE GAP É EFETUADO.....	74
TABELA 9: VARIAÇÕES NOS NÍVEIS DE CURTO DE BARRAS DA INTERLIGAÇÃO NORTE-SUL.....	77

Capítulo I

Introdução

I.1 Considerações Iniciais

A energia elétrica no Brasil é oriunda, predominantemente, de usinas hidroelétricas e termoelétricas. Dentre estas, as usinas hidroelétricas estão presentes em maior número, devido ao fato do Brasil ser um país privilegiado do ponto de vista hidrográfico. Devido a motivos de condições naturais, estas usinas muitas vezes não se encontram instaladas em regiões próximas aos centros consumidores. Desta forma, há a necessidade de transmissão de energia elétrica por longas distâncias.

O uso de corrente alternada para transmissão de energia elétrica por longas distâncias tornou-se possível graças à capacidade dos transformadores de elevar a tensão e reduzir a corrente elétrica em uma linha, reduzindo ao quadrado as perdas por efeito Joule na mesma. Desta maneira, pode-se ter a transmissão de energia elétrica de forma econômica e com menos perdas. Para linhas longas, usualmente de extra-alta tensão, o limite de transmissão, sem o uso de equipamentos adicionais, tende para a potência natural, ou potência característica da linha. Este valor equivale a uma absorção total da energia por uma carga com fator de potência unitário demandando esta potência. Neste ponto limite, toda a energia reativa gerada pela linha é consumida pela própria. Esta potência característica é dada por:

$$P_c = V^2 / Z_c \quad (1.1)$$

Em (1.1), V é a tensão entre fases e Z_c é a impedância característica da linha, que equivale a:

$$Z_c = \sqrt{L/C} \quad (1.2)$$

A forma intuitiva de se aumentar a capacidade de transmissão é elevando-se a tensão nominal da linha, alternativa esta limitada devido aos limites operacionais dos equipamentos. Outra forma de aumentar a capacidade de um determinado corredor seria construir uma nova linha em paralelo, o que implica em custos altos e pode gerar impactos ambientais. Uma terceira alternativa é a compensação, que anula parcialmente seus valores de indutância e/ou capacitância. O custo econômico da compensação de uma linha é muito menor que o de construir uma nova e o impacto ambiental é quase inexistente já que o corredor de transmissão não precisa ser ampliado. De fato, quanto menor a indutância ou maior a capacitância, menor é a impedância característica e maior é a potência natural. A possibilidade de se elevar a potência natural de uma linha permite a otimização de sua capacidade de transmissão. Este fato é muito importante para o caso do sistema elétrico brasileiro, visto que, como já foi dito, longas distâncias devem ser percorridas para a transmissão de energia elétrica em todo o país. A compensação de linhas pode ser realizada mediante a utilização de capacitores em série. Teoricamente pode-se utilizar também capacitores shunt para elevar a transmissão de potência, entretanto, esta alternativa traz problemas para a operação do sistema, como sobretensões severas durante a energização do circuito e tensões terminais acima dos limites suportáveis pelos equipamentos em regime permanente. O enfoque dado neste texto refere-se à utilização de compensação série e à correta representação de suas proteções, que empregam varistores e/ou gaps, em um programa de análise de curto-circuito.

Deve-se enfatizar que, em casos de longas distâncias de transmissão, cuidado deve ser tomado para se preservar tanto o sincronismo quanto a estabilidade do sistema, especialmente em condições de curto-circuito. Com a compensação série, consegue-se uma melhora significativa do ponto de vista da estabilidade eletromecânica transitória, além de se conseguir reduzir bastante o problema da distância como fator limitante para a transmissão em corrente alternada em boa parte dos casos. Desta forma, linhas de transmissão AC transmitindo potências elevadas por mais de 1000 km são uma realidade hoje em dia. De fato, a compensação série provoca uma aparente redução da distância da linha, o que pode ser melhor compreendido definindo-se o grau de compensação série da mesma, que é dado por:

$$h_c = X_C / X_L \quad (1.3)$$

Em (1.3), X_C é a reatância capacitiva incluída através da compensação e X_L é a reatância indutiva característica da própria linha, como pode ser visto através da Figura 1.

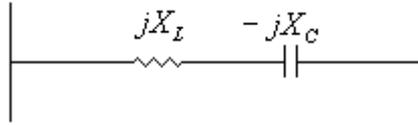


Figura 1: Linha de transmissão compensada

Colocando-se X_C em função de X_L e h_C , a reatância indutiva equivalente da linha pode ser dada por:

$$\begin{aligned}
 X_{EQ} &= X_L - X_C \\
 &= X_L - h_C \times X_L \\
 &= (1 - h_C) \times X_L
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Em (1.4), X_L pode ser definida como o produto do comprimento da linha pela sua reatância por unidade de distância, dada geralmente em Ω/km . Desta forma:

$$X_L = D \times x_L \tag{1.5}$$

Substituindo-se (1.5) em (1.4):

$$X_{EQ} = (1 - h_C) \times D \times x_L \tag{1.6}$$

Observando-se a equação (1.6) e fazendo-se uma analogia com a equação (1.5), pode-se definir a distância equivalente da linha quando a mesma encontra-se compensada da seguinte forma:

$$D_{EQ} = (1 - h_C) \times D \tag{1.7}$$

Como $h_C < 1$ (usualmente, $0.3 < h_C < 0.7$), a distância aparente da linha, quando a mesma possui compensação série, é menor que a distância real da linha.

A compensação série é, assim, um meio eficiente de se reduzir a quantidade de linhas de transmissão necessárias para a obtenção de uma certa capacidade de transmissão de potência, por conta do aumento considerável da capacidade de transmissão das linhas já construídas, com um custo econômico relativamente baixo.

A utilização de capacitores série na compensação da reatância de linhas de transmissão longas tem se mostrado um meio cada vez mais atrativo para aumentar a capacidade de transmissão e

melhorar a estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência. Atualmente existem 64 destes equipamentos instalados no sistema brasileiro, dos quais 9 estão nas linhas de 765kV que levam energia de Itaipu (SC) até Tijuco Preto (SP), 44 em linhas de 500kV, em sua maioria pertencentes à interligação Norte-Sul, e 11 em linhas de 230kV.

Nesse tipo de aplicação, um aspecto importante é a proteção dos capacitores contra sobretensões elevadas. Durante uma falta, a corrente de curto-circuito passando pelo capacitor série pode provocar uma queda de tensão excessivamente alta, capaz de danificar seu isolamento. Durante muito tempo, foram empregados *gaps* centelhadores que, durante um curto-circuito próximo, desviavam a corrente, evitando que esta passasse pelo capacitor. Os principais inconvenientes deste tipo de proteção eram: a perda total do capacitor durante a falta, o que prejudicava a estabilidade eletromecânica; a necessidade de manobra posterior para a reinserção do capacitor no sistema; a necessidade de manutenção freqüente do centelhador.

Posteriormente foi desenvolvida a proteção com varistores (MOV – Metal-Oxide Varistor). Estes equipamentos possuem resistência que varia de acordo com a tensão aplicada entre seus terminais. Desta forma, durante a operação normal, o varistor se comporta como um circuito aberto. Quando ocorre uma falta na região próxima ao capacitor, o MOV passa a ter resistência reduzida, desviando para si a corrente que passaria exclusivamente pelo capacitor. Desta forma, o varistor protege o capacitor. Em paralelo com estes equipamentos costuma haver um *gap* que efetua o *bypass* do conjunto, evitando que correntes excessivamente altas possam danificar o MOV por superaquecimento. A proteção com varistor apresenta as vantagens de não retirar por completo o capacitor do circuito durante uma falta, mantendo algum grau de compensação da linha transitoriamente, de não necessitar de manobra para reinserção do capacitor e de apresentar menor necessidade de manutenção.

Como o varistor é um elemento não-linear, com impedância que varia de acordo com a tensão que lhe é aplicada, a sua representação em programas de análise de curto-circuito exige um tratamento especial, através do processo iterativo descrito em [1]. Em [2] é descrita a implementação desta modelagem no programa de cálculo de curto-circuitos ANAFAS, com a aplicação do processo iterativo também para faltas desequilibradas. Entretanto, nesse trabalho não estava implementada a representação do comportamento do *gap* que protege o conjunto (capacitor e varistor).

O presente trabalho visa descrever características e resultados obtidos pela implementação da representação automática do disparo de *gap* no software ANAFAS, programa de análise estática de curto-circuitos desenvolvido pelo CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. É abordada também a modelagem apenas com *gap*, que pode ser empregada na representação de alguns esquemas de proteção mais antigos, ainda encontrados no Sistema Brasileiro, nos quais a proteção por MOV não se faz presente.

A representação da atuação automática de *gap* em programas de análise de curto-circuito mostra-se de fundamental importância para uma análise mais realista das correntes de curto em um sistema.

I.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 5 Capítulos, que serão sucintamente descritos a seguir.

O Capítulo II apresenta informação sobre a utilização de capacitores série em sistemas de potência, enfatizando-se as vantagens e desvantagens dos mesmos e abordando-se os esquemas de proteção encontrados hoje em dia.

No Capítulo III é descrita a metodologia adotada no programa ANAFAS e as alterações que foram realizadas na mesma em vista de se implementar o disparo automático de *gap* no programa.

No Capítulo IV são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a implementação da metodologia analisada no Capítulo III.

O Capítulo V apresenta as principais conclusões referentes ao trabalho desenvolvido.

Capítulo II

Capacitores Série

II.1 Introdução

Os capacitores série são utilizados em sistemas de transmissão de energia elétrica com o objetivo de se diminuir a reatância série equivalente das linhas e, desta forma, a distância elétrica entre as barras terminais.

A utilização de capacitores série apresenta as seguintes vantagens:

- i. Aumento da capacidade de transmissão de potência da linha;
- ii. Aumento da estabilidade eletromecânica transitória do sistema;
- iii. Diminuição das necessidades de controle de tensão, pois propicia menor queda de tensão ao longo da linha;
- iv. Melhor divisão de potência entre linhas, reduzindo as perdas globais do sistema;
- v. Economia nos custos, quando comparados com outras alternativas tecnicamente possíveis;
- vi. Redução da quantidade de linhas de transmissão requeridas em um sistema.

Devido às suas muitas vantagens, os capacitores série têm sido utilizados em sistemas elétricos de diversos países. Estes capacitores, porém, têm a peculiaridade de serem sistemas compostos por alguns outros equipamentos, com a função exclusiva de proteger as unidades capacitivas. Essa necessidade de proteção pode ser melhor entendida quando se avalia o impacto da utilização de capacitores série quando da ocorrência de um defeito em um sistema.

De fato, apesar da diminuição da reatância das linhas propiciada pela inserção da reatância negativa dos capacitores em um sistema provocar uma grande melhoria do ponto de vista da estabilidade, essa mesma diminuição faz com que surjam correntes de curto mais elevadas na rede, em especial nos pontos próximos ao terminal do capacitor, o que pode ocasionar sobretensões através destes que imporiam necessidades de isolamento inviáveis. Além disso, podem ocorrer outros problemas que serão detalhados adiante.

II.2 Compensação Ótima

Análises técnicas e econômicas mostram que existe um limite prático de compensação série a partir do qual o aumento da mesma não traz mais benefícios para um sistema. Desta forma, para cada caso em que a compensação série é utilizada, existe um ponto ótimo de compensação (grau de compensação ótimo) que deve ser devidamente obtido antes de ser tomada a decisão de se investir na utilização de compensação série em uma linha de transmissão. Como já foi mencionado anteriormente, a experiência mostra que o grau de compensação ótimo, do ponto de vista econômico, varia de 30% a 70% da impedância série da linha. [3]

II.3 Localização na Linha

Quando um capacitor série é instalado em uma linha de transmissão, um fator muito importante é a sua localização. As localizações usualmente utilizadas são no meio ou em ambos os terminais da linha, tal qual pode ser visto na Figura 2.

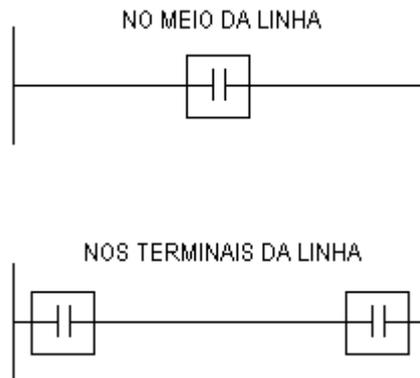


Figura 2: Localizações típicas de capacitores série em uma linha

As primeiras instalações de capacitores foram no meio da linha, tendo sido a questão da proteção por relés de distância o fator preponderante para esta decisão, visto que a mesma representava um empecilho à instalação de capacitores série na extremidade da linha. Ocorre que, para uma falha no terminal do capacitor, o relé de impedância convencional “enxerga” uma impedância negativa, identificando a falha como externa à linha. No entanto, com a melhoria dos sistemas de proteção, fazendo-se uso de esquemas de comparação de fase e direcional, pôde-se desenvolver um sistema capaz de detectar a falha como sendo interna à linha, independentemente da localização do capacitor. Desta forma, superados os problemas de proteção, a questão da localização passou a ser uma questão de avaliação das principais vantagens que cada uma das localizações apresenta. De fato, nas extremidades da linha o capacitor encontra-se na própria subestação terminal, apresentando facilidade de manutenção. No entanto, as correntes de curto e sobretensões transitórias são maiores, havendo-se a necessidade de características nominais da proteção MOV substancialmente mais elevadas do que se o capacitor estivesse situado no meio da linha. No Brasil, os capacitores série costumam ser localizados nos terminais das linhas de transmissão. [3]

II.4 Efeitos Decorrentes da Introdução de Capacitores Série em um Sistema

II.4.1 Vantagens para o Sistema

Do ponto de vista econômico, a melhor utilização de uma linha de transmissão ocorre em altos níveis de carregamento, quando esta transporta o máximo de potência ativa possível. No entanto, essa situação muitas vezes não é possível, devido aos requisitos de estabilidade transitória e até mesmo da estabilidade em regime permanente, no caso de sistemas de transmissão de longa distância não compensados. De fato, quando se tem um nível de carregamento de uma linha muito alto, sua característica indutiva tende a se tornar dominante e maiores diferenças com relação ao módulo e ângulo das tensões em suas extremidades tendem a ocorrer. A compensação série permite a redução dessas diferenças e uma utilização mais eficiente da linha.

Na Figura 3 tem-se a representação ilustrativa de dois sistemas interligados através de uma linha de transmissão sem perdas. As tensões nos terminais dos sistemas A e B são iguais a, respectivamente, $V_A \angle \delta_A$ e $V_B \angle \delta_B$. A linha de transmissão possui uma reatância indutiva X_L .

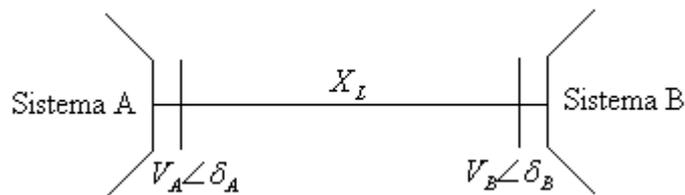


Figura 3: Representação de dois sistemas interligados por uma linha

Sabe-se que:

$$\dot{I} = \frac{V_A \angle \delta_A - V_B \angle \delta_B}{jX_L} \quad (2.1)$$

Em (2.1), \dot{I} é a representação fasorial da corrente passante na linha de transmissão que interliga os sistemas A e B.

Sabe-se também que:

$$P_A = P_B = P = \operatorname{Re}(\dot{V}_A \dot{I}^*) = \operatorname{Re}(\dot{V}_B \dot{I}^*) \quad (2.2)$$

Em (2.2), P_A e P_B representam as potências ativas nos terminais dos sistemas A e B e ambas possuem o mesmo valor devido ao fato da linha ser puramente indutiva.

Substituindo-se (2.1) em (2.2):

$$P = \operatorname{Re}\left(\dot{V}_A \times \frac{\dot{V}_A^* - \dot{V}_B^*}{-jX_L}\right) \quad (2.3)$$

$$P = \operatorname{Re}\left(\frac{\dot{V}_A \dot{V}_A^*}{-jX_L} - \frac{\dot{V}_A \dot{V}_B^*}{-jX_L}\right) \quad (2.4)$$

$$P = \operatorname{Re}\left[\left(\frac{V_A^2}{X_L} \angle \delta_A - \delta_A + 90^\circ\right) - \left(\frac{V_A V_B}{X_L} \angle \delta_A - \delta_B + 90^\circ\right)\right] \quad (2.5)$$

Fazendo-se $\theta_{AB} = \delta_A - \delta_B$, tem-se:

$$P = \operatorname{Re}\left(j \frac{V_A^2}{X_L} - \frac{V_A V_B}{X_L} \operatorname{sen}(\delta_{AB} + 90^\circ) - j \frac{V_A V_B}{X_L} \cos(\delta_{AB} + 90^\circ)\right) \quad (2.6)$$

$$P = -\frac{V_A V_B}{X_L} \cos(\delta_{AB} + 90^\circ) \quad (2.7)$$

Finalmente,

$$P = \frac{V_A V_B}{X_L} \operatorname{sen} \theta_{AB} \quad (2.8)$$

A equação (2.8) determina a expressão da potência de transmissão do sistema A para o sistema B. Observando-a, fica evidente que a potência transmitida é maior para valores elevados de V_A e V_B e para valores reduzidos de X_L . Além disso, percebe-se que a potência aumenta até o ponto em que $\operatorname{sen} \theta_{AB} = 1$, ou seja, até o ponto em que a diferença angular entre as tensões dos sistemas A e B é igual a 90° . Este ponto equivale ao ponto de potência máxima e corresponde ao limite de estabilidade. Pode-se ainda observar que a adição da reatância

capacitiva no denominador da equação torna possível a diminuição da diferença angular entre as tensões V_A e V_B para um mesmo valor de potência ativa transmitida.

Quando um defeito ocorre em um sistema, sabe-se que menores valores de θ_{AB} , para uma mesma potência transmitida, correspondem a maiores margens de estabilidade eletromecânica para os instantes após a ocorrência do defeito, o que será mostrado mais adiante. Desta forma, para atingir uma potência de transmissão elevada, com baixo valor de diferença angular entre as tensões terminais, deve-se manter elevada a relação $V_A V_B / X_L$. Esta elevação pode ser obtida através do uso de compensação série, para a diminuição da reatância da linha, ou através do aumento do módulo das tensões terminais, fazendo-se uso de compensação paralela, o que foge ao escopo deste trabalho. Pode-se também fazer uso de condutores geminados ou construir novas linhas de transmissão, mas essas soluções são menos viáveis do ponto de vista econômico.

Cabe ressaltar que sistemas de potência são, em verdade, sistemas compostos de equipamentos adicionais às linhas de transmissão. Estes equipamentos devem ter suas impedâncias consideradas para a obtenção efetiva da potência transmitida. No entanto, apesar da inserção de capacitores série em linhas de transmissão levar à redução da reatância série equivalente apenas destas linhas, o aumento da potência transmitida, mesmo podendo sofrer redução devido à consideração das impedâncias adicionais de outros equipamentos, já ocasiona um aumento considerável na margem de estabilidade do sistema.

O comportamento da estabilidade transitória de um sistema quando capacitores série são utilizados pode ser melhor entendido analisando-se o sistema simples representado na Figura 4, que caracteriza a transferência de potência de um grupo de geradores em uma subestação para um sistema receptor com capacidade de potência muito mais elevada (barra infinita).

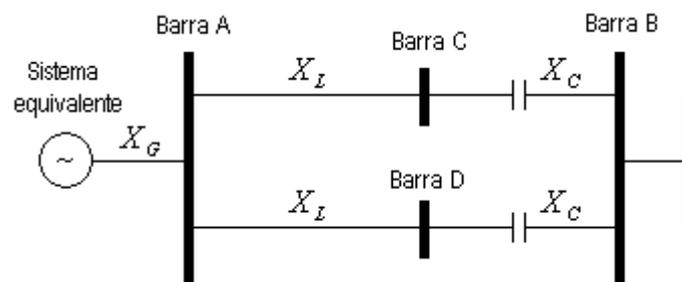


Figura 4: Sistema de transmissão compensado

A variação da potência elétrica P_e com o ângulo de carga δ pode ser vista na Figura 5, considerando a ocorrência de um curto trifásico na barra C da Figura 4 e supondo a não atuação dos reguladores de tensão e velocidade.

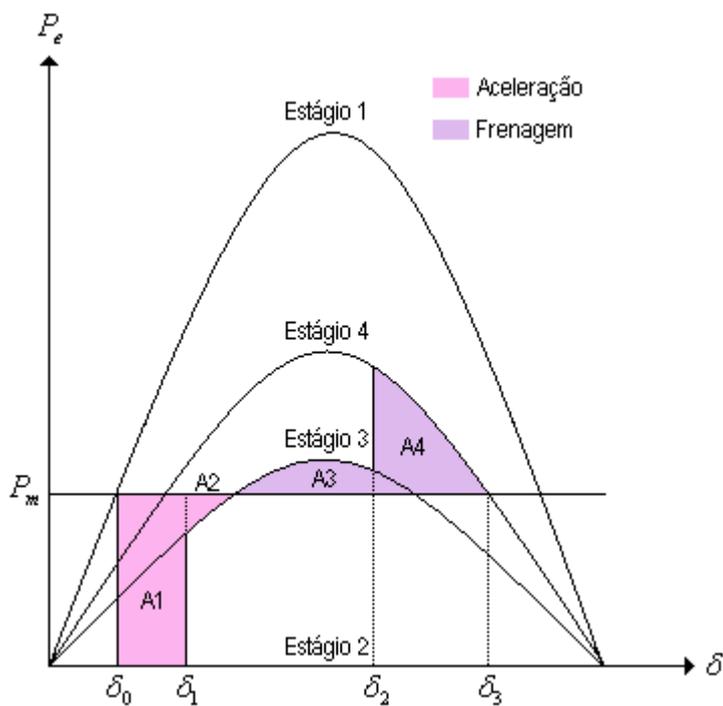


Figura 5: Curvas Potência-Ângulo para curto trifásico na barra C

Na Figura 5, o estágio 1 representa o comportamento do sistema em condições normais de operação. Quando ocorre o defeito na barra C, o capacitor da linha em curto é curto-circuitado por sua proteção e o mesmo pode ocorrer com o capacitor da linha em paralelo, devido às sobrecorrentes que podem surgir nesses equipamentos e supondo a não existência de proteção MOV. Desta forma, a reatância de transferência é aumentada e a capacidade de transferência de potência é reduzida. Quanto mais severo o defeito, menor é a transferência de potência. O estágio 2 caracteriza o comportamento do sistema durante o curto, momento este em que o disparo do *gap* do capacitor da linha em curto ocasiona a anulação da amplitude da tensão da barra B, impedindo, portanto, a transferência de potência. O defeito é eliminado abrindo-se a linha em curto e a característica do sistema é agora representada pelo estágio 3. Nesta situação, com apenas uma linha de transmissão, a capacidade de transmissão de potência encontra-se em um valor intermediário entre a operação normal e a operação em curto. De fato, a potência volta a poder ser transmitida, mas a capacidade de transmissão diminui bastante se comparada com a mesma em condições normais de operação, o que ocorre devido tanto à abertura da linha em falta quanto ao provável disparo do *gap* do capacitor da linha

remanescente, considerando que o mesmo não seja provido de proteção MOV. O estágio 4 indica uma transferência de potência maior que a do estágio 3 e representa o comportamento da rede quando se tem a reinserção dos capacitores no sistema. Com esta reinserção, a capacidade de transmissão ainda permanece reduzida devido à abertura da linha com defeito, mas a linha em operação consegue transmitir uma potência maior devido à presença do capacitor. Para casos de reinserção instantânea, esta situação ocorre imediatamente após a limpeza da falta. Este é o caso de capacitores série com proteção MOV e é uma situação mais comum nos dias atuais. Mais adiante esta situação será novamente mencionada.

Quando o sistema se encontra em condições normais de operação, a potência elétrica do gerador é constante e igual à potência mecânica no eixo da turbina, P_m . δ_0 é o ângulo de carga inicial, ou seja, o ângulo de carga para o qual $P_e = P_m$. Quando ocorre o defeito na barra C, a potência elétrica cai para o ponto no estágio 2 imediatamente abaixo e, devido ao fato da potência mecânica tornar-se maior que a potência elétrica, a máquina começa a acelerar e o ângulo δ aumenta. Após a limpeza da falta, a potência elétrica passa a ser dada pelo estágio 3. A análise gráfica para este exemplo mostra que, poucos instantes após a limpeza da falta, a potência elétrica passa a ser maior que a potência mecânica, o que provoca o efeito de frenagem da máquina. Por fim, chega-se no estágio 4 e a máquina continua a frear até o instante em que a área de frenagem se iguala à área de aceleração.

A área A1 é proporcional à energia cinética associada à rotação do rotor do gerador equivalente durante o período de falta. Quando $\delta = \delta_1$, ocorre a limpeza da falta. A área total de aceleração é o somatório da área A1 com a área A2, esta última representando a área de aceleração no período após a eliminação do curto em que a máquina ainda acelera.

Quando $\delta = \delta_2$, há a reinserção dos capacitores no sistema. A área A3 representa a parcela da área de frenagem que existe enquanto uma das linhas encontra-se em aberto e a área A4 representa a parcela da área de frenagem do instante de reinserção dos capacitores até o instante em que as áreas de aceleração ($A1 + A2$) e frenagem ($A3 + A4$) são igualadas. Se a área A4 vai até o instante em que a potência elétrica se iguala novamente à potência mecânica (situação representada na Figura 5), o sistema encontra-se no seu ponto limite de estabilidade. Para casos em que o somatório das áreas A3 e A4 torna-se menor que o somatório das áreas A1 e A2, o sistema fica instável. Já para casos em que o somatório das áreas A3 e A4 torna-se maior que o somatório das áreas A1 e A2, pode-se afirmar que o sistema é estável.

Como já foi mencionado anteriormente, valores reduzidos de ângulo de carga correspondem a maiores margens de estabilidade para um sistema. Analisando-se a Figura 5, percebe-se que, mantendo constante o tempo de limpeza da falta, a diminuição de δ_0 permite a obtenção de uma maior área de frenagem, aumentando, assim, a margem de estabilidade do sistema.

A Figura 6 mostra novamente as curvas de potência versus abertura angular, agora considerando a reinserção instantânea dos capacitores no sistema, ou seja, supondo que os capacitores sejam providos de proteção MOV. Para este caso, nota-se que a margem de estabilidade do sistema aumenta consideravelmente, o que indica a possibilidade de uma maior transferência de potência em regime permanente.

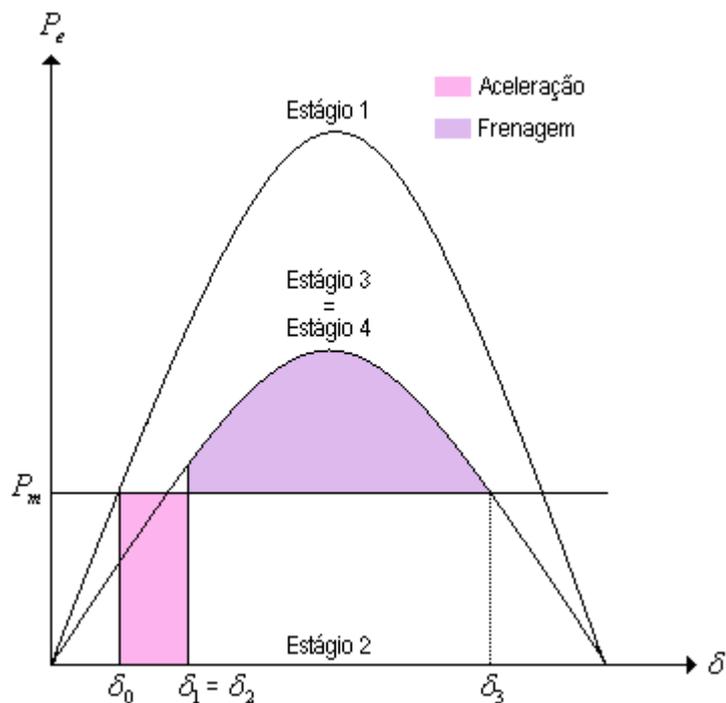


Figura 6: Curvas Potência-Ângulo para reinserção rápida

A situação representada na Figura 6 é a situação mais comum considerando os tipos de proteções de capacitores série existentes atualmente. De fato, supondo ambos os capacitores do sistema providos de *gap* e MOV, o curto aplicado na barra C continuaria certamente causando o disparo do *gap* do capacitor da linha em curto. No entanto, o capacitor da outra linha provavelmente não teria mais seu *gap* disparado, mas sim a condução de sua proteção MOV. Desta forma, a abertura da linha em curto ocasionaria reinserção instantânea do

capacitor da linha remanescente e os estágios 3 e 4 da Figura 5 seriam dados por um único estágio.

II.4.2 Desvantagens para o Sistema

A introdução de capacitores série em um sistema não acarreta apenas benefícios para o mesmo. Alguns efeitos que podem vir a ocorrer e que precisam ser analisados são:

- i. Surgimento ou agravamento de ressonâncias sub-síncronas: A compensação série pode introduzir oscilações de baixa frequência que entrem em ressonância com as oscilações dos rotores de geradores térmicos, podendo chegar a causar a ruptura dos eixos;
- ii. Problemas de auto-excitação de geradores: Este tipo de compensação também pode provocar ou agravar problemas de auto-excitação em alguns geradores;
- iii. Dificuldade de determinação de sentido de corrente de curto: Em uma linha compensada, dependendo do ponto de falta, a corrente de curto-circuito pode ter ângulo capacitivo, dificultando a atuação de relés direcionais.
- iv. Correntes de curto elevadas: Em linhas compensadas, curtos próximos ao capacitor podem ter valores excessivamente altos, podendo danificar equipamentos próximos.

As elevadas correntes de curto-circuito para faltas próximas aos capacitores causam sobretensões transitórias através dos mesmos, sendo estas fundamentais na definição do seu tipo de proteção. Em geral, as sobretensões críticas para os capacitores ocorrem quando há a ocorrência de um defeito na rede, podendo também ocorrer no momento de reinserção dos mesmos no sistema.

Isto pode ser melhor entendido analisando-se um sistema de transmissão simples, tal qual o representado na Figura 7. Supõe-se a ocorrência de curto trifásico na barra 3.

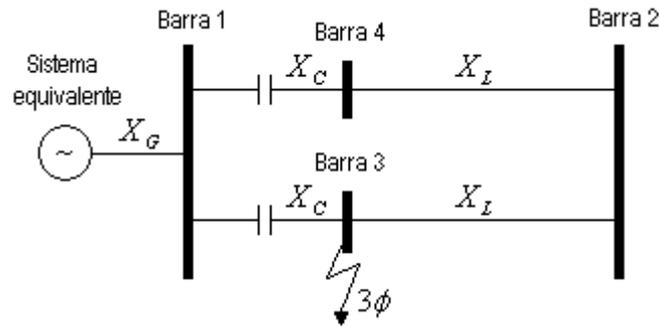


Figura 7: Sistema de duas linhas com compensação série

A corrente de curto nesta situação é dada por:

$$I_{CC,3\phi} = \frac{V}{[(2X_L - X_C)/(-X_C)] + X_G} \quad (2.9)$$

Em (2.9), V e X_G são a tensão pré-falta na barra 3 e a reatância do sistema equivalente, respectivamente. Como se vê na Figura 7, X_L é a reatância das linhas de transmissão e X_C é a reatância dos capacitores série do sistema.

Supondo $X_C = 0.3X_L$,

$$I_{CC,3\phi} \cong \frac{V}{X_G - 0.36X_L} \quad (2.10)$$

Analisando-se (2.10), percebe-se que, quanto mais próxima for a impedância do sistema equivalente (X_G) do valor de 0.36 vezes a impedância da linha de transmissão (X_L), maior será a corrente de curto circuito e maiores serão as contribuições através dos capacitores série. Caso X_G seja exatamente igual a $0.36X_L$, teoricamente haverá um ponto de singularidade onde a corrente de curto-circuito tenderá ao infinito.

A tensão através de um capacitor é dada por:

$$v_c = \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.11)$$

Deste modo, valores elevados de corrente provocam valores muito altos de tensão. As sobretensões geradas podem chegar a valores bastante elevados, maiores do que a tensão nominal através dos capacitores.

Quando um sistema é constituído de diversas linhas contendo capacitores série, as correntes devido a um defeito em uma delas podem ser tão elevadas que podem ocasionar a atuação das proteções contra sobretensões não apenas na linha em curto, mas também em algumas das demais. Com a simulação de transitórios eletromagnéticos, as condições críticas de sobretensões podem ser obtidas e é possível o dimensionamento das proteções adequadas para os capacitores série de um sistema.

Na Figura 8, são mostradas as sobretensões estudadas para o sistema de Itaipu 765 kV [4] com simulação da atuação da proteção, neste caso composta apenas por *gap*. Nessa figura, são mostrados os efeitos transitórios provocados por um defeito e pela reinserção do capacitor na rede. Percebe-se, no entanto, que as sobretensões transitórias decorrentes da aplicação do curto são de maior magnitude.

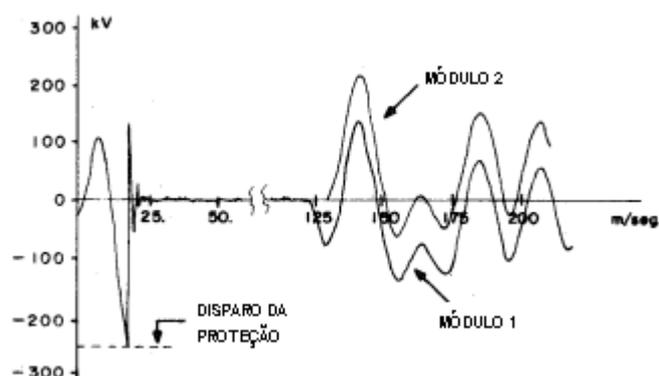


Figura 8: Perfil da tensão através de um capacitor série devido à ocorrência de curto-circuito no sistema de transmissão de Itaipu

II.5 Tipos Construtivos e Esquemas de Proteção

Os tipos mais usuais de proteções de bancos de capacitores série são os descritos a seguir. Os esquemas do tipo *gap* simples e *gap* duplo são mais antigos e vêm cedendo lugar para os esquemas providos de limitador a óxido de zinco, mais conhecidos como MOVs.

II.5.1 *Gap* Simples

Um esquema simplificado de um banco de capacitores série com proteção do tipo *gap* simples pode ser visto na Figura 9. Neste esquema, CA representa o circuito de amortecimento, D1 e D2 os disjuntores, G1 o *gap* e R um resistor linear. O circuito de amortecimento, constituído de um reator em paralelo com um resistor, é comum a todos os tipos de proteção. A sua função é a de dissipar a energia do capacitor quando este é curto-circuitado, o que deve ser feito em vista de se reduzir os efeitos da descarga do capacitor fornecendo-se, desta forma, maior segurança para as unidades capacitivas, para o disjuntor e para o *gap*.

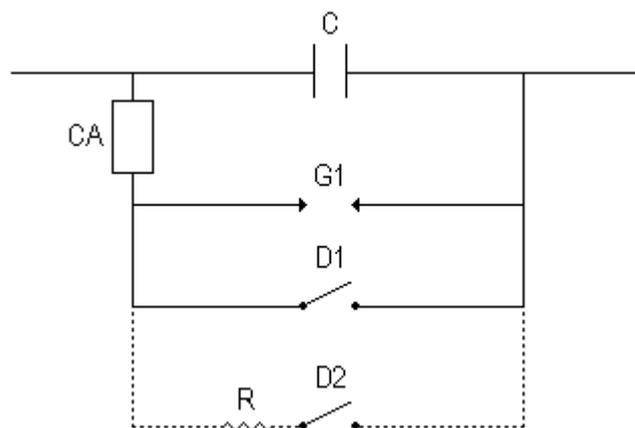


Figura 9: Capacitor série com proteção do tipo *gap* simples

Quando ocorre um defeito no sistema e a queda de tensão entre os terminais do capacitor atinge o máximo valor permitido, o *gap* G1 dispara. Logo em seguida ao disparo, o disjuntor D1 fecha e a corrente passa a fluir através dele, permitindo o resfriamento do *gap*. Algum tempo após a ocorrência do defeito, o disjuntor é aberto e o capacitor retorna à sua condição normal de operação.

Esse esquema foi o primeiro utilizado no mundo, na Suécia, e é normalmente utilizado para reinserção lenta, isto é, na faixa de 300 a 400 ms após a eliminação do defeito. Todavia, pode ser utilizado para reinserção rápida, como o instalado no Canadá, onde o sistema de proteção foi projetado com um *gap* desenvolvido para proceder a uma rápida desionização e um disjuntor compatível, possibilitando o restabelecimento do capacitor em um tempo de até 80 ms, com 80% de sua capacidade dielétrica [5].

O esquema indicado em pontilhado na Figura 9 representa uma forma de funcionamento alternativa deste tipo de proteção. Quando este esquema é utilizado e há a ocorrência de um defeito na rede, os disjuntores D1 e D2 são fechados assim que ocorre uma sobretensão nos terminais do capacitor. Após a eliminação do defeito, inicialmente apenas D1 é aberto, o que faz com que o capacitor seja inserido novamente no sistema com o resistor R em paralelo com o mesmo. Esse procedimento limita a tensão nos terminais do capacitor. Após um determinado tempo, o disjuntor D2 é, por fim, aberto e o capacitor retorna à sua condição normal de operação. Este esquema alternativo funciona no sentido de se evitar novo disparo do *gap* no momento de reinserção do capacitor no sistema, devido às sobretensões que também ocorrem nesse momento.

II.5.2 *Gap Duplo*

O esquema simplificado deste tipo de proteção está representado na Figura 10. Este esquema difere do anterior pelo fato de possuir dois *gaps*, representados esquematicamente por G1 e G2.

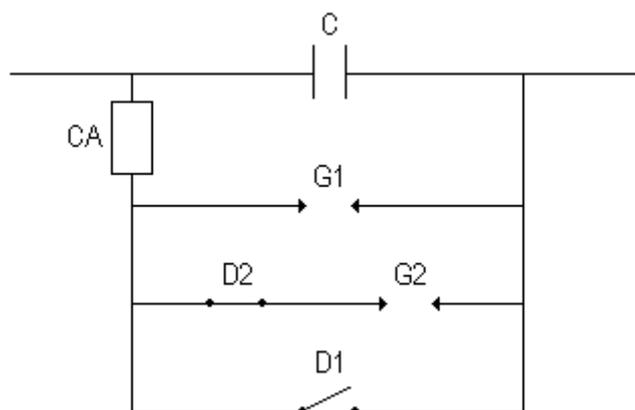


Figura 10: Capacitor série com proteção do tipo *gap* duplo

Neste tipo de proteção, o *gap* G2 possui ajuste inferior ao do *gap* G1. Desta forma, quando ocorre uma sobretensão nos terminais do capacitor provocada pela ocorrência de um defeito, este *gap* é o primeiro a disparar. Após a eliminação da falta, o disjuntor D2 abre, reinserindo o capacitor, com o *gap* G1 em sua plena capacidade dielétrica, protegendo o banco contra sobretensões devido à reinserção.

Esse tipo de proteção possibilita uma rápida reinserção do capacitor após a eliminação do defeito, visto que o tempo de restabelecimento do capacitor independe da desionização do *gap* G2. Desta forma, o capacitor pode ser reinserido no sistema mesmo com sobretensões de reinserção da ordem do ajuste deste *gap*.

No programa de análise de curto-circuito utilizado neste trabalho, a necessidade de se disparar ou não o *gap* é conhecida mediante a comparação da corrente de curto com a corrente máxima para disparo, fornecida como dado de entrada. Devido ao fato da análise de curto-circuito não ser uma simulação no tempo, os resultados obtidos decorrentes da utilização do programa fornecem apenas a condição pós-falta do mesmo, informando ao usuário correntes e tensões ao longo do sistema resultantes de um ou mais defeitos aplicados no mesmo. Ou seja, são obtidos apenas os valores finais de correntes e tensões devido à atuação das proteções dos capacitores série do sistema, não levando em conta condições de reinserção dos capacitores na rede. Desta forma, o programa não faz distinção entre esquemas de proteção do tipo *gap* simples ou *gap* duplo, visto que a diferença entre ambos está no momento de reinserção dos capacitores série no sistema.

II.5.3 Metal Oxide Varistor (MOV)

O diagrama esquemático de um capacitor série provido de proteção MOV pode ser visto na Figura 11.

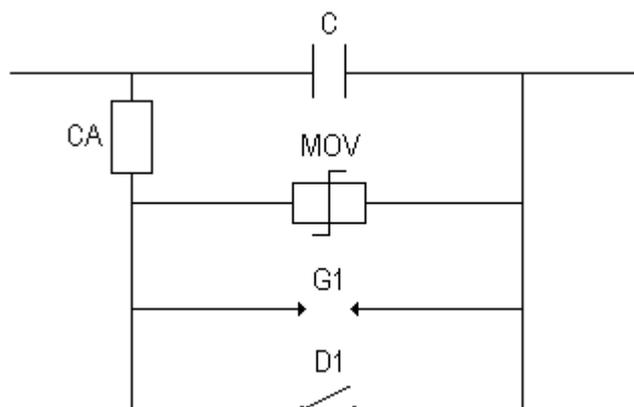


Figura 11: Capacitor série com proteção MOV

O MOV (limitador a óxido de zinco) é um varistor, elemento não-linear que possui resistência que varia de acordo com a tensão aplicada em seus terminais. Funciona praticamente como

um circuito aberto até o instante em que começa a conduzir, o que ocorre quando há uma sobretensão igual ou superior ao nível de disparo através do capacitor. Desta forma, quando ocorre um defeito, a corrente de curto passando pelo capacitor pode provocar uma queda de tensão entre seus terminais maior ou igual à tensão especificada, o que faz o MOV começar a conduzir. A partir desse ponto, quanto maior a corrente passante, menor a resistência do varistor, o que a desvia do capacitor. Quando há a eliminação do defeito, o MOV deixa de conduzir quase instantaneamente e o capacitor pode voltar à sua condição normal de operação. A função do *gap* G1, neste caso, é a de proteger o MOV contra correntes excessivamente elevadas que possam danificá-lo por superaquecimento.

O varistor pode ser dimensionado para suportar qualquer defeito no sistema. No entanto, devido a fatores econômicos, costuma-se dimensioná-lo apenas para defeitos externos à linha. Isso se justifica pelo fato de que, no caso de defeito na própria linha (falta interna), a linha é aberta, retirando o capacitor de operação. Desta forma, não há necessidade de se fazer o capacitor suportar curtos internos.

Pelo fato do MOV ser um dispositivo não linear, não se pode afirmar que a corrente que passa por ele é senoidal, assim como a própria corrente no capacitor também deixa de ser senoidal quando há condução. O que ocorre é que, a cada meio ciclo, a corrente se divide entre o capacitor e o varistor, o que pode ser visto na Figura 12. No entanto, a soma dessas parcelas permanece essencialmente senoidal e o conjunto capacitor-MOV pode ser representado por uma impedância linear [2].

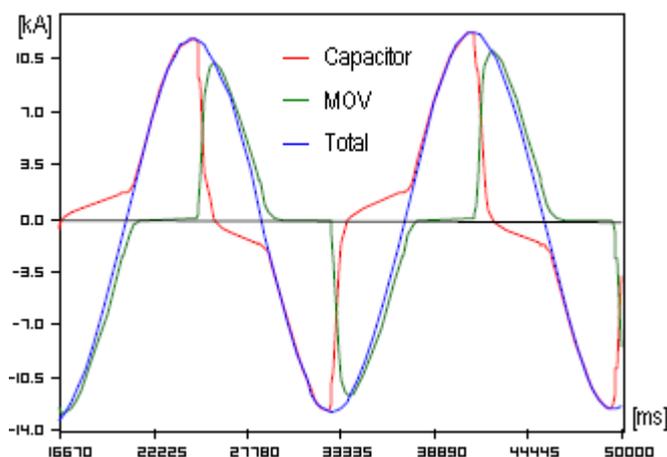


Figura 12: Correntes no capacitor e no MOV e corrente total quando o MOV encontra-se em condução

Em [1], Goldsworthy propõe a utilização de um modelo linear baseado no fato da corrente no conjunto capacitor-MOV poder ser considerada senoidal durante todo instante de tempo, pois esta é imposta pelo restante do sistema. Os fundamentos desta representação podem ser melhor compreendidos através do modelo monofásico da Figura 13, utilizado para se representar capacitores série protegidos por MOV em condições de curto-circuito. Neste modelo simples, V_S e Z_S representam a tensão e a impedância do sistema equivalente, respectivamente. Neste mesmo modelo, X_C é a reatância do capacitor série e I_C é a corrente que atravessa a impedância Z_S e o conjunto capacitor-MOV.

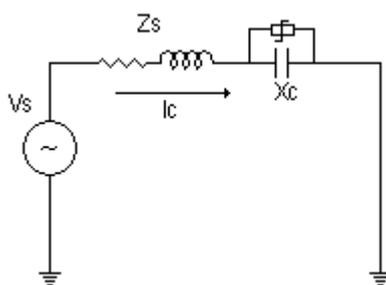


Figura 13: Modelo utilizado no estudo de capacitores série protegidos por MOVs

Analisando-se o modelo da Figura 13, fica fácil perceber que a impedância equivalente do conjunto capacitor-MOV necessária para que se tenha a corrente I_C é:

$$Z_{eq} = \frac{V_S}{I_C} - Z_S \quad (2.12)$$

A impedância equivalente Z_{eq} pode ser dividida em suas componentes real e imaginária, ou seja, R_{eq} e X_{eq} . Essas componentes podem ser normalizadas dividindo-se ambas pelo valor da reatância do capacitor, X_C .

Deste modo, r_{eq} e x_{eq} são as componentes real e imaginária normalizadas da impedância equivalente do conjunto capacitor-MOV e são dadas por:

$$r_{eq} = \frac{R_{eq}}{X_C} \quad (2.13)$$

$$x_{eq} = \frac{X_{eq}}{X_C} \quad (2.14)$$

A corrente I_C também pode ser normalizada dividindo-se a mesma pelo valor de corrente a partir da qual o MOV entra em condução. Essa corrente é definida como corrente de proteção para disparo do MOV e é representada por I_{pr} .

Desta forma, a corrente I_C normalizada é dada por:

$$I = \frac{I_C}{I_{pr}} \quad (2.15)$$

Goldsworthy realizou uma série de simulações com capacitores e varistores de diferentes parâmetros, chegando à conclusão de que, para qualquer conjunto capacitor-MOV, as componentes R_{eq} e X_{eq} normalizadas podem ser dadas em função da corrente I_C normalizada da forma representada na Figura 14.

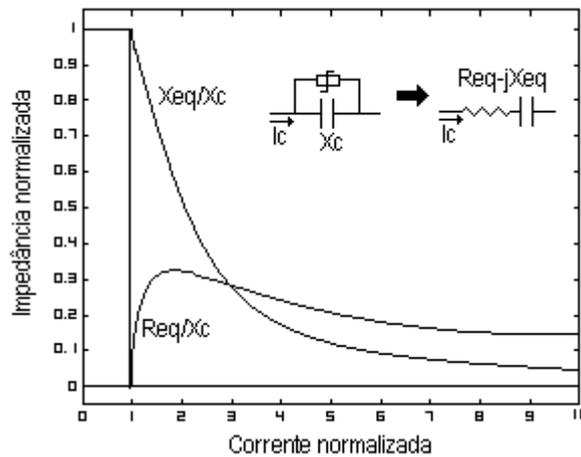


Figura 14: Impedância normalizada em função da corrente normalizada

A utilização do modelo linear implica, desta forma, na caracterização da impedância linear do conjunto capacitor-MOV como uma impedância dependente da corrente que passa pelo mesmo.

De maneira geral,

$$Z_{eq}(I) = R_{eq}(I) - jX_{eq}(I) \quad (2.16)$$

As expressões normalizadas para as componentes da impedância equivalente, segundo Goldsworthy, são dadas por:

$$r_{eq} = \frac{R_{eq}}{X_C} = 0.0745 + 0.49e^{-0.243I} - 35.0e^{-5.0I} - 0.6e^{-1.4I} \quad (2.17)$$

$$x_{eq} = \frac{X_{eq}}{X_C} = 0.1010 - 0.005749I + 2.088e^{-0.8566I} \quad (2.18)$$

Para valores de I_C menores que $0.98I_{pr}$, o MOV não conduz e a impedância equivalente do conjunto capacitor-MOV é a própria impedância do capacitor.

Estes resultados mostram que, de forma geral, a variação das componentes real e imaginária normalizadas da impedância equivalente Z_{eq} em função da corrente normalizada obedecem sempre o mesmo comportamento, independentemente dos parâmetros e elementos de rede presentes em um sistema. Desta forma, este modelo pode ser utilizado para se determinar aproximadamente a impedância equivalente de capacitores série protegidos por MOV em programas de curto circuito, o que torna a solução de um sistema sob defeito muito mais precisa.

II.6 Utilização de Capacitores Série no Brasil

No Brasil, a energia elétrica é provida, principalmente, por usinas hidrelétricas de grande porte. O mercado consumidor concentra-se nas regiões Sul e Sudeste, por serem estas regiões mais industrializadas. A região Norte, especialmente a parcela correspondente à região amazônica, é atendida principalmente por pequenas centrais geradoras, sendo grande parte destas termelétricas a óleo diesel. Os subsistemas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte formam o Sistema Interligado Nacional (SIN). Estes subsistemas, para terem uma operação adequada, necessitam de uma malha de transmissão e interligações operando de forma econômica, segura e confiável, em vista de se viabilizar a transferência de grandes montantes de energia no país. No entanto, a transferência de potência em linhas de transmissão é limitada, devido aos próprios limites impostos por estas, principalmente no que concerne as grandes distâncias de transmissão a serem percorridas em um país de grande extensão como o Brasil. Nesse sentido, uma solução encontrada para se elevar a capacidade de transmissão das linhas, em especial na Interligação Norte-Sul e na transmissão de energia de Itaipu até Tijuco Preto, foi a utilização de compensação série.

A Figura 15 apresenta uma visão esquemática das linhas de transmissão pertencentes à Rede Básica, que compõem o Sistema Interligado Nacional.



Figura 15: Mapa do Sistema Interligado Nacional

De maneira geral, o Sistema Brasileiro é dividido em dois grandes subsistemas, além dos subsistemas isolados do Norte do país. São estes os subsistemas Sul/Sudeste/Centro-Oeste (S/SE/CO) e Norte/Nordeste (N/NE). A usina de Itaipu atende ao sistema S/SE/CO e é uma usina hidrelétrica binacional, construída pelo Brasil e pelo Paraguai no trecho de fronteira entre os dois países, tal qual pode ser visto na Figura 15. A usina se interliga à subestação de Foz do Iguaçu, de onde saem três linhas e onde a tensão é elevada para 765kV, o nível de tensão mais elevado presente no Brasil. A parcela de energia em 50Hz é convertida através de

circuitos retificadores e transmitida em corrente contínua por duas linhas de transmissão até Ibiúna (SP). Em Ibiúna, a energia é convertida em 60Hz, interligando-se ao sistema do Sudeste.

Pelo fato do sistema de transmissão de Itaipu ser composto de linhas de grande distância, a compensação série foi tida como alternativa para se elevar a capacidade de transmissão de potência. Desta forma, em 1989, os primeiros capacitores série para 765kV do mundo foram colocados em funcionamento no sistema de transmissão de 765kV de Itaipu, consistindo nas três linhas de transmissão paralelas, com uma extensão de mais de 900km. Esses capacitores série utilizavam um esquema de *gap* duplo para rápida reinserção após eliminação de curto e foram os primeiros a serem instalados no Brasil. Mais tarde, a compensação série passou a ser utilizada também na interligação Norte-Sul e hoje em dia já há um número considerável de capacitores série no Brasil: 64 no total, sendo 9 nas linhas de 765kV de Itaipu, 44 nas de 500kV da interligação Norte-Sul, e 11 em linhas de 230kV.

Inicialmente, cinco capacitores série foram instalados na subestação de Ivaiporã. Sem esses capacitores, duas novas linhas de 765kV teriam sido necessárias para se transmitir a mesma potência conseguida com a compensação. Mais tarde, novos capacitores foram instalados, somando um total de nove capacitores série, seis deles encontrados em Ivaiporã e três em Itaberá [6].

A representação esquemática do sistema de transmissão em questão pode ser vista na Figura 16.

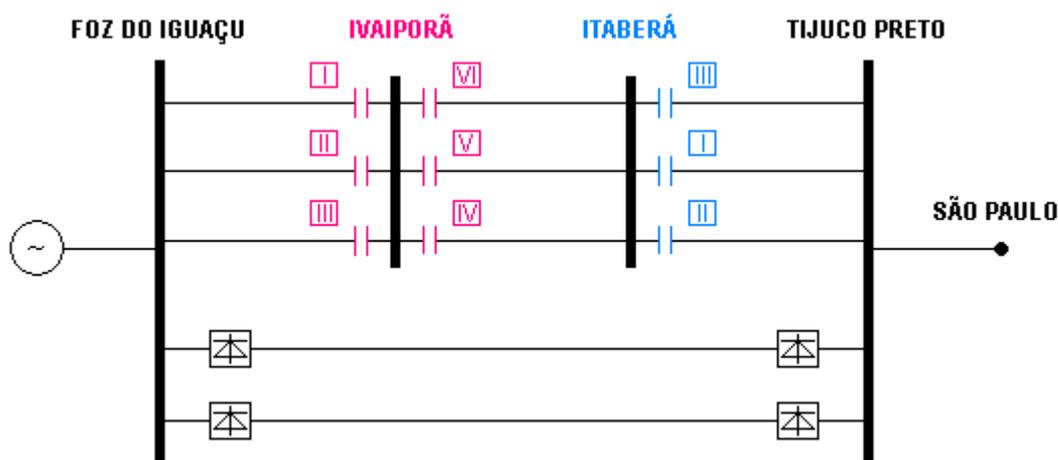


Figura 16: Sistema de transmissão Itaipu-São Paulo com representação de compensação série

A instalação dos capacitores série foi realizada de tal maneira a se obter um grau de compensação de 40% nas linhas que vão de Itaipu até Ivaiporã e de 50% nas linhas que vão de Ivaiporã até Itaberá. Uma outra característica desses capacitores é que os mesmos possuem um grau de compensação série variável, o que é obtido mediante a utilização de dois segmentos por fase, como se vê na Figura 17. Através do uso desta configuração, o grau de compensação série total das linhas que vão de Itaipu até Ivaiporã pode ser de 20% ou 40% e o grau de compensação série total das linhas que vão de Ivaiporã até Itaberá pode ser de 25% ou 50%.

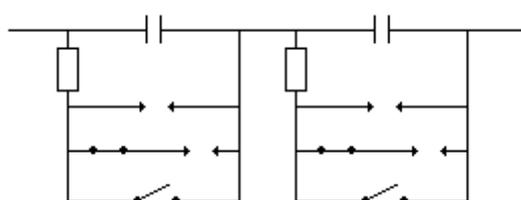


Figura 17: Representação de dois capacitores série por fase

A Figura 17 mostra a situação em que os segmentos de capacitores série são constituídos de um esquema de proteção do tipo *gap* duplo, para rápida reinserção dos capacitores após a eliminação de um defeito. Esta é a configuração encontrada nos capacitores de I a V de Ivaiporã, identificados na Figura 15. O capacitor VI de Ivaiporã, instalado em 2000, é composto de proteção MOV. Já os capacitores I e II de Itaberá, apresentam proteção do tipo *gap* simples. Com relação ao capacitor III de Itaberá, não foi encontrada informação referente ao seu esquema de proteção. No entanto, pelo fato de ter sido instalado posteriormente aos dois primeiros, é provável que o mesmo seja provido de proteção MOV.

Parâmetros técnicos dos capacitores encontrados no sistema de transmissão de Itaipu, com exceção do capacitor III de Itaberá, podem ser vistos na Tabela 1.

	Ivaiporã I – III	Ivaiporã IV – V	Ivaiporã VI	Itaberá I – II
Tensão Nominal (kV)	765	765	765	765
Corrente Nominal (A)	2780	2780	2780	2780
Potência Nominal (Mvar)	1017	1056	1056	1242
Grau de Compensação (%)	20 ou 40	25 ou 50	25 ou 50	25 ou 50

Tipo de Proteção	Gap Duplo	Gap Duplo	MOV	Gap Simples
Número de Segmentos por Fase	2	2	2	2

Tabela 1: Parâmetros dos capacitores do sistema de transmissão CA de Itaipu

Um outro caso brasileiro de utilização de compensação série refere-se à Interligação Norte-Sul, que promove a conexão do sistema Norte/Nordeste ao sistema Sul/Sudeste/Centro Oeste. Como os capacitores série presentes na Interligação foram instalados mais recentemente que os instalados no sistema de transmissão de Itaipu, os mesmos são compostos de proteção MOV, com a utilização de *gap* apenas para a proteção do varistor.

A representação esquemática da Interligação Norte-Sul com a identificação dos capacitores série é mostrada na Figura 18. Pelo fato da figura ser meramente ilustrativa, há a omissão de alguns elementos, tais quais reatores shunt e as interligações de determinadas barras.

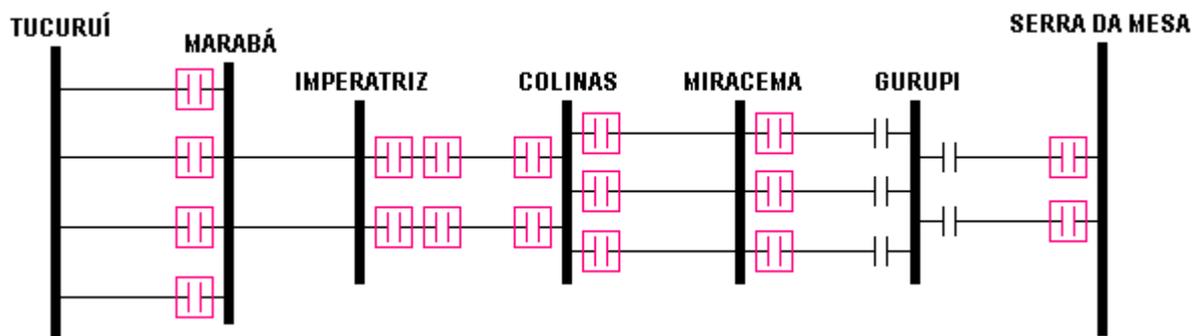


Figura 18: Representação ilustrativa da Interligação Norte-Sul

Na Figura 18, os capacitores assinalados são aqueles para os quais foram encontrados dados de proteção. Estes dados foram acrescentados à base de dados trimestral de curto-circuito disponibilizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Os capacitores série conectados à subestação de Gurupi não possuem seus dados de proteção disponíveis, assim como outros capacitores não representados neste esquema.

II.7 *Sumário do Capítulo*

Capacitores série são utilizados nos sistemas de transmissão do Brasil e do mundo, por tratarem-se de equipamentos consideravelmente eficientes e práticos, capazes de aumentar a capacidade de transmissão de potência de uma linha de forma bastante econômica, se comparados com outros métodos viáveis. No entanto, capacitores série possuem vantagens e desvantagens, e é pensando nessas desvantagens que foram desenvolvidos dispositivos de proteção para esses equipamentos. Nesse sentido, diversos tipos de proteção podem ser encontrados, sendo que os mais comuns e largamente utilizados nos tempos atuais são os dispositivos compostos de MOV (resistor não linear) e *gap*. Desta forma, este capítulo se propôs a ressaltar a importância da utilização de capacitores série e à necessidade de proteção dos mesmos, apresentando também exemplos de utilização de capacitores série no Brasil.

Capítulo III

Implementação e Critérios para Disparo

III.1 Considerações

Em [2], a modelagem de proteção MOV em capacitores série foi implementada no programa ANAFAS. No entanto, quando esta modelagem foi realizada, o disparo automático de *gap* não foi considerado, havendo portanto a necessidade de expansão da representação da proteção. Este trabalho propõe, desta forma, a realização da expansão desta representação, em vista de se obter resultados mais realistas e de se automatizar a análise das correntes que surgem em um sistema quando da aplicação de um ou mais defeitos no mesmo. Além disso, a implementação tratada neste capítulo possibilita a realização de fechamento monofásico e bifásico de *gap*, no caso de faltas desequilibradas, além de possibilitar um estudo mais realista não apenas do comportamento de sistemas com capacitores série providos de MOV e *gap*, mas também de sistemas providos de capacitores série mais antigos em que apenas a proteção por *gap* se faz presente. A implementação foi realizada em linguagem FORTRAN e é descrita nos itens que se seguem.

III.2 Metodologia Utilizada pelo Programa

O método tradicional utilizado em cálculos de curto-circuito é inteiramente baseado em componentes simétricas. Neste método, são obtidos os diagramas de seqüência de uma determinada rede e os mesmos são modificados e interligados de acordo com o tipo de falta a ser considerado. No entanto, este método é bastante limitado e não é utilizado no ANAFAS, que faz cálculos utilizando correntes de compensação. De fato, este programa faz uso de um método geral de solução, baseado nos artigos [8] e [9], que permite a introdução de facilidades inviáveis em programas com metodologia tradicional.

Neste método geral, a solução de curto em uma rede pode ser obtida resolvendo-se as equações da mesma parte em componentes simétricas e parte em componentes de fase. O sistema é modelado em componentes de seqüência de forma convencional, mas, em uma etapa intermediária, são restauradas as características trifásicas de pequenos conjuntos de barras (barras diretamente afetadas por um ou mais defeitos aplicados na rede), o que permite acesso a qualquer elemento do sistema e a simulação de qualquer tipo de falta, inclusive faltas simultâneas. Após a etapa intermediária mencionada, a estrutura original da rede é restaurada para permitir a realização de novas análises. Esta metodologia é geral e não precisa de particularizações para os diferentes tipos de falta ou suas associações.

O primeiro passo necessário para a utilização do método é a redução dos diagramas de seqüência de uma rede em vista de se obter diagramas equivalentes reduzidos. As barras presentes nesses diagramas são determinadas por critérios estabelecidos em [8]. Após esta redução, as barras fictícias criadas por faltas intermediárias e por aberturas são adicionadas nos diagramas de seqüência reduzidos. Antes de se passar o sistema para coordenadas de fase, os diagramas são reduzidos ainda mais, passando a conter apenas as barras (fictícias ou não) diretamente afetadas por um ou mais defeitos aplicados no sistema. Essas barras são chamadas de barras externas e as barras eliminadas nesta nova redução são chamadas de barras internas, tal qual representado na Figura 19.

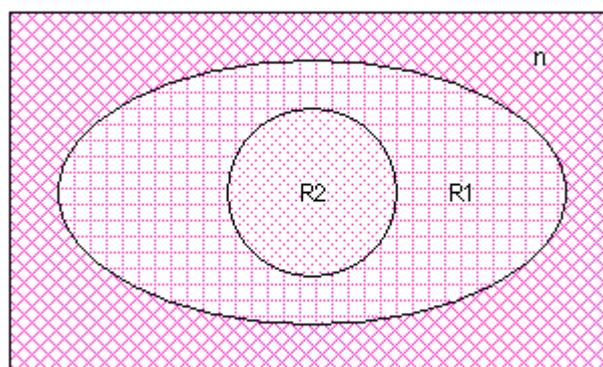


Figura 19: Conjuntos de barras utilizados no cálculo de curto

Na Figura 19, n é o conjunto de todas as barras do sistema, inclusive as eventuais barras fictícias criadas pelas faltas, no caso de aberturas e de faltas intermediárias. $R1$ é o conjunto de barras remanescentes após a primeira redução do sistema, com as barras fictícias já acrescentadas, e pode ser diferente para cada seqüência. Em geral, o conjunto $R1$ pode apresentar mais barras na seqüência zero do que nas seqüências positiva e negativa, em vista da

necessidade de permanência, no diagrama de seqüência zero reduzido, das barras mutuamente acopladas a barras do conjunto R1 obtido para as seqüências positiva e negativa. Este fato faz com que o diagrama de seqüência zero reduzido possa ser maior que os diagramas reduzidos das seqüências positiva e negativa. Com relação ao conjunto R2, o mesmo contém as barras remanescentes após a segunda redução do sistema. Essas barras são, como foi dito anteriormente, as barras diretamente afetadas pelos defeitos considerados no caso em estudo, podendo ser barras fictícias (no caso de aberturas e faltas intermediárias) ou barras reais do próprio sistema (no caso de aplicação de defeito diretamente nessas barras). As barras contidas no conjunto R2 são, dessa forma, as chamadas barras externas. As barras internas são as barras contidas no conjunto R1 que não estão contidas no conjunto R2.

Neste ponto do método, o programa possui a informação das características das matrizes de admitância de barra nas seqüências positiva, negativa e zero do sistema equivalente visto pelas barras externas. A transformação de coordenadas de seqüência para coordenadas de fase combina os diagramas das três seqüências em um sistema em coordenadas de fase equivalente. Esta transformação é realizada mediante a seguinte relação:

$$Y_{abc} = T \times Y_{012} \times T^{-1} \quad (3.1)$$

Em (3.1), Y_{abc} e Y_{012} são as matrizes de admitância de barra em coordenadas de fase e em coordenadas de seqüência, respectivamente. T é a matriz de transformação de seqüência para fase.

A formação dos conjuntos R1 e R2 e a obtenção das matrizes Y_{012} e Y_{abc} podem ser exemplificadas fazendo-se uso do sistema representado na Figura 20, já apresentado anteriormente para justificar a ocorrência de sobretensões em sistemas providos de compensação série. Supõe-se a ocorrência de um curto monofásico em uma posição de 20% do valor da distância da linha que interliga as barras 3 e 2, a partir da barra 3. Este mesmo sistema será posteriormente utilizado para demonstrar como o disparo automático de *gap* se inclui nas etapas do método geral de cálculo de curto.

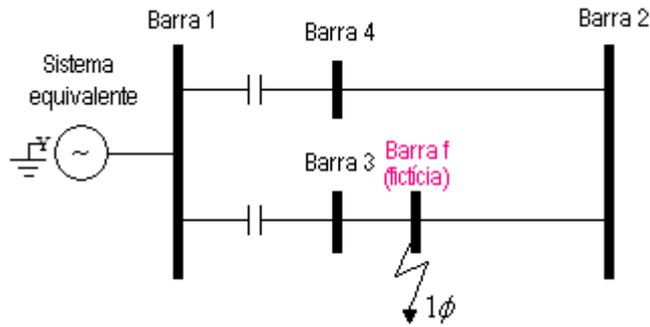


Figura 20: Sistema exemplo para demonstração de método de curto

Percebe-se, pela Figura 20, que o curto monofásico na linha 3-2 implica na criação de uma barra fictícia *f*. De acordo com os critérios estabelecidos em [8], os diagramas de seqüência do sistema da figura 20 devem ser inicialmente reduzidos de forma a conter apenas as barras 2 e 3, tanto na seqüência zero quanto nas seqüências positiva e negativa. Após esta redução, a barra fictícia *f* é também acrescida a estes diagramas reduzidos. Desta forma, para este caso, o conjunto R1 compreende as barras 2, 3 e *f*, para todas as seqüências. Na segunda redução, os diagramas passam a conter apenas as barras diretamente afetadas pela falta que, neste caso, é apenas a barra *f*. Deste modo, o conjunto R2 consiste apenas na barra *f*, caracterizada como sendo uma barra externa. As barras caracterizadas como barras internas são, portanto, as barras 2 e 3, remanescentes após a segunda redução.

As matrizes de admitância de barra para cada um dos diagramas de seqüência reduzidos do sistema e a matriz Y_{012} obtida pela combinação das três seqüências podem ser representadas, concomitantemente, da forma mostrada na Figura 21.

$$Y_{012} = \begin{matrix} \begin{matrix} \ominus \\ \ominus \\ \ominus \end{matrix} \\ \left[\begin{array}{c|cc} & \begin{matrix} \text{f} \\ \boxed{0} & \boxed{1} & \boxed{2} \end{matrix} \\ \hline \begin{matrix} Y_{ff}^0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ Y_{ff}^1 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ Y_{ff}^2 \end{matrix} \end{array} \right] \end{matrix} \quad \begin{matrix} Y_{barra,R2}^0 = [Y_{ff}^0] \\ Y_{barra,R2}^1 = [Y_{ff}^1] \\ Y_{barra,R2}^2 = [Y_{ff}^2] \end{matrix}$$

Figura 21: Matrizes de admitância de barra dos diagramas de seqüência reduzidos e combinação das três seqüências na matriz Y_{012} quando não considerado o disparo de *gap*

Na Figura 21, $Y_{barra,R2}^0$, $Y_{barra,R2}^1$ e $Y_{barra,R2}^2$ são as matrizes de admitância de barra nas seqüências zero, positiva e negativa após a segunda redução do sistema, respectivamente.

Como, para este caso, o conjunto R2 contém apenas a barra fictícia f em todas as seqüências, essas matrizes possuem dimensão 1X1.

Fazendo-se uso da equação 3.1, a matriz Y_{abc} para o caso em estudo pode ser obtida e é representada da forma apresentada na Figura 22.

$$Y_{abc} = \begin{matrix} & & & \begin{matrix} \text{f} \\ \text{a} & \text{b} & \text{c} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{a} \\ \text{b} \\ \text{c} \end{matrix} & \begin{bmatrix} Y_{fafa} & Y_{fabf} & Y_{facf} \\ Y_{fbfa} & Y_{fbfb} & Y_{fbfc} \\ Y_{fcfa} & Y_{fcfb} & Y_{fcfc} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Figura 22: Matriz de admitância de barra em coordenadas de fase do sistema reduzido quando considerado o disparo de gap

Através do exemplo exposto acima, os primeiros passos para a realização da metodologia utilizada pelo programa puderam ser ilustrados e este é o ponto do método importante para a realização do disparo automático de *gap*, visto que, pelo fato do método fazer uso da matriz em coordenadas de fase Y_{abc} , cada uma das fases pode ser tratada de forma independente.

Além da transformação de Y_{012} em Y_{abc} , os vetores de injeção de corrente em coordenadas de seqüência, obtidos quando da redução dos diagramas de seqüência e da conseqüente obtenção dos diagramas equivalentes reduzidos, são combinados em um único vetor e transformados em um vetor de injeções de corrente equivalente em coordenadas de fase, através da seguinte relação:

$$I_{abc} = T \times I_{012} \tag{3.2}$$

Em (3.2), I_{abc} e I_{012} são os vetores de injeção de corrente em coordenadas de fase e em coordenadas de seqüência, respectivamente.

Após a realização de ambas as transformações, são feitas modificações na topologia do sistema equivalente, que variam de acordo com os tipos de defeitos a serem considerados. A solução do sistema equivalente em coordenadas de fase modificado ($V_{abc} = (Y_{abc})^{-1} \times I_{abc}$) fornece os valores de tensão pós-falta do sistema reduzido, ou seja, fornece os valores de tensão pós-falta nas barras externas.

Para a obtenção da corrente de curto, deve-se lembrar que as tensões pós-falta na rede devido à ocorrência de um curto-circuito equivalem ao somatório das tensões originais com as variações de tensão que ocorrem devido ao defeito, da seguinte forma:

$$V'_{abc} = V_{abc} + \Delta V_{abc} \quad (3.3)$$

Multiplicando ambos os lados da equação (3.3) por Y_{abc} , a matriz de admitância de barra em coordenadas de fase do subsistema reduzido, tem-se que:

$$Y_{abc} \times V'_{abc} = Y_{abc} \times V_{abc} + Y_{abc} \times \Delta V_{abc} \quad (3.4)$$

No entanto, sabe-se que:

$$I_{abc} = Y_{abc} \times V_{abc} \quad (3.5)$$

$$\Delta I_{abc} = Y_{abc} \times \Delta V_{abc} \quad (3.6)$$

$$I_{CC,abc} = -\Delta I_{abc} \quad (3.7)$$

Nas equações acima, I_{abc} é o vetor em coordenadas de fase correspondente às injeções de corrente iniciais nas barras externas e ΔI_{abc} é a variação dessas injeções devido ao curto. Além disso, $I_{CC,abc}$ é o vetor correspondente às correntes de curto em cada uma das fases das barras externas.

Substituindo (3.4), (3.5) e (3.6) em (3.3), tem-se que:

$$I_{CC,abc} = I_{abc} - Y_{abc} \times V'_{abc} \quad (3.8)$$

Como tanto o vetor de injeção de correntes inicial quanto a matriz de admitância de barra do sistema equivalente são conhecidos, a obtenção das tensões pós-falta nas barras diretamente afetadas pela falta é suficiente para determinar as correntes de curto nessas barras.

Tendo-se conhecimento do conjunto de tensões pós-falta em coordenadas de fase, o mesmo pode ser decomposto em um conjunto de tensões em coordenadas de seqüência. A manipulação dessas tensões e dos subsistemas reduzidos em coordenadas de seqüência originais, contendo tanto as barras externas quanto as internas (Conjunto R1), permite a

obtenção de um conjunto de correntes de compensação que, quando aplicados apropriadamente nos diagramas de seqüência originais da rede, fornecem como solução tensões idênticas àquelas que seriam obtidas simulando o defeito nas redes originais. Essas correntes de compensação produzem tensões corretas mesmo quando as mudanças na topologia da rede geram acoplamento mútuo entre os diagramas de seqüência, no caso de faltas desbalanceadas.

III.3 *Dados de Entrada*

Como dados de entrada do programa, são fornecidas a corrente para início de condução do MOV, também chamada de corrente de proteção (I_{pr}), e a corrente para disparo do *gap*, também chamada de corrente máxima (I_{max}). O usuário do programa pode também optar por fornecer, ao invés dos dados de corrente, os dados de tensão de proteção (V_{pr}) e de tensão máxima (V_{max}). Esses valores de tensão são fornecidos em valores eficazes. Quando as tensões são fornecidas, o programa calcula internamente os valores das respectivas correntes, da seguinte forma:

$$I_{pr} = (\sqrt{2}V_{pr}) / X_C \quad (3.9)$$

$$I_{max} = (\sqrt{2}V_{max}) / X_C \quad (3.10)$$

Quando um determinado defeito ocorre em uma rede, as correntes resultantes que atravessam os capacitores série podem ultrapassar o valor de corrente de proteção de um ou mais MOVs do sistema. Quando isso ocorre, os MOVs desses capacitores conduzem e o conjunto capacitor-MOV passa a ser representado por uma impedância equivalente, diferente da reatância puramente capacitiva inicial. No entanto, os MOVs têm capacidade de dissipação de energia limitada e podem ser danificados por aquecimento excessivo caso a corrente de curto seja muito elevada. Nesse sentido, são utilizados os *gaps* centelhadores. Quando, mesmo após a condução dos MOVs, as correntes continuam altas ao ponto de ultrapassarem os valores de corrente máxima definidos para os capacitores série, os respectivos *gaps* desses capacitores são disparados, curto-circuitando os mesmos e, desta forma, protegendo o capacitor e o MOV.

Além dos dados de corrente de proteção e corrente máxima, também é fornecido como dado de entrada o tipo de disparo do *gap*, podendo o mesmo ser por fase ou trifásico. Quando há a ocorrência de um curto monofásico em uma rede, por exemplo, a corrente resultante passando através de um capacitor série pode ultrapassar o valor da corrente máxima definida em apenas uma das fases. Quando isso ocorre, o *gap* dispara apenas nessa fase. No entanto, informações externas obtidas no decorrer da elaboração deste trabalho, deixaram aberta a possibilidade do disparo de *gap* poder ocorrer de forma trifásica. No disparo trifásico, as três fases de um capacitor série têm seus *gaps* disparados, independentemente da corrente ter ultrapassado seu valor máximo apenas em uma ou duas delas. Desta forma, foi implementada uma opção que permite ao usuário escolher o tipo de disparo a ser considerado. Quando não se opta pelo disparo trifásico, apenas as fases com correntes superiores aos valores máximos estipulados apresentam disparo de *gap*.

III.4 Método Básico Previamente Existente

Apesar do processo iterativo de condução de MOV não ser o tema central deste trabalho, uma breve explicação do seu mecanismo de funcionamento faz-se necessária para o melhor entendimento de como o disparo de *gap* se inclui no programa. Este mecanismo está melhor explicado em [2].

Como foi dito no capítulo II, as expressões normalizadas para as componentes da impedância equivalente do conjunto capacitor-MOV quando o MOV se encontra em condução são dadas por:

$$r_{eq} = \frac{R_{eq}}{X_C} = 0.0745 + 0.49e^{-0.243I} - 35.0e^{-5.0I} - 0.6e^{-1.4I} \quad (3.11)$$

$$x_{eq} = \frac{X_{eq}}{X_C} = 0.1010 - 0.005749I + 2.088e^{-0.8566I} \quad (3.12)$$

De fato, como pode ser visto através das equações (3.11) e (3.12), a impedância equivalente do conjunto capacitor-MOV é dependente da corrente que passa pelo mesmo. No entanto, a própria corrente também é dependente do valor da impedância equivalente do conjunto. Desta

forma, é necessária a utilização de um processo iterativo para se obter a correta solução de curto em um sistema.

De maneira geral, a solução de um sistema em curto é obtida, primeiramente, desconsiderando-se a presença de qualquer tipo de proteção. Tendo-se conhecimento dos capacitores cujos MOVs entram em condução, a corrente obtida através da solução do sistema sem proteção é utilizada para se obter os valores de impedância equivalente correspondentes, fazendo-se uso das equações (3.11) e (3.12). Com a obtenção desta nova impedância Z_{eq} , o curto-circuito é novamente calculado e verificam-se as variações de corrente e impedância correspondentes, para cada uma das fases de cada um dos capacitores com MOVs em condução. Se ao menos uma dessas variações for maior que uma tolerância pré-estabelecida, o processo não converge e são obtidos novos valores de impedância equivalente e de corrente. A convergência é atingida apenas quando todas as variações obtidas entre uma iteração e a iteração anterior forem inferiores à tolerância. No programa em questão, foi adotada uma tolerância de 10^{-4} por unidade de I_{pr} para variações de corrente e de 10^{-4} por unidade de X_C para variações de R_{eq} e X_{eq} .

O método utilizado sem a consideração do disparo de *gap* é descrito de forma simples pelas etapas abaixo [10]:

1. A falta é calculada desconsiderando-se a existência dos MOVs.
2. Verifica-se o módulo da corrente passando por cada fase de cada conjunto capacitor-MOV do sistema. Se nenhuma exceder a sua corrente de proteção (I_{pr}), passa-se ao item (6).
3. Os MOVs com pelo menos uma fase em condução são identificados e suas barras terminais são incluídas no conjunto que terá suas características de fase temporariamente restauradas.
4. Processo iterativo:
 - a) Calcula-se o curto desconsiderando-se a existência dos MOVs novamente.
 - b) Para cada fase de cada MOV, são calculados os valores de impedância equivalente (Z_{eq}) pelas equações (3.11) e (3.12), a partir do módulo da corrente passando pelo conjunto capacitor-MOV. Se a corrente normalizada (I_{pu}) ficar abaixo de 0.98, Z_{eq} terá o valor da impedância do capacitor ($Z_{eq} = -jX_C$).

c) Com os valores modificados de impedância, calcula-se novamente o curto.

d) Se ao menos uma variação de corrente ou impedância desta iteração em relação à anterior for maior que a tolerância adotada, retorna-se ao item (b). Caso contrário, o processo iterativo é concluído, com correntes de compensação calculadas considerando não apenas a aplicação do curto-circuito mas também as alterações de impedância nos MOVs.

5. Deve-se checar novamente, neste ponto, se algum MOV que inicialmente não conduzia passou a conduzir, devido às alterações de impedância de outros varistores. Se isso acontecer, retorna-se ao item (3) considerando estes MOVs adicionais.

6. Com as correntes de compensação calculadas, que permitem a obtenção de tensões e correntes em qualquer ponto do sistema, o programa segue seu processo normal.

De forma geral, o processo de condução dos MOVs de um sistema pode ser representado pelo fluxograma simplificado apresentado na Figura 23. Este esquema demonstra o processo sem disparo de *gap*, considerando apenas a existência de proteção MOV. Deste modo, a implementação de disparo de *gap* realizada neste trabalho gera modificações neste fluxograma, que serão apresentadas mais adiante.

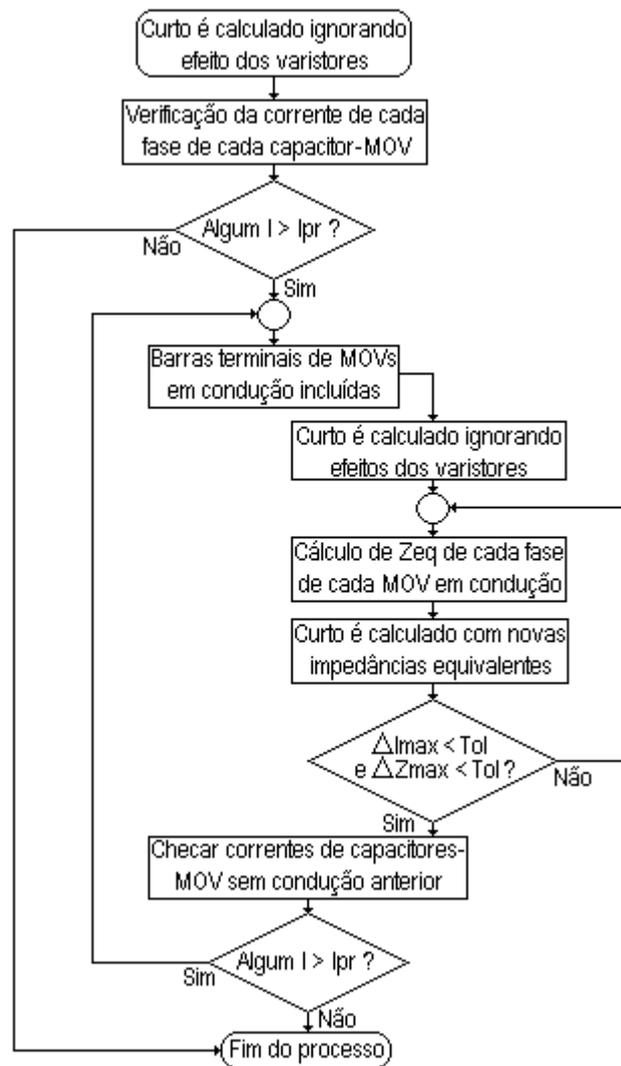


Figura 23: Fluxograma apresentando o método iterativo utilizado para a implementação da condução de MOVs

Para casos em que o processo iterativo não converge, são propostos, em [2], métodos de restrição de passo e de aplicação de freio, que não serão abordados neste trabalho.

Um ponto importante a ser ressaltado é o fato de que a utilização do método geral de análise de curto-circuito descrito em III.2 permite a realização de cálculos por fase, o que possibilita a aplicação deste método de condução de MOV para qualquer tipo de falta, sem a necessidade de se ter um outro tipo de abordagem.

III.5 Avaliação da Necessidade de Atuação das Proteções

A avaliação da necessidade de atuação das proteções é a primeira etapa a ser realizada para incluir o disparo automático de *gap* no programa. Desta forma, nos itens a seguir são explicitados os critérios utilizados para se conciliar a necessidade de condução de MOV com a necessidade de disparo de *gap*.

III.5.1 Necessidade de Condução de MOV

Anteriormente à avaliação da necessidade de disparo de *gap* ou da condução de proteção MOV, a solução de um sistema em curto é encontrada desconsiderando-se qualquer tipo de proteção nos capacitores série presentes no mesmo. Tendo esta solução sido encontrada, a condução dos MOVs desses capacitores é avaliada.

Para se determinar quais os capacitores série que possuem condução de MOV em pelo menos uma das suas fases, os mesmos devem ser percorridos pelo programa e as tensões de suas barras terminais devem ser obtidas. Tendo-se conhecimento dessas tensões, as correntes passantes em cada fase podem ser determinadas e comparadas com os valores de correntes de proteção fornecidos como dados do arquivo de entrada do programa.

Se ao menos uma fase de pelo menos um MOV conduz, os cálculos devem ser realizados novamente e uma nova solução para o sistema deve ser encontrada. Como os resultados das correntes na rede modificam-se quando a condução dos MOVs é considerada, deve-se fazer uma nova busca por possíveis capacitores com proteção MOV conduzindo, mesmo após a realização do processo iterativo. Deve ficar claro, no entanto, que apenas as correntes das fases dos MOVs que não conduziam anteriormente devem ser comparadas com os valores de corrente de proteção. Caso contrário, nos casos em que as correntes permanecem elevadas, a ponto de prevalecerem com valores acima de I_{pr} mesmo após a condução dos MOVs, o programa não funcionaria corretamente. Fica claro, portanto, que o processo iterativo pode ser realizado várias vezes e só deixa de ser necessário quando mais nenhuma fase de nenhum MOV inicialmente sem condução passa a conduzir devido às novas correntes obtidas como solução do sistema.

Quando se chega à conclusão de que pelo menos uma das fases do MOV de um capacitor série conduz, as componentes R_{eq} e X_{eq} do conjunto capacitor-MOV, definidas na seção II.3, são inicializadas, para cada uma das fases, da seguinte forma:

$$R_{eq} = 0 \quad (3.13)$$

$$X_{eq} = X_C \quad (3.14)$$

Por (3.13) e (3.14), pode-se ver que a impedância do conjunto capacitor-MOV é inicializada como sendo a própria impedância do capacitor. Esta impedância é, posteriormente, alterada no processo iterativo.

Além de terem suas impedâncias equivalentes inicializadas, os capacitores que apresentam condução de MOV devem ser acrescentados em um conjunto de capacitores série com atuação de proteção. Os elementos deste conjunto são, posteriormente, percorridos na etapa de solução do sistema em curto.

A Figura 24 apresenta o fluxograma geral do processo de verificação da necessidade de inclusão de MOV. Como pode ser visto pelo esquema, a necessidade de disparo de *gap* é avaliada apenas quando todos os MOVs em condução já foram considerados no cálculo de curto, ou seja, apenas quando todos os MOVs em condução já convergiram. Este critério foi utilizado pois, em geral, os MOVs passam a conduzir instantaneamente após a ocorrência de um defeito. Desta forma, nesta primeira etapa de avaliação, todas as fases de todos os capacitores com correntes passantes acima do valor de I_{pr} devem ser incluídas no processo iterativo, mesmo que essas correntes apresentem valores acima de I_{max} .

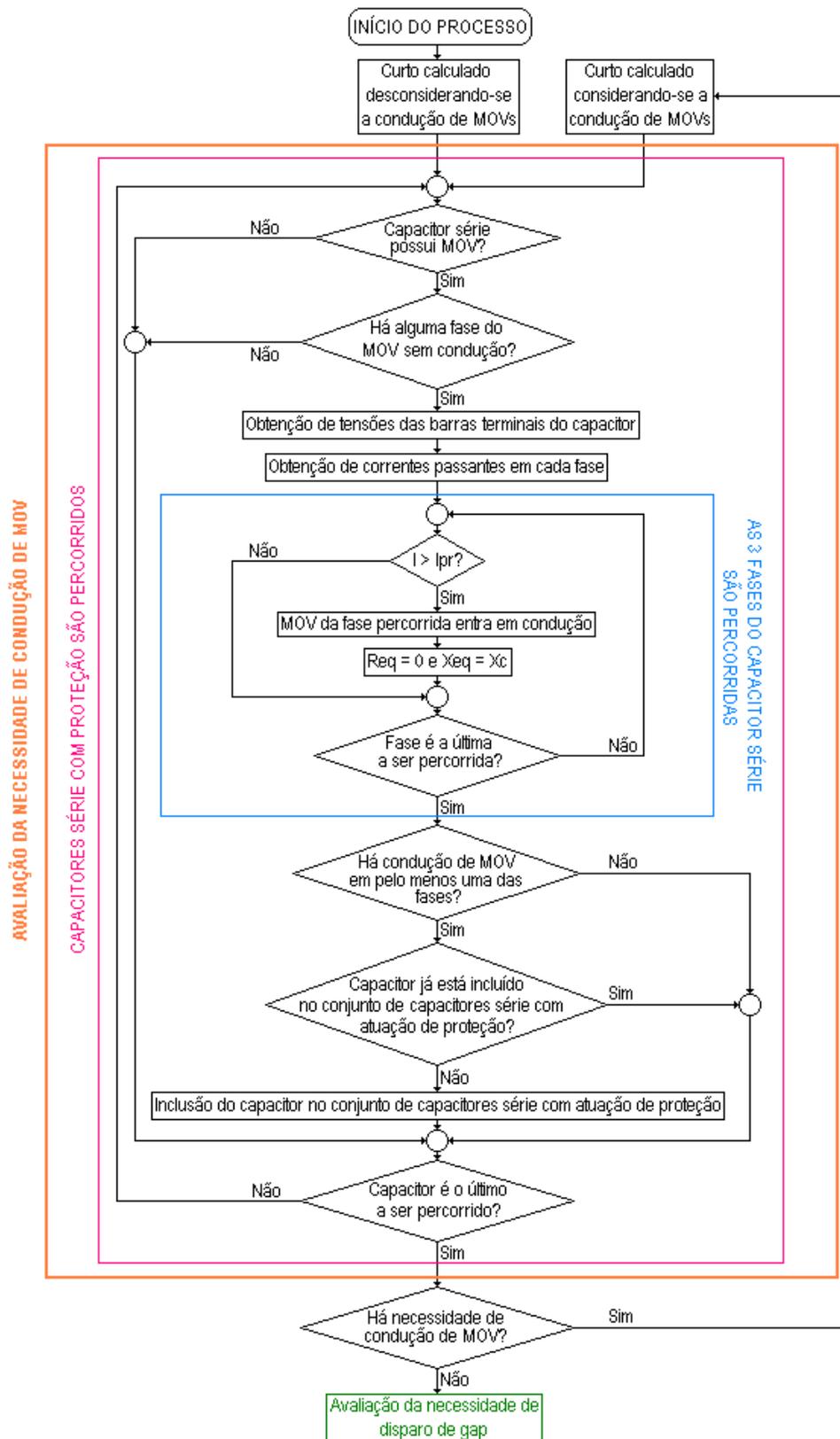


Figura 24: Fluxograma representando a verificação da necessidade de inclusão de MOV

III.5.2 Necessidade de Disparo de Gap

Quando todos os MOVs em condução já convergiram e não há mais a necessidade de se refazer o processo iterativo, procede-se à avaliação da necessidade de disparo de *gaps*. Esta necessidade é analisada apenas após a convergência dos MOVs, em vista de se obter os resultados mais reais possíveis. Caso as correntes passantes nos capacitores fossem comparadas com suas correntes máximas antes da convergência dos MOVs, alguns *gaps* poderiam ser disparados sem necessidade, visto que, na prática, a condução dos MOVs tenderia a ocasionar uma redução das correntes no sistema, o que poderia impedir que houvesse o disparo. Para casos de sistemas com capacitores providos apenas de *gaps* (capacitores com proteção do tipo *gap* simples ou *gap* duplo), a avaliação da necessidade de disparo desses capacitores é realizada imediatamente após o cálculo inicial de curto, não havendo a realização do processo iterativo.

Desta forma, se todos os MOVs em condução já convergiram, todos os capacitores série contendo *gap* são analisados e são obtidas as tensões das barras terminais em cada uma das fases dos mesmos. Tendo-se conhecimento dessas tensões, as correntes em cada uma das fases também podem ser determinadas.

Após a obtenção das correntes, as três fases de cada um dos capacitores são percorridas e é verificado se cada uma das correntes ultrapassou ou não o valor de corrente máxima para o capacitor série correspondente. Se ao menos uma fase de um único capacitor tiver seu *gap* disparado, uma variável do programa informa que a solução do sistema está incompleta e que o mesmo deve ser resolvido novamente. Nesse ponto do programa, uma outra variável armazena a informação de em quais capacitores e em quais fases deve-se ter disparo de *gap*.

Quando se chega à conclusão de que pelo menos uma das fases de um capacitor série tem seu *gap* disparado, as componentes R_{eq} e X_{eq} do conjunto capacitor-MOV definidas na seção II.3 são novamente inicializadas, para cada uma das fases, da forma apresentada em (3.13) e (3.14). Além disso, caso ainda não faça parte do conjunto de capacitores série com atuação de proteção, o capacitor deve, neste momento, ser incluído neste conjunto. No entanto, esta é uma situação que ocorre apenas nos casos em que o capacitor não é provido de MOV, visto que, quando a corrente passante em um capacitor série ultrapassa o valor de corrente máxima, ela inevitavelmente ultrapassa também o valor de corrente de proteção e, desta forma, a

inclusão no conjunto já é realizada no momento de avaliação da necessidade de condução dos MOVs.

Após todas as fases dos capacitores série terem sido percorridas, é verificado se o disparo em cada um dos capacitores série deve ser monofásico ou trifásico, de acordo com informação fornecida no arquivo de entrada de dados. Desta forma, quando ao menos uma fase de um capacitor série tem seu *gap* disparado e o tipo de disparo do mesmo é estabelecido como sendo trifásico, a variável responsável pelo armazenamento da informação de disparo passa a informar que todas as fases do capacitor apresentam disparo de *gap*.

Tendo-se conhecimento de quais *gaps* devem ser disparados, o fechamento dos mesmos pode ser realizado. A seguir, devido às modificações que ocorrem no sistema decorrentes do fechamento de *gaps*, a convergência dos MOVs em condução é novamente realizada, agora com os *gaps* disparados já devidamente curto-circuitados. Para finalizar, a verificação da necessidade de fechamento de novos *gaps* não previamente disparados é efetuada.

Um fluxograma do processo de verificação da necessidade de disparo de *gap* é apresentado na Figura 25.

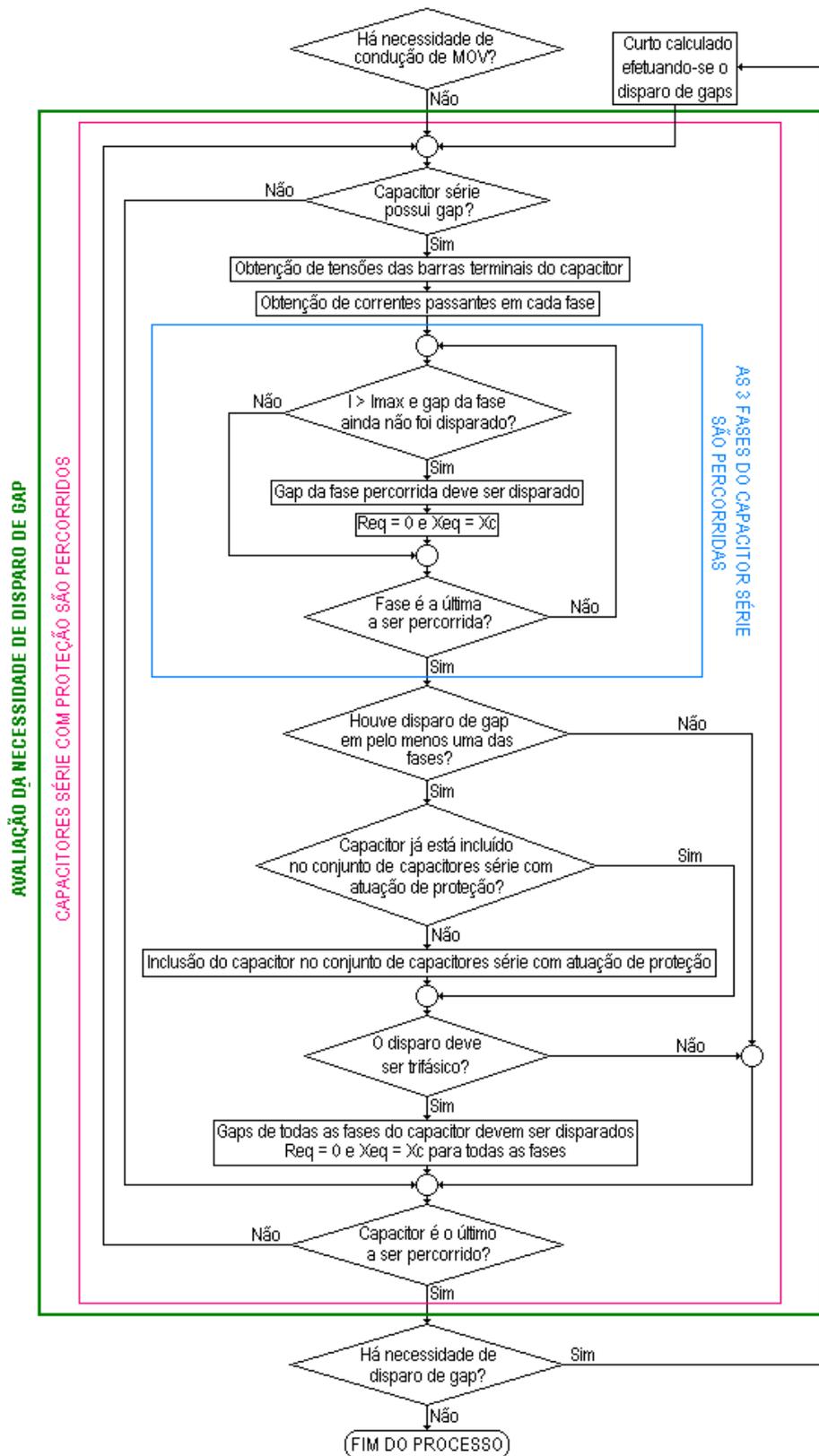


Figura 25: Fluxograma representando a verificação da necessidade de disparo de *gap*

De maneira geral, o fluxograma contendo todo o processo de verificação de condução de MOV e de disparo de *gap* pode ser visto na Figura 26. Nesta figura, os blocos correspondentes à avaliação da necessidade de condução de MOV e à avaliação da necessidade de disparo de *gap* correspondem aos fluxogramas mais detalhados apresentados anteriormente nas Figura 24 e Figura 25, respectivamente.

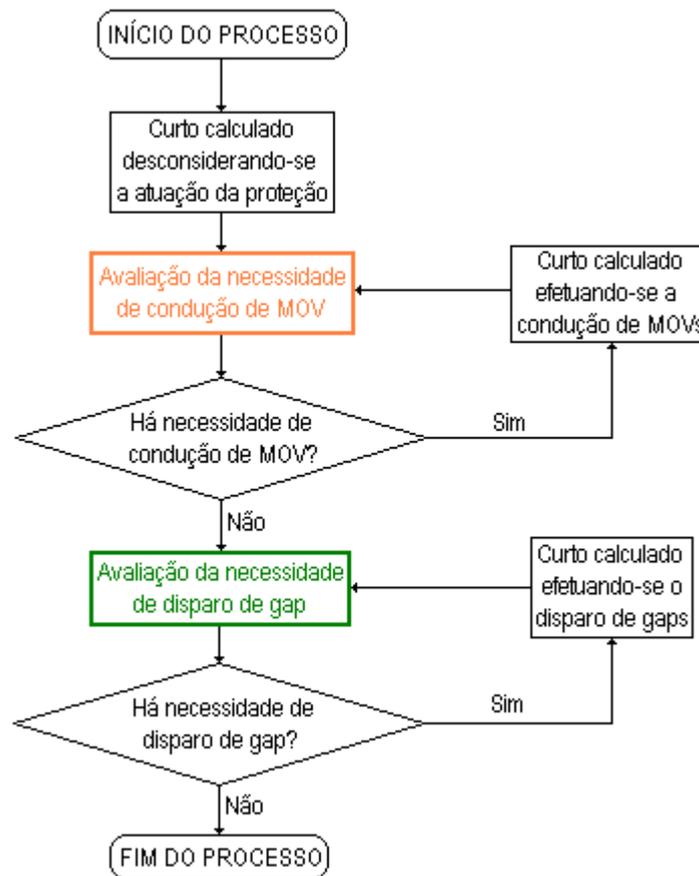


Figura 26: Fluxograma geral representando a avaliação da necessidade de atuação das proteções

III.6 Modificação da Metodologia do Programa Devido à Presença de Gaps Disparados

Como foi visto na seção anterior, a obtenção das tensões e correntes de um sistema em curto começa a ser realizada desconsiderando-se a existência de proteção dos capacitores série presentes no mesmo. Esta etapa inicial é realizada mediante o método descrito na seção III.2. No entanto, algumas modificações devem ser feitas no método em vista de adequá-lo tanto à condução de MOV quanto ao disparo de *gap*. Estando a condução de MOV já previamente

implementada, foram feitas modificações no programa fazendo-se uso de esquema semelhante ao já utilizado para a condução de MOV.

De fato, para simular o *By-Pass* de um determinado capacitor série, os valores de R_{eq} e X_{eq} , determinados iterativamente para simulação da condução de MOV podem ser atribuídos com valores nulos, o que equivale a tornar um único ponto elétrico as duas barras terminais do capacitor (colapso das barras terminais):

$$R_{eq} = 0 \quad (3.15)$$

$$X_{eq} = 0 \quad (3.16)$$

A modificação do valor da impedância do capacitor série devido à ocorrência de disparo de *gap* pode ser melhor compreendida através da Figura 27.



Figura 27: Mudança de impedância devido ao disparo de *gap*

Quando o disparo de *gap* é dado como necessário, mesmo após a prévia condução de MOVs, o programa retorna para a rotina responsável pela alteração do sistema em coordenadas de fase e pela resolução deste, com a obtenção das tensões pós-falta e das correntes de curto. Nesta rotina, tanto as modificações de impedância do capacitor série decorrentes da condução de MOV quanto as decorrentes do disparo de *gap* são implementadas como modificações no sistema em coordenadas de fase apresentado na seção III.2. O conjunto R1 deve passar a conter, além das barras já estipuladas por critérios estabelecidos em [8], todas as barras terminais dos capacitores série com atuação de proteção, seja por MOV ou *gap*. Desta forma, as matrizes de admitância de barra reduzidas, contendo as barras do conjunto R1, passam a ter dimensão maior. Além disso, as barras terminais dos capacitores série presentes no conjunto R1 devem permanecer no subsistema equivalente obtido após a segunda redução, ou seja, devem passar a fazer parte do conjunto R2. Deste modo, essas barras passam a ser tratadas como barras externas. Este fato se deve à necessidade de alteração de elementos da matriz de admitância de barra em coordenadas de fase, elementos estes correspondentes às fases das

barras terminais de capacitores série. Essas alterações são decorrentes tanto da condução de MOV quanto do disparo de *gap*.

Se no sistema da Figura 20, por exemplo, a ocorrência de curto monofásico na linha entre as barras 2 e 3 ocasionar uma sobretensão através do capacitor série situado entre as barras 1 e 3 de tal forma que este tenha seu *gap* disparado na fase afetada, o conjunto R1 deve ser acrescido da barra 1, uma das barras terminais do capacitor série. A outra barra terminal (barra 3) já se encontrava no conjunto e, desta maneira, não precisa ser acrescentada. Para este exemplo, supõe-se que o outro capacitor permanece intacto, ou seja, sem condução de MOV ou disparo de *gap*.

Com relação ao conjunto R2, o mesmo deve passar a conter, além da barra fictícia criada pela falta (barra f), as barras terminais do capacitor série com disparo de *gap* (barras 1 e 3). Percebe-se, desta forma, que a presença de capacitores série em um sistema provoca aumento considerável da matriz de admitância de barra em coordenadas de fase. Para o exemplo em questão, referente ao sistema da Figura 20, esta matriz deixa de ser 3X3 e passa a ser 9X9.

Tal qual já foi feito anteriormente, as matrizes de admitância de barra para cada um dos diagramas de seqüência reduzidos do sistema e a matriz Y_{012} obtida pela combinação das três seqüências podem ser representadas, concomitantemente, da forma mostrada na Figura 28.

$$Y_{012} = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{matrix} \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} \text{f} \\ \text{0} & \text{1} & \text{2} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{1} \\ \text{0} & \text{1} & \text{2} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{3} \\ \text{0} & \text{1} & \text{2} \end{matrix} \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} Y_{ff}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{ff}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{ff}^2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} Y_{1f}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{1f}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{1f}^2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} Y_{3f}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{3f}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{3f}^2 \end{matrix} \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} Y_{f1}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{f1}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{f1}^2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} Y_{11}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{11}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{11}^2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} Y_{31}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{31}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{31}^2 \end{matrix} \end{matrix} \begin{matrix} \begin{matrix} Y_{f3}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{f3}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{f3}^2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} Y_{13}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{13}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{13}^2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} Y_{33}^0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{33}^1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{33}^2 \end{matrix} \end{matrix} \end{matrix}$$

$$Y_{\text{barra,R2}}^0 = \begin{bmatrix} Y_{ff}^0 & Y_{f1}^0 & Y_{f3}^0 \\ Y_{1f}^0 & Y_{11}^0 & Y_{13}^0 \\ Y_{3f}^0 & Y_{31}^0 & Y_{33}^0 \end{bmatrix}$$

$$Y_{\text{barra,R2}}^1 = \begin{bmatrix} Y_{ff}^1 & Y_{f1}^1 & Y_{f3}^1 \\ Y_{1f}^1 & Y_{11}^1 & Y_{13}^1 \\ Y_{3f}^1 & Y_{31}^1 & Y_{33}^1 \end{bmatrix}$$

$$Y_{\text{barra,R2}}^2 = \begin{bmatrix} Y_{ff}^2 & Y_{f1}^2 & Y_{f3}^2 \\ Y_{1f}^2 & Y_{11}^2 & Y_{13}^2 \\ Y_{3f}^2 & Y_{31}^2 & Y_{33}^2 \end{bmatrix}$$

Figura 28: Matrizes de admitância de barra dos diagramas de seqüência reduzidos e combinação das três seqüências na matriz Y_{012} , quando considerado o disparo de *gap*

Na Figura 21, correspondente à matriz Y_{012} sem a consideração, no problema, do disparo de *gap*, esta matriz possuía dimensão 3X3. Considerando-se o disparo de *gap* e o conseqüente acréscimo das barras 1 e 3 no conjunto R2, o mesmo passa a ter dimensão 9X9, tal qual visto na Figura 28.

Fazendo-se novamente o uso da equação 3.1, a matriz Y_{abc} para o caso em estudo pode ser obtida e é representada da forma apresentada na Figura 29.

$$Y_{abc} = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|} \hline \text{f} \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline \text{1} \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{|c|} \hline \text{3} \\ \hline \end{array} \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_{fafa} & Y_{fafb} & Y_{fafc} \\ Y_{fbfa} & Y_{fbfb} & Y_{fbfc} \\ Y_{fcfa} & Y_{fcfb} & Y_{fcfc} \\ \hline Y_{1afa} & Y_{1afb} & Y_{1afc} \\ Y_{1bfa} & Y_{1bfb} & Y_{1bfc} \\ Y_{1cfa} & Y_{1cfb} & Y_{1cfc} \\ \hline Y_{3afa} & Y_{3afb} & Y_{3afc} \\ Y_{3bfa} & Y_{3bfb} & Y_{3bfc} \\ Y_{3cfa} & Y_{3cfb} & Y_{3cfc} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_{fala} & Y_{falb} & Y_{falc} \\ Y_{fb1a} & Y_{fb1b} & Y_{fb1c} \\ Y_{fc1a} & Y_{fc1b} & Y_{fc1c} \\ \hline Y_{1ala} & Y_{1alb} & Y_{1alc} \\ Y_{1b1a} & Y_{1b1b} & Y_{1b1c} \\ Y_{1c1a} & Y_{1c1b} & Y_{1c1c} \\ \hline Y_{3ala} & Y_{3alb} & Y_{3alc} \\ Y_{3b1a} & Y_{3b1b} & Y_{3b1c} \\ Y_{3c1a} & Y_{3c1b} & Y_{3c1c} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline Y_{fa3a} & Y_{fa3b} & Y_{fa3c} \\ Y_{fb3a} & Y_{fb3b} & Y_{fb3c} \\ Y_{fc3a} & Y_{fc3b} & Y_{fc3c} \\ \hline Y_{1a3a} & Y_{1a3b} & Y_{1a3c} \\ Y_{1b3a} & Y_{1b3b} & Y_{1b3c} \\ Y_{1c3a} & Y_{1c3b} & Y_{1c3c} \\ \hline Y_{3a3a} & Y_{3a3b} & Y_{3a3c} \\ Y_{3b3a} & Y_{3b3b} & Y_{3b3c} \\ Y_{3c3a} & Y_{3c3b} & Y_{3c3c} \\ \hline \end{array}$$

Figura 29: Matriz de admitância de barra em coordenadas de fase do sistema reduzido quando considerado o disparo de *gap*

Para este mesmo exemplo, o trecho correspondente ao capacitor série com *gap* disparado, supondo disparo monofásico na fase A, fica da forma representada na Figura 30, na qual são mostradas as três fases do capacitor.

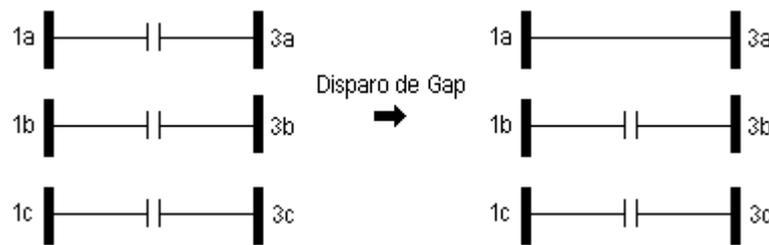


Figura 30: Representação das fases do capacitor com disparo de *gap* na fase A

As barras 1a e 3a passam a ser um único ponto elétrico. Matematicamente isto é representado eliminando da matriz a linha e a coluna referentes à barra 3a. Como o método de solução

busca obter as tensões terminais das barras, é suficiente obter a tensão da barra 1a e repetir o valor para a barra 3a.

Caso o disparo fosse trifásico, os elementos correspondentes às fases B e C também seriam modificados. Ou seja, as barras 3b e 3c também seriam colapsadas.

Após a modificação da matriz Y_{barra} em coordenadas de fase, os passos necessários para se obter as tensões e correntes resultantes da aplicação de um defeito são os passos tradicionais do método geral de análise de faltas. Percebe-se, desta forma, a eficiência deste método, que permite a realização de modificações na estrutura de um sistema de forma bastante simplificada.

Fazendo-se uso dessas considerações, o método descrito em III.4 pôde ser modificado em vista de considerar o disparo automático de *gap*. Desta forma, o método resultante da expansão da modelagem da proteção de capacitores série no programa ANAFAS pode ser descrito pelas etapas abaixo:

1. A falta é calculada desconsiderando-se a existência dos MOVs.
2. Verifica-se o módulo da corrente passando por cada fase de cada conjunto capacitor-MOV do sistema. Se nenhuma exceder a sua corrente de proteção (I_{pr}), passa-se ao item (6).
3. Os MOVs com pelo menos uma fase em condução são identificados e suas barras terminais são incluídas no conjunto que terá suas características de fase temporariamente restauradas.
4. Processo iterativo:
 - a) Calcula-se o curto desconsiderando-se a existência dos MOVs novamente.
 - b) Para cada fase de cada MOV, são calculados os valores de impedância equivalente (Z_{eq}) pelas equações (3.11) e (3.12), a partir do módulo da corrente passando pelo conjunto capacitor-MOV. Se a corrente normalizada (I_{pu}) ficar abaixo de 0.98, Z_{eq} terá o valor da impedância do capacitor ($Z_{eq} = -jX_C$).
 - c) Com os valores modificados de impedância, calcula-se novamente o curto.
 - d) Se ao menos uma variação de corrente ou impedância desta iteração em relação à anterior for maior que a tolerância adotada, retorna-se ao item (b). Caso contrário, o processo

iterativo é concluído, com correntes de compensação calculadas considerando não apenas a aplicação do curto-circuito mas também as alterações de impedância nos MOVs.

5. Deve-se checar novamente, neste ponto, se algum MOV que inicialmente não conduzia passou a conduzir, devido às alterações de impedância de outros varistores. Se isso acontecer, retorna-se ao item (3) considerando estes MOVs adicionais.

6. Verifica-se o módulo da corrente passando por cada fase de cada conjunto capacitor-MOV do sistema. Se nenhuma exceder a sua corrente para disparo de *gap* (I_{max}), passa-se ao item (10)

7. Os *gaps* com disparo em ao menos uma fase de um capacitor são identificados e suas barras terminais, caso ainda não incluídas no conjunto que terá suas características de fase temporariamente restauradas, passam agora a ser incluídas.

8. Disparo de *gap*:

a) A impedância equivalente das fases com disparo de *gap* dos capacitores é atribuída com os valores determinados em (3.15) e (3.16).

b) Com os valores modificados de impedância e o conseqüente colapso de barras, calcula-se novamente o curto, reconvergindo-se os MOVs com os *gaps* fechados.

9. Deve-se checar novamente, neste ponto, se algum *gap* que inicialmente não havia sido disparado passou a disparar devido ao disparo de outros *gaps*. Se isso acontecer, retorna-se ao item (7) considerando estes *gaps* adicionais.

10. Com as correntes de compensação calculadas, que permitem a obtenção de tensões e correntes em qualquer ponto do sistema, o programa segue seu processo normal.

O processo de atuação da proteção dos capacitores série de um sistema pode ser representado, em sua forma expandida, pelo fluxograma apresentado na Figura 31. Neste fluxograma, estão incluídas as etapas necessárias à realização do disparo de *gap* no algoritmo já existente no programa.

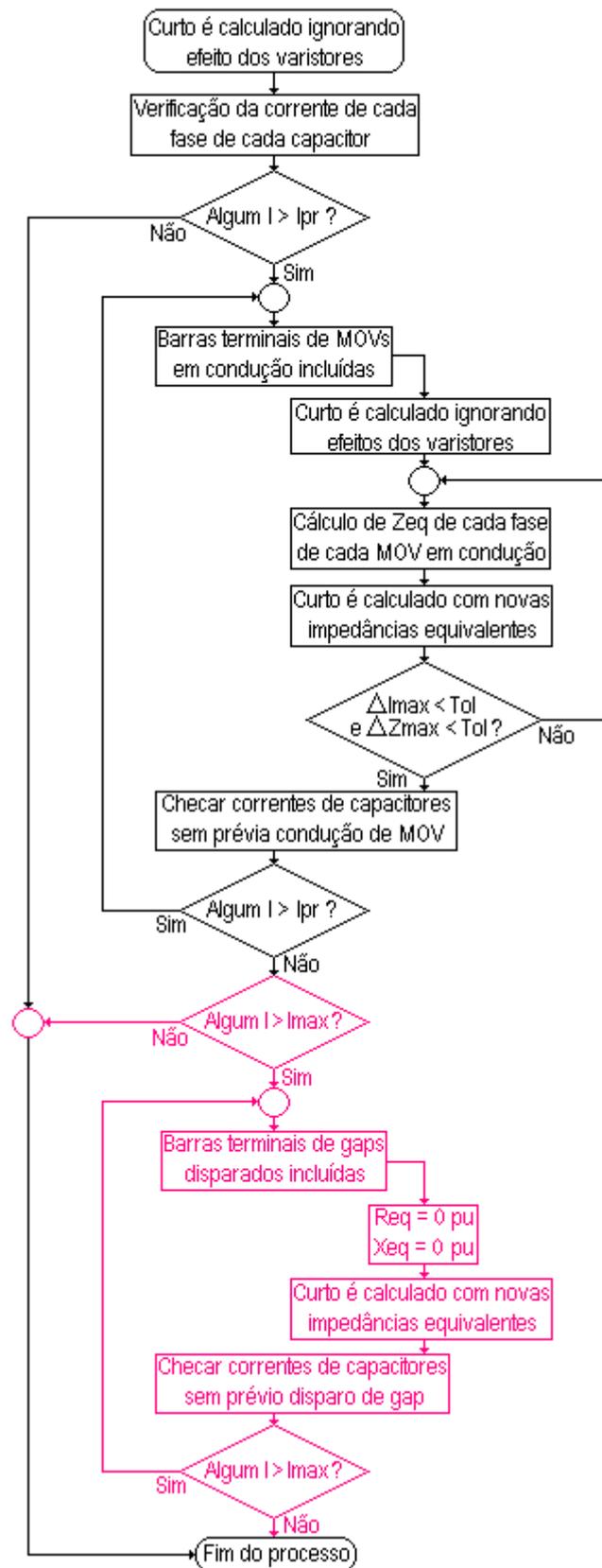


Figura 31: Fluxograma apresentando as etapas necessárias para implementação de condução de MOV e disparo de *gap*

III.7 Sumário do Capítulo

A implementação do disparo automático de *gap* foi realizada em linguagem FORTRAN no programa ANAFAS. Este programa utiliza um método de análise de faltas geral, diferente do método convencional baseado na interligação de diagramas de seqüência. Desta forma, o presente capítulo se propôs a explicar a metodologia utilizada por este programa e como esta é afetada pela condução de MOV e pelo disparo de *gap*. Além disso, devido ao fato da análise de curto-circuito não ser uma simulação no tempo, foram explicitados os critérios adotados para a realização de disparo de *gap* no programa (após a convergência de todos os MOVs e observação de corrente acima do valor de corrente para disparo). Os valores atribuídos pelo usuário no arquivo de entrada foram também mencionados e devidamente explicados.

Capítulo IV

Resultados

IV.1 Considerações

A metodologia apresentada no capítulo anterior foi implementada no programa ANAFAS. Neste capítulo, são apresentados os resultados de simulações feitas com o objetivo de validar a implementação. Os resultados dos curtos simulados são mostrados na interface gráfica do software Sapre-Anafas.

A seguir, são feitos estudos no Sistema Elétrico Brasileiro utilizando-se a base de dados trimestral de curto-circuito de Junho de 2008, disponibilizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

IV.2 Interligação Norte-Sul

Foram feitos estudos a partir do caso de curto-circuito do Sistema Brasileiro produzido pelo ONS, acrescido de dados reais das proteções (I_{pr} e I_{max}) de alguns dos capacitores série da interligação Norte-Sul. Esses capacitores foram anteriormente representados na Figura 18, no capítulo II. Esses estudos foram realizados com o intuito de se verificar a relevância das diferenças de resultados obtidos considerando-se ou desconsiderando-se o disparo de *gaps*.

Na Figura 32 é mostrado o diagrama referente ao sistema de transmissão Imperatriz-Colinas, encontrado na interligação Norte-Sul do Sistema Brasileiro e composto por duas linhas. Em vista de simplificação da visualização deste trecho do sistema, as outras partes do mesmo estão representadas na forma de sistemas equivalentes.

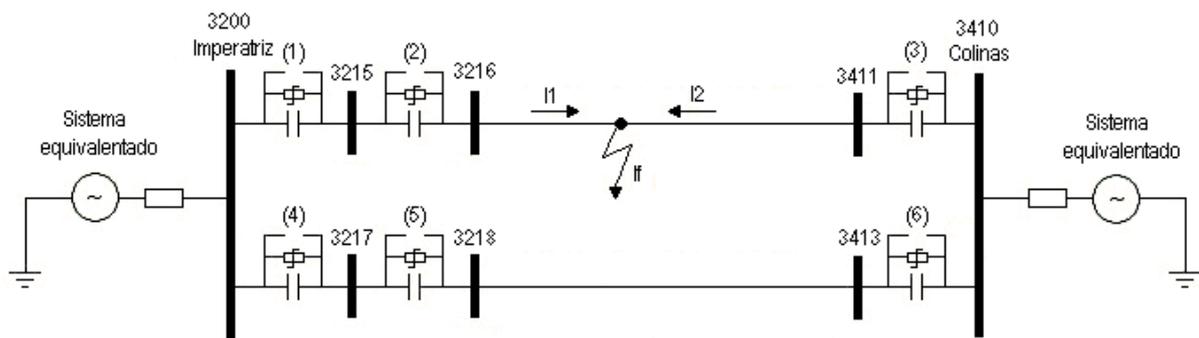


Figura 32: Sistema de transmissão Imperatriz-Colinas

Os dados referentes às proteções dos capacitores série representados esquematicamente na Figura 32 são os seguintes:

Capacitor Série	Corrente de Condução do MOV (A)	Corrente de Disparo do gap (A)
3200 – 3215 (1) 3200 – 3217 (4)	3328	6434
3215 – 3216 (2) 3217 – 3218 (5)	2971	6081
3411 – 3410 (3) 3413 – 3410 (6)	3060	6151

Tabela 2: Dados dos capacitores da linha Imperatriz-Colinas

O estudo deste trecho do sistema foi realizado mediante aplicação de curtos trifásicos e monofásicos ao longo de uma das linhas que vão da SE Imperatriz até a SE Colinas, em virtude de se analisar o comportamento das proteções dos capacitores série quando estes estão sujeitos a curtos com diferentes graus de severidade.

IV.2.1 Curto Trifásico ao Longo da Linha Imperatriz-Colinas

Primeiramente, foram aplicados curtos trifásicos em toda a extensão de uma das linhas que vão da SE Imperatriz até a SE Colinas e foram analisadas as correntes de contribuição para o curto (Correntes I1 e I2). A corrente de contribuição I1 é a corrente que atravessa os capacitores (1) e (2). Deste modo, valores elevados da corrente I1 podem fazer com que os MOVs que protegem esses capacitores comecem a conduzir e, dependendo do quão elevados são esses valores, também podem ocasionar o disparo de seus respectivos gaps. O mesmo

pode ser afirmado com relação à corrente de contribuição I2, que atravessa o capacitor (3) e determina se o seu MOV entrará em condução e se haverá disparo de *gap*.

Como foi visto no capítulo III, o programa foi implementado de tal forma que sejam primeiro obtidos os valores de corrente devido à condução do MOV para que estes sejam posteriormente comparados com os valores de corrente para disparo do *gap*. Desta forma, em vista de se analisar em que posições da linha Imperatriz-Colinas há pelo menos um capacitor série com *gap* disparado, são obtidos os valores das correntes de contribuição para curtos trifásicos aplicados ao longo da linha, considerando apenas a presença de proteção por MOV. Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 33 e 34.

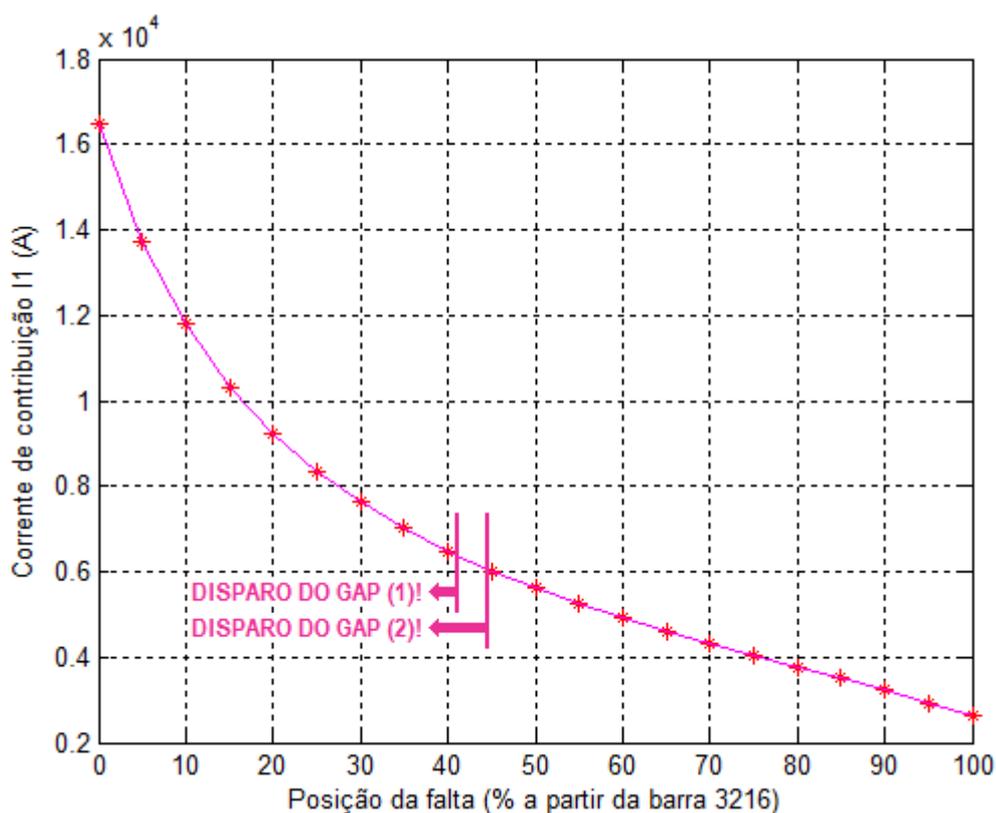


Figura 33: Variação da corrente I1 ao longo da linha (curto trifásico)

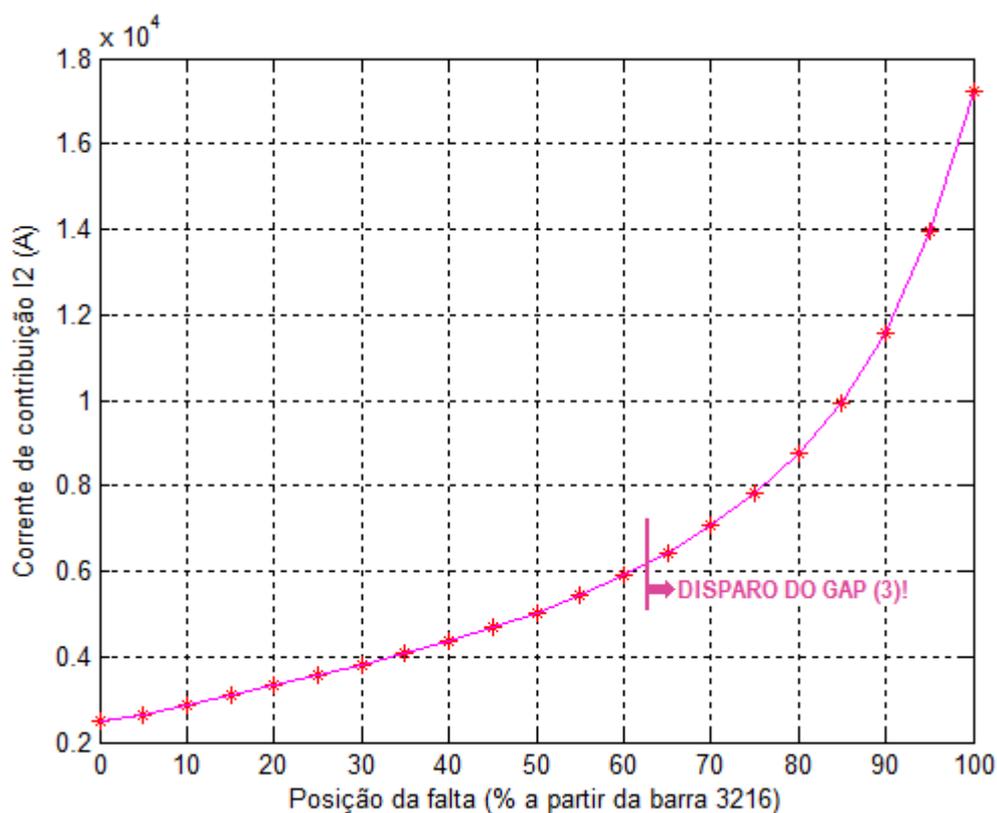


Figura 34: Variação da corrente I2 ao longo da linha (curto trifásico)

Através das figuras 33 e 34, percebe-se que, mesmo com a atuação da proteção MOV, as correntes de contribuição I1 e I2 ainda possuem amplitudes consideravelmente elevadas. Pelos gráficos, nota-se também que a corrente de contribuição I1 decresce à medida que o curto vai sendo aplicado mais distante da barra 3216. O contrário ocorre em relação à corrente de contribuição I2, que aumenta gradativamente à medida que a localização do curto se afasta desta barra e se aproxima da barra 3411.

Como foi dito anteriormente, a corrente I1 é responsável pela atuação tanto da proteção MOV quanto do *gap* dos capacitores (1) e (2). Sendo as correntes para atuação do *gap* destes capacitores iguais a 6434A e 6081A, respectivamente, conclui-se que os seus *gaps* disparam para curtos trifásicos aplicados na região mais próxima da barra 3216. Graficamente, pode-se determinar a partir de que percentual da distância da linha o disparo de *gap* deixa de ser necessário. Analisando-se a Figura 33, chega-se à conclusão de que o *gap* do capacitor (1) dispara para curtos aplicados em uma posição de até 40.5% da distância da linha, a partir da barra 3216. Com relação ao capacitor (2), seu *gap* dispara para curtos em uma posição de até 44.3% desta distância.

No caso do capacitor (3), o disparo de *gap* ocorre quando a corrente de contribuição I2 ultrapassa o valor de 6151A. Da Figura 34, percebe-se que este *gap* dispara para curtos aplicados a partir de uma distância de 62.3% da distância da linha, ou seja, para curtos aplicados nas proximidades da barra 3411.

Com a finalidade de mostrar a atuação ou não dos *gaps* dos capacitores série do sistema de transmissão Imperatriz-Colinas, além da atuação das proteções MOVs, foi elaborada a Tabela 3, que contém a informação de quais tipos de proteções foram acionadas nos diversos intervalos de percentagem da distância total da linha. Esses dados foram retirados do programa através da simulação de curto trifásico deslizante, variando-se a distância a partir da barra 3216 de 1 em 1 %.

Posição na Linha	Proteção em Atuação no Capacitor					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0%	GAP	GAP	X	MOV	MOV	MOV
1% - 3%	GAP	GAP	X	X	MOV	MOV
4% - 15%	GAP	GAP	X	X	X	X
16% - 40%	GAP	GAP	MOV	X	X	X
41% - 44%	MOV	GAP	MOV	X	X	X
45% - 62%	MOV	MOV	MOV	X	X	X
63% - 88%	MOV	MOV	GAP	X	X	X
89% - 93%	X	MOV	GAP	X	X	X
94% - 97%	X	X	GAP	X	X	X
98%	X	X	GAP	X	MOV	X
99% - 100%	X	X	GAP	X	MOV	MOV

Tabela 3: Situações dos capacitores série para curto trifásico aplicado ao longo da linha Imperatriz-Colinas

Fazendo-se uso da Tabela 3, comprova-se a análise gráfica realizada anteriormente, visto que os *gaps* dos capacitores (1) e (2) deixaram de disparar para curtos trifásicos aplicados a partir de uma distância de 41% e 45% da distância da linha, respectivamente. Para distâncias acima

desses valores, apenas a condução de MOV foi constatada nesses capacitores, não havendo a necessidade de disparo de *gap*. À medida que o curto foi sendo aplicado em posições mais distantes da barra 3216, observou-se a não necessidade de atuação de nenhum tipo de proteção, situação esta que ocorreu a partir de 89% da distância da linha para o capacitor (1) e a partir de 94% da distância da linha para o capacitor (2).

Com relação ao capacitor (3), o mesmo não apresenta atuação de nenhum tipo de proteção para curtos aplicados nas proximidades da barra 3216. No entanto, à medida que a localização do curto se distancia dessa barra, a atuação da proteção MOV passa a ser necessária, ainda sem a necessidade de disparo de *gap*. Essa situação ocorre a partir de 16% da distância da linha. Quando a posição em que o curto é aplicado aumenta e chega a 63% da distância da linha, a corrente que atravessa o capacitor passa a ser suficientemente alta para provocar o disparo do *gap*, situação esta que está de acordo com a análise gráfica realizada anteriormente.

Ainda com relação à Tabela 3, nota-se que curtos aplicados nas próprias barras terminais da linha ou muito próximos às mesmas chegam a ocasionar condução de MOV na outra linha do sistema de transmissão Imperatriz-Colinas, que se encontra em paralelo com a linha na qual o curto é aplicado.

As figuras a seguir mostram os resultados obtidos para determinados percentuais de distância da linha. Esses resultados foram retirados da interface gráfica do software Sapre-Anafas e permitem uma melhor observação das diferenças de resultados obtidas quando o disparo de *gap* é considerado no programa. Essas figuras mostram as correntes resultantes no sistema de transmissão Imperatriz-Colinas tais quais obtidas antes e depois da implementação realizada neste trabalho. Os módulos das correntes são dados em ampères e as suas fases são dadas em graus.

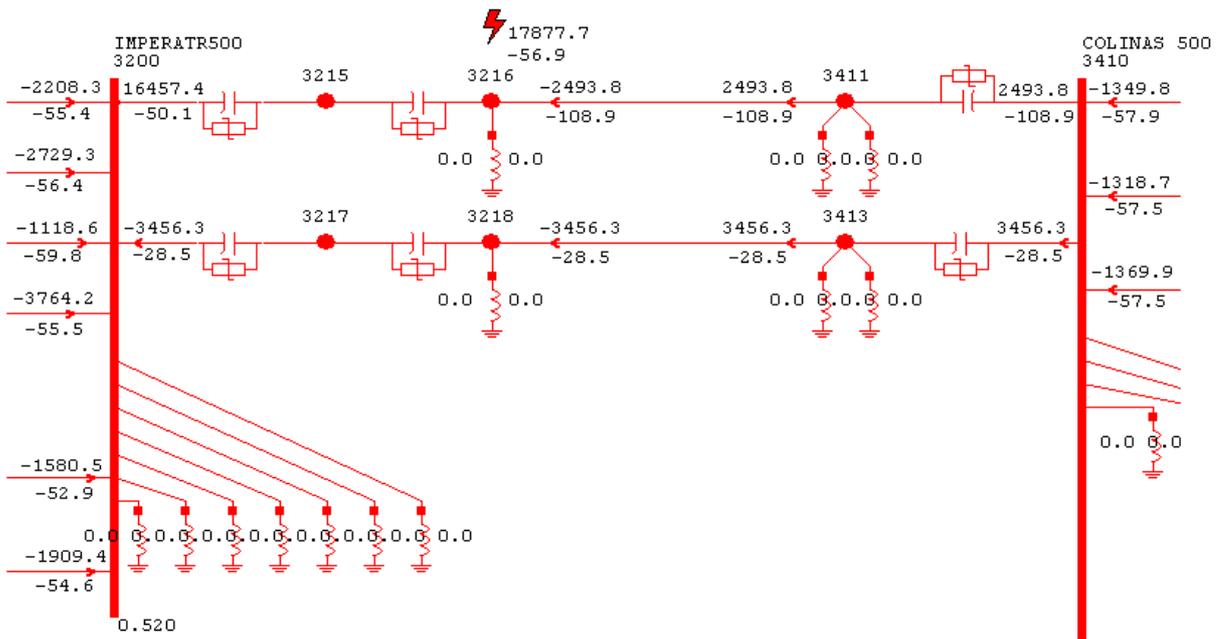


Figura 35: Resultado obtido para falha trifásica a 0% da LT Imperatriz-Colinas antes da implementação do disparo automático de *gap*

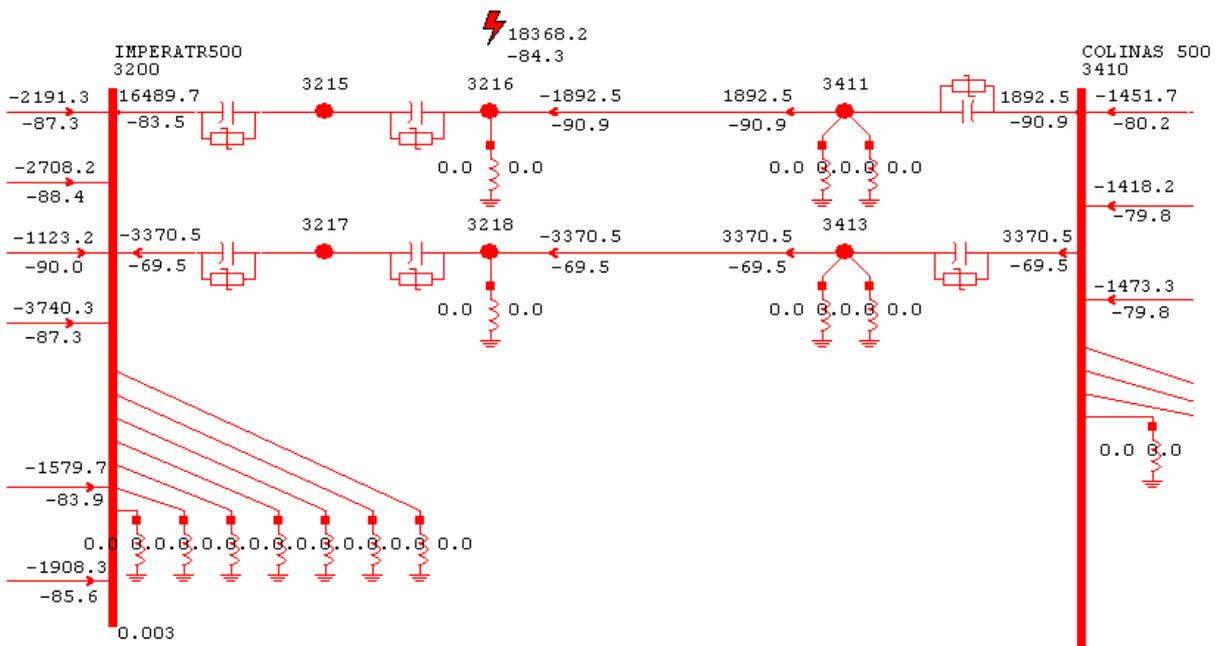


Figura 36: Resultado obtido para falha trifásica a 0% da LT Imperatriz-Colinas após a implementação do disparo automático de *gap*

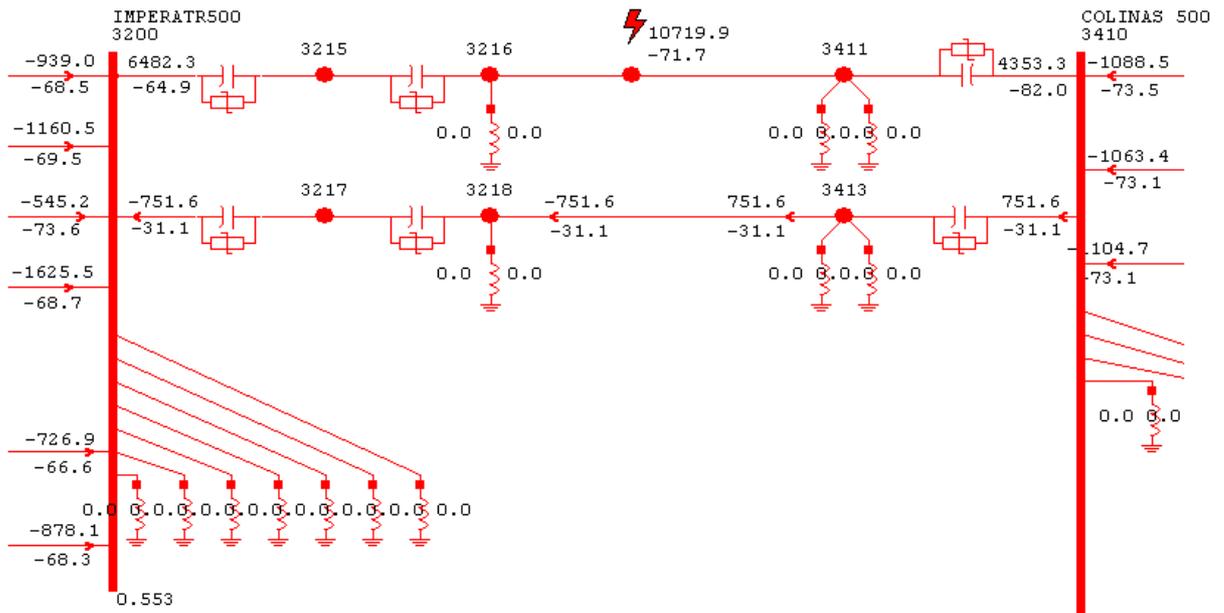


Figura 37: Resultado obtido para falha trifásica a 40% da LT Imperatriz-Colinas antes da implementação do disparo automático de *gap*

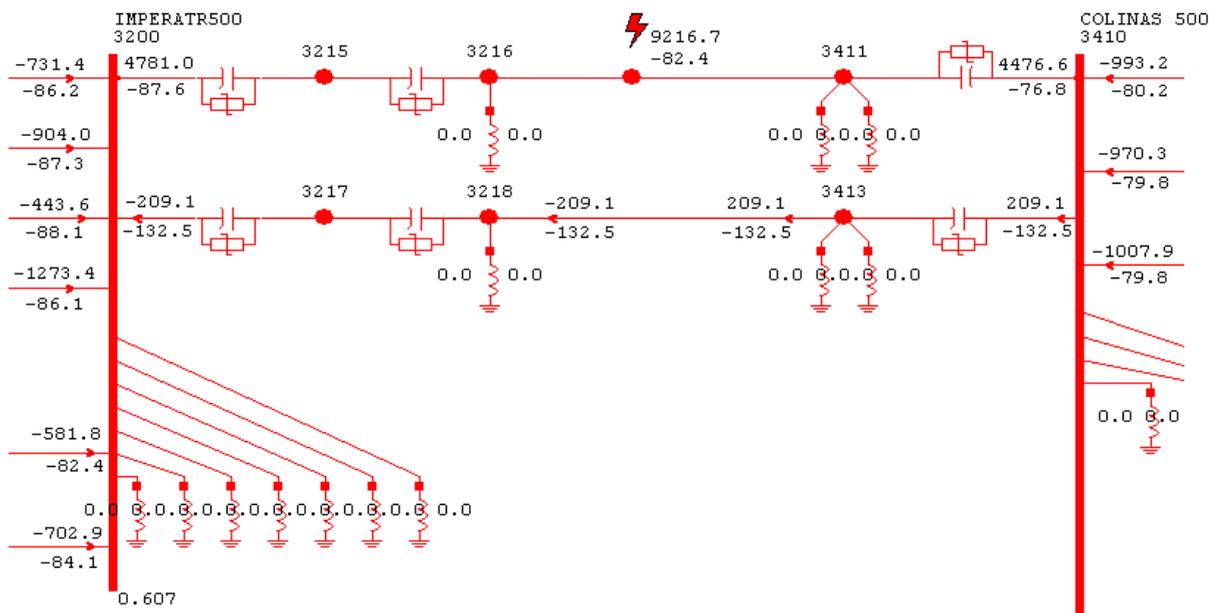


Figura 38: Resultado obtido para falha trifásica a 40% da LT Imperatriz-Colinas após a implementação do disparo automático de *gap*

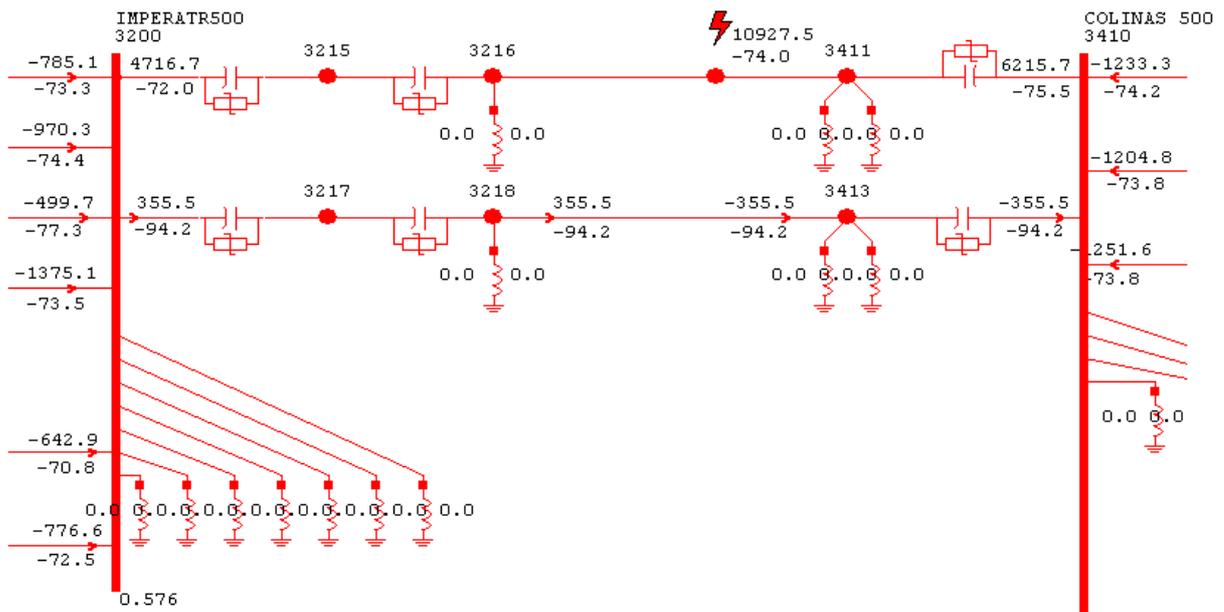


Figura 39: Resultado obtido para falha trifásica a 63% da LT Imperatriz-Colinas antes da implementação do disparo automático de *gap*

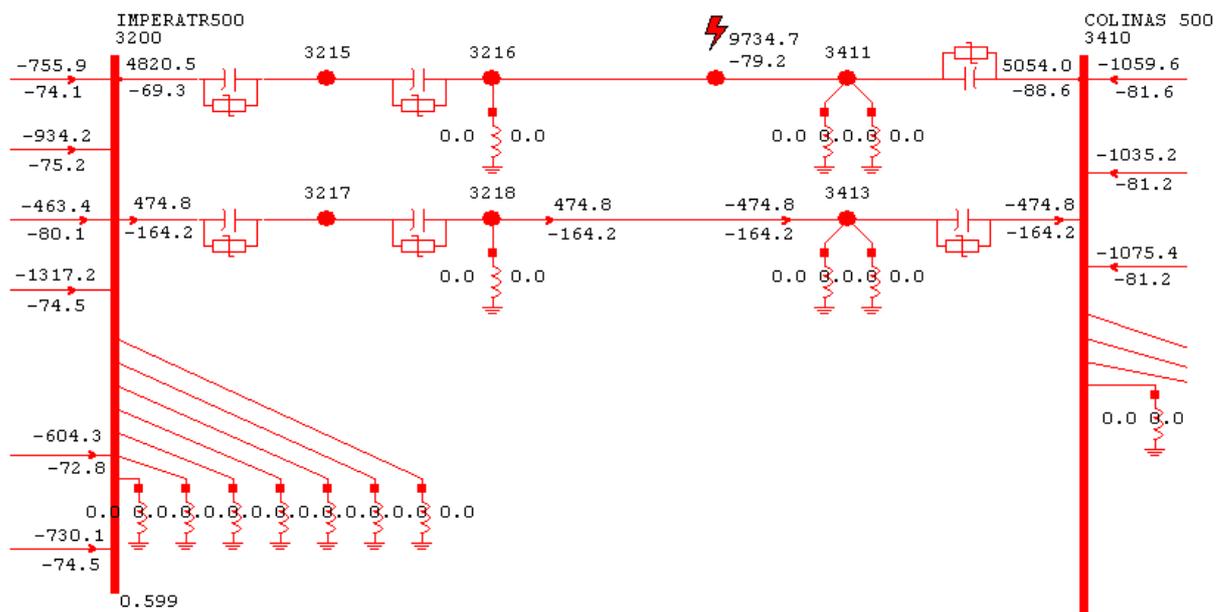


Figura 40: Resultado obtido para falha trifásica a 63% da LT Imperatriz-Colinas após a implementação do disparo automático de *gap*

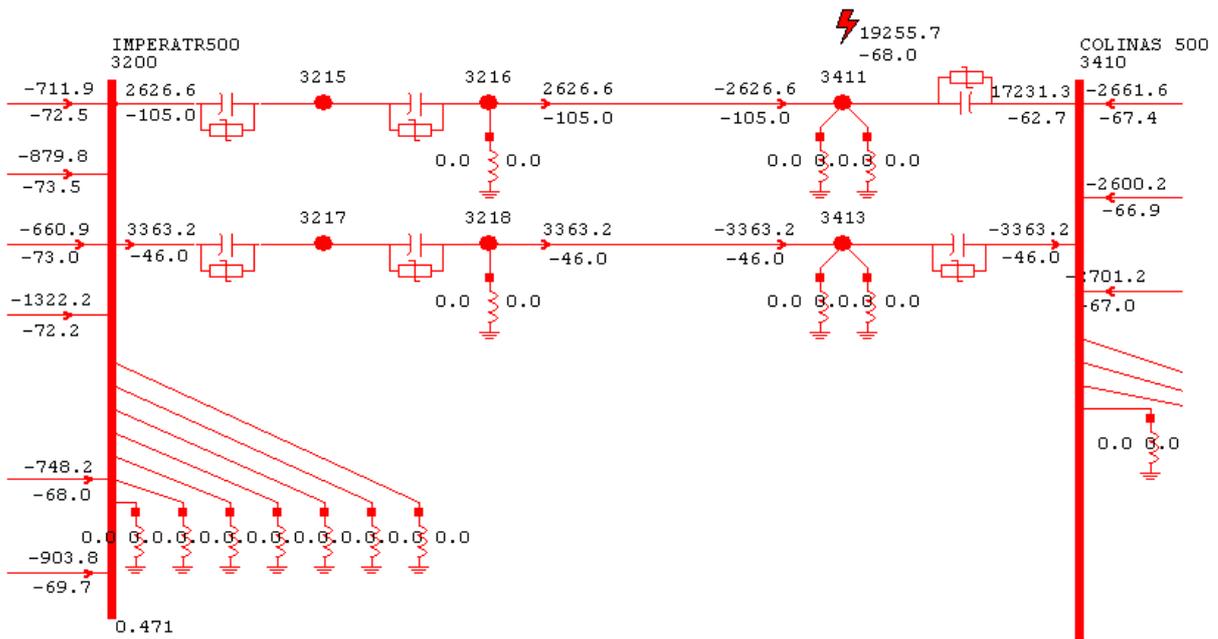


Figura 41: Resultado obtido para falha trifásica a 100% da LT Imperatriz-Colinas antes da implementação do disparo automático de *gap*

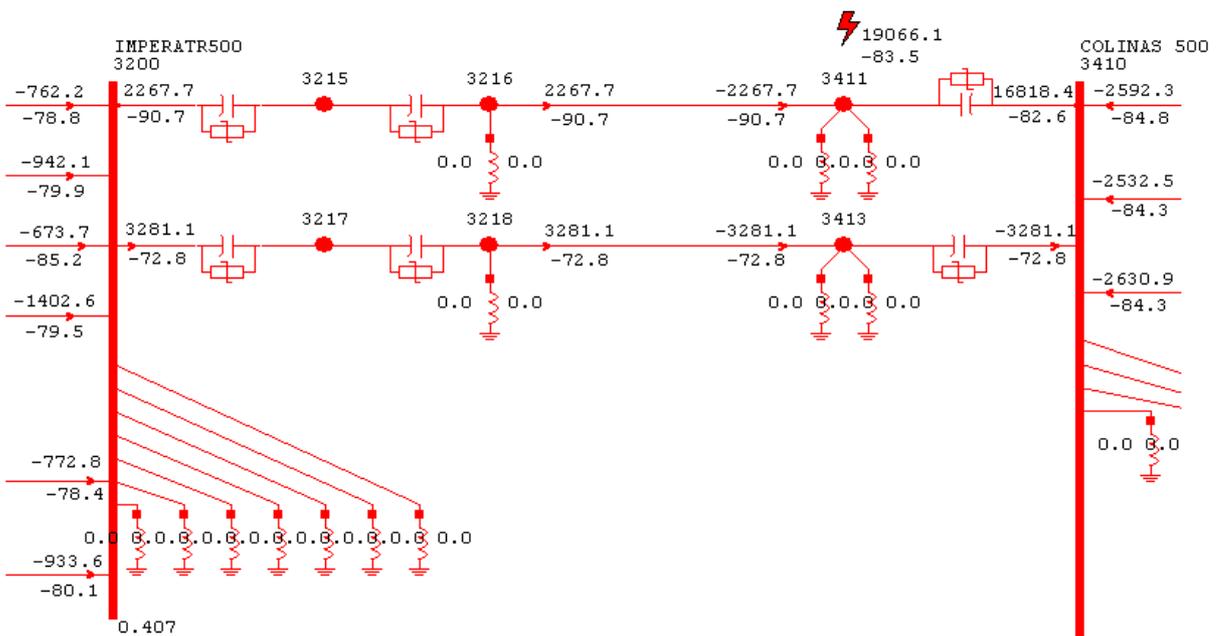


Figura 42: Resultado obtido para falha trifásica a 100% da LT Imperatriz-Colinas após a implementação do disparo automático de *gap*

Utilizando-se a mesma denominação da Figura 32, a corrente que atravessa os capacitores (1) e (2), a corrente que atravessa o capacitor (3) e a corrente de curto são definidas como sendo

I1, I2 e If, respectivamente. O sumário dos valores fasoriais destas correntes para as posições de aplicação de curto consideradas nas figuras anteriores pode ser visto na Tabela 4.

Posição na Linha	Correntes com MOVs e sem <i>gaps</i> (A)			Correntes com MOVs e com <i>gaps</i> (A)		
	I1	I2	If	I1	I2	If
0%	16457.4∠-50.1°	2493.8∠-108.9°	17877∠-66.9°	16489.7∠-83.5°	1892.5∠-90.9°	18368.2∠-84.3°
40%	6482.3∠-64.5°	4353.3∠-82°	10719.9∠-71.7°	4781∠-87.6°	4476.6∠-76.8°	9216.7∠-82.4°
63%	4716.7∠-72°	6215.7∠-75.5°	10927.5∠-74°	4820.5∠-69.3°	5054∠-88.6°	9734.7∠-79.2°
100%	2626.6∠-105°	17231.3∠-62.7°	19255.7∠-68°	2267.7∠-90.7°	16818.4∠-82.6°	19066.1∠-83.5°

Tabela 4: Correntes nos capacitores e corrente de curto na linha com defeito para diversas posições de aplicação do curto

As reduções percentuais das amplitudes das correntes apresentadas na Tabela 4 podem ser vistas na Tabela 5.

Posição na Linha	Redução de Amplitude das Correntes (%)		
	I1	I2	If
0%	-0.20	24.11	-2.75
40%	26.25	-2.83	14.02
63%	-2.20	18.69	10.92
100%	13.66	2.40	0.98

Tabela 5: Redução de amplitude das correntes da tabela 4 quando o disparo de *gap* é efetuado

Através das Tabelas 4 e 5, nota-se que a consideração do disparo de *gap* leva a diferenças tanto em módulo quanto em fase nas correntes resultantes no sistema devido ao curto. Na maior parte dos casos, o fechamento de *gaps* leva as correntes a apresentarem ângulo mais indutivo, o que é ocasionado pela redução da compensação série do sistema. Além disso, a maior parte das correntes passa a ter módulo reduzido se comparado com o módulo obtido sem se considerar o disparo de *gap*.

IV.2.2 Curto Monofásico ao Longo da Linha Imperatriz-Colinas

Considerando-se a aplicação de curto monofásico ao longo de uma das linhas do sistema de transmissão Imperatriz-Colinas, pode-se avaliar a ocorrência de disparo de *gap* em uma situação mais freqüente e real no Sistema Elétrico Brasileiro, visto que curtos trifásicos ocorrem com uma freqüência menor.

Desconsiderando-se mais uma vez a atuação dos *gaps* dos capacitores série do sistema, o comportamento das correntes de contribuição para curto monofásico aplicado em toda a extensão da linha que vai da SE Imperatriz até a SE Colinas (Correntes I1 e I2) pode ser visto graficamente nas figuras Figura 43 e Figura 44.

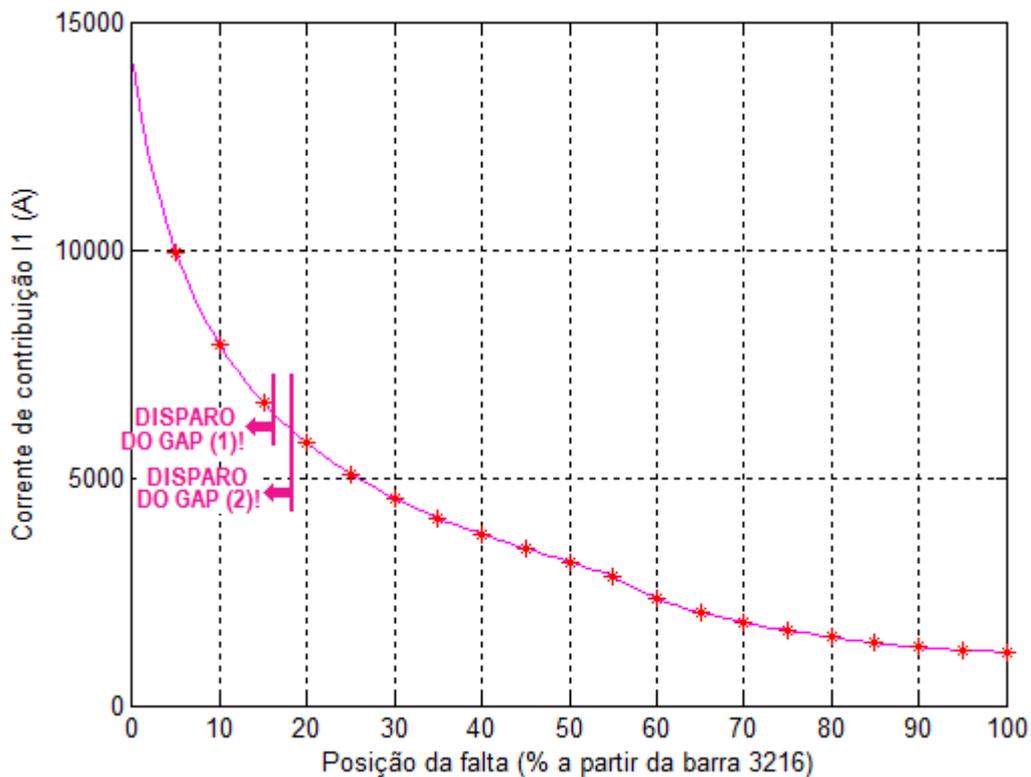


Figura 43: Variação da corrente I1 ao longo da linha (curto monofásico)

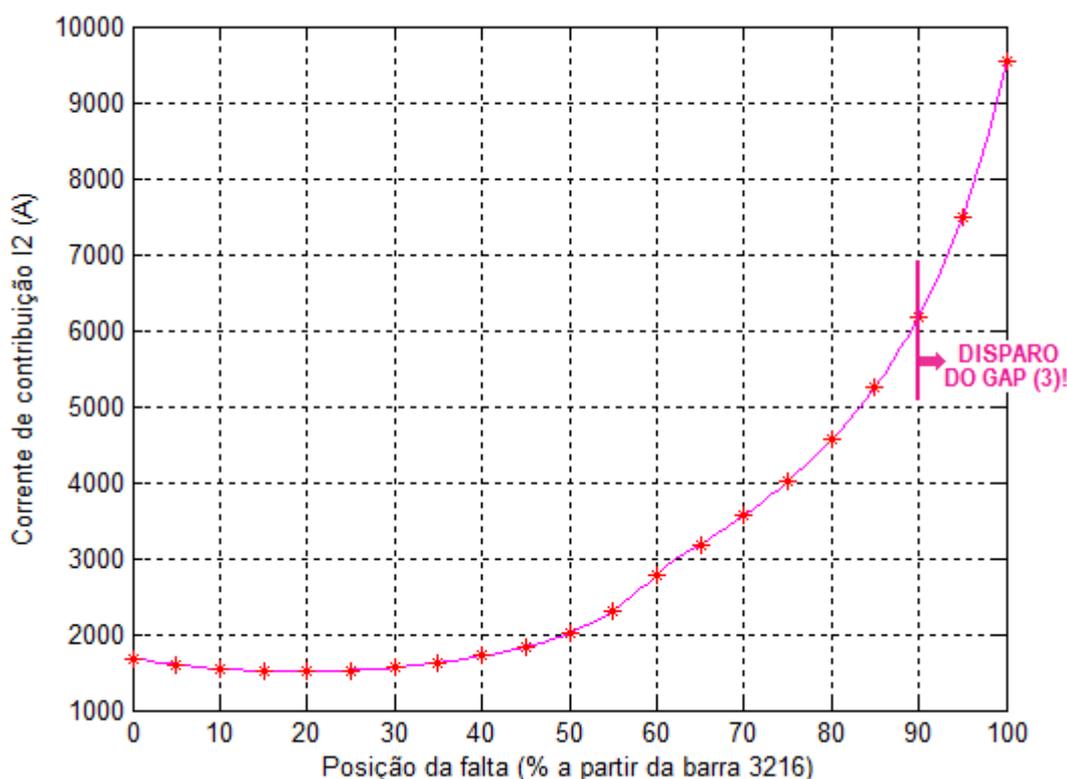


Figura 44: Variação da corrente I2 ao longo da linha (curto monofásico)

Os gráficos das Figuras 43 e 44 representam as correntes de contribuição na fase de aplicação do defeito. Pelos gráficos, nota-se que, mais uma vez, a corrente de contribuição I1 decresce à medida que o curto vai sendo aplicado mais distante da barra 3216 e o contrário ocorre em relação à corrente de contribuição I2, que aumenta gradativamente à medida que a localização do curto se afasta desta barra e se aproxima da barra 3411.

Graficamente, pode-se novamente determinar a partir de que percentual da distância da linha o disparo de *gap* nos capacitores (1) e (2) deixa de ser necessário. Analisando-se a Figura 43, chega-se à conclusão de que o *gap* do capacitor (1) dispara para curtos aplicados em uma posição de até 16% da distância total da linha, a partir da barra 3216. Com relação ao capacitor (2), seu *gap* dispara para curtos aplicados em uma distância de até 17.9% da distância da linha. Desta forma, percebe-se que a aplicação de curto monofásico provoca diminuição das amplitudes das correntes de contribuição para o curto, se comparadas com as amplitudes resultantes quando da aplicação de curto trifásico. Este fato faz com que o disparo de *gap* deixe de ser necessário a partir de um percentual relativamente menor da distância total da linha.

Com relação ao capacitor (3), o gráfico da figura 35 permite perceber que seu *gap* dispara para curtos aplicados a partir de uma posição de 89.9% da distância da linha, ou seja, para curtos aplicados nas proximidades da barra 3411. Nota-se também que este percentual aumenta muito se comparado com o obtido quando da aplicação de curto trifásico.

A Tabela 6 mostra quais são as proteções que atuam na fase em defeito quando é aplicado curto monofásico ao longo de toda a extensão da linha. Esses dados foram novamente retirados do programa através da simulação de curto deslizante, variando-se a distância a partir da barra 3216 de 1 em 1 %.

Posição na Linha	Proteção em Atuação no Capacitor					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0% - 16%	GAP	GAP	X	X	X	X
17%	MOV	GAP	X	X	X	X
18% - 47%	MOV	MOV	X	X	X	X
48% - 52%	X	MOV	X	X	X	X
53% - 63%	X	X	X	X	X	X
64% - 89%	X	X	MOV	X	X	X
90% - 100%	X	X	GAP	X	X	X

Tabela 6: Situações dos capacitores série para curto monofásico aplicado ao longo da linha Imperatriz-Colinas

Tal qual pode ser visto na Tabela 6, a aplicação de curto monofásico faz com que a atuação das proteções dos capacitores série seja menos freqüente. Através desta tabela, nota-se que os *gaps* dos capacitores (1) e (2) deixam de disparar para curtos monofásicos aplicados a partir de uma distância de 17% e 18% da distância da linha, respectivamente. Este fato corrobora a análise gráfica realizada anteriormente. Para distâncias acima desses valores, apenas a condução de MOV foi constatada nesses capacitores, não havendo a necessidade de disparo de *gap*. Esta situação ocorre até o valor de 47%. De 48% até 52%, a condução de MOV foi observada apenas no capacitor (2), que possui uma menor corrente de proteção. À medida que o curto foi sendo aplicado em posições mais distantes da barra 3216, não foram observados

nem a condução de MOV e nem o disparo de *gap* nos capacitores (1) e (2), situação esta que ocorreu a partir de 53% da distância da linha.

Com relação ao capacitor (3), o mesmo não teve atuação de nenhum tipo de proteção quando o curto foi aplicado distante da barra 3411, só apresentando condução de seu MOV a partir de 64% da distância da linha. Apenas a partir de 90% dessa distância o aumento elevado da corrente atravessando este capacitor leva à necessidade de disparo do seu *gap* na fase de aplicação do curto. Este resultado condiz, mais uma vez, com a análise gráfica realizada anteriormente.

Diferentemente do caso de aplicação de curto trifásico, a aplicação de curto monofásico ao longo da linha não leva à atuação das proteções de nenhum dos capacitores da linha que se encontra em paralelo à mesma. De fato, percebe-se que a aplicação de curto monofásico faz com que o disparo dos *gaps* dos capacitores ocorram para curtos mais próximos de suas respectivas barras terminais do que no caso de curto trifásico. Nota-se também que existe uma faixa de aplicação de curto (53% até 63%) em que não se tem a atuação de nenhuma das proteções, o que não ocorreu no caso apresentado no item anterior.

As figuras a seguir mostram os resultados obtidos para determinados percentuais de distância da linha quando curto monofásico é aplicado na mesma. Esses resultados foram novamente retirados da interface gráfica do software Sapre-Anafas e permitem uma melhor observação das diferenças de resultados obtidas quando o disparo de *gap* é considerado no programa. Essas figuras mostram as correntes resultantes no sistema de transmissão Imperatriz-Colinas tais quais obtidas antes e depois da implementação realizada neste trabalho. Os módulos das correntes são dados em ampères e as suas fases são dadas em graus. Os resultados apresentados são referentes à fase em que o curto foi aplicado e são obtidos considerando-se disparo de *gap* trifásico.

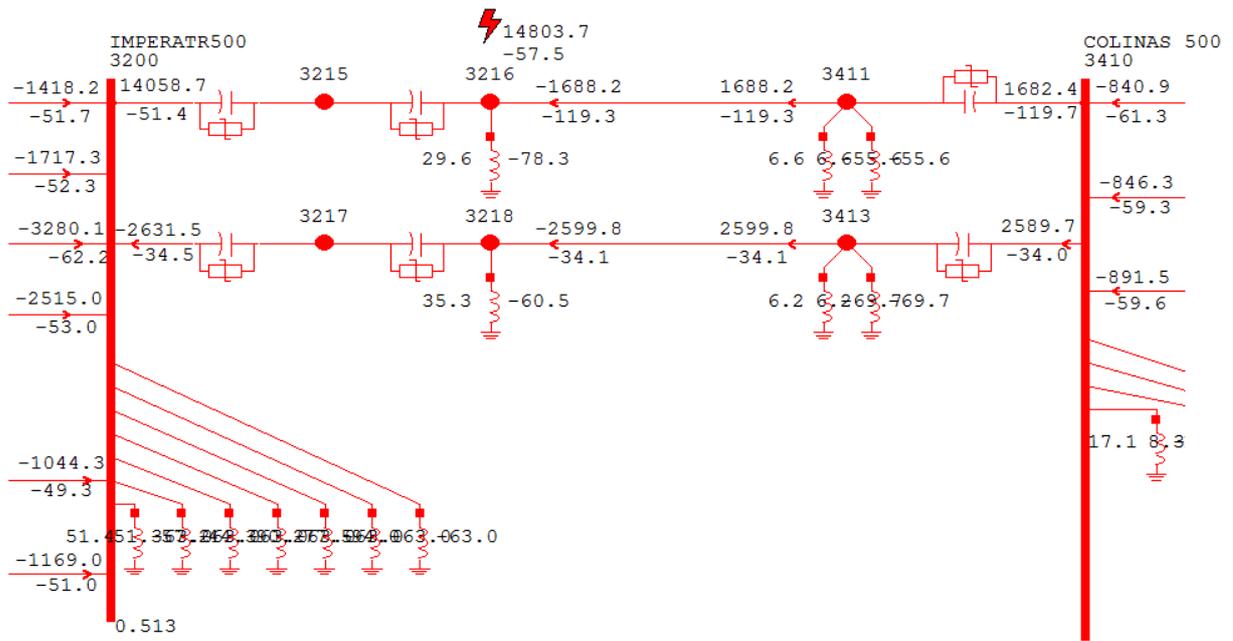


Figura 45: Resultado obtido para falta monofásica a 0% da LT Imperatriz-Colinas antes da implementação do disparo automático de *gap*

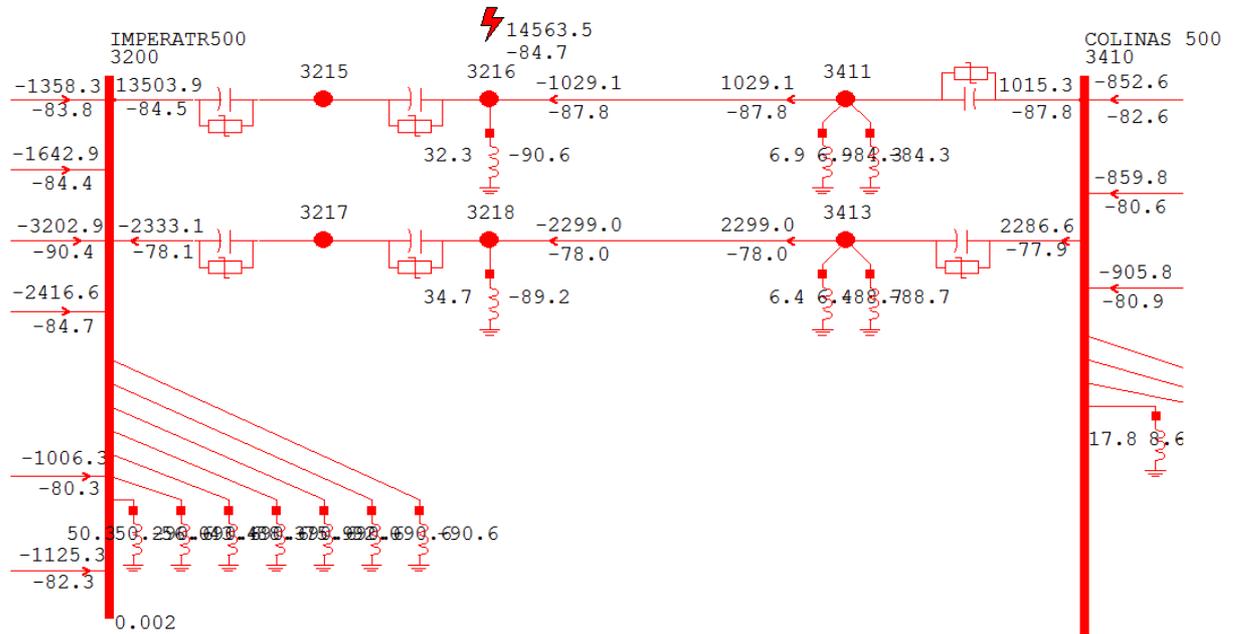


Figura 46: Resultado obtido para falta monofásica a 0% da LT Imperatriz-Colinas após a implementação do disparo automático de *gap*

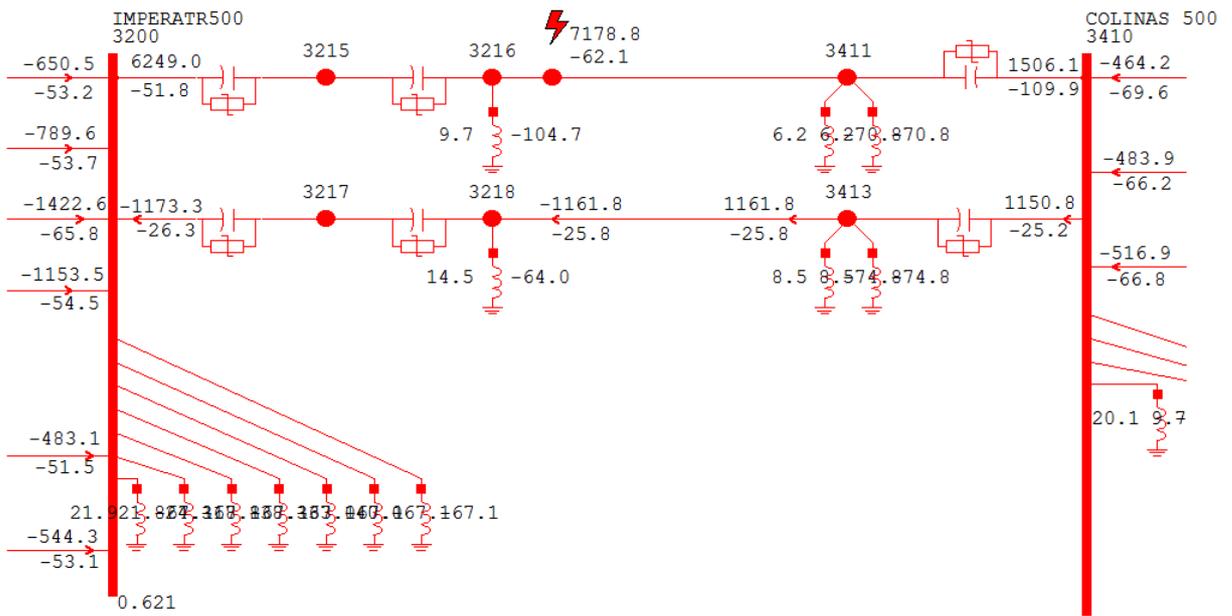


Figura 47: Resultado obtido para falha monofásica a 17% da LT Imperatriz-Colinas antes da implementação do disparo automático de *gap*

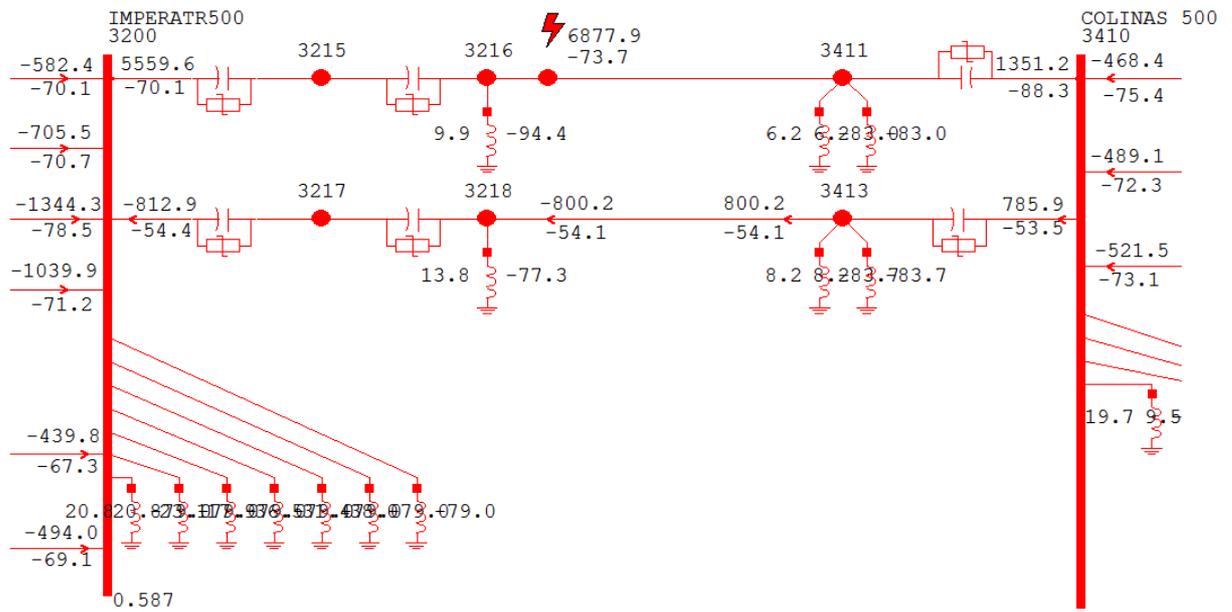


Figura 48: Resultado obtido para falha monofásica a 17% da LT Imperatriz-Colinas após a implementação do disparo automático de *gap*

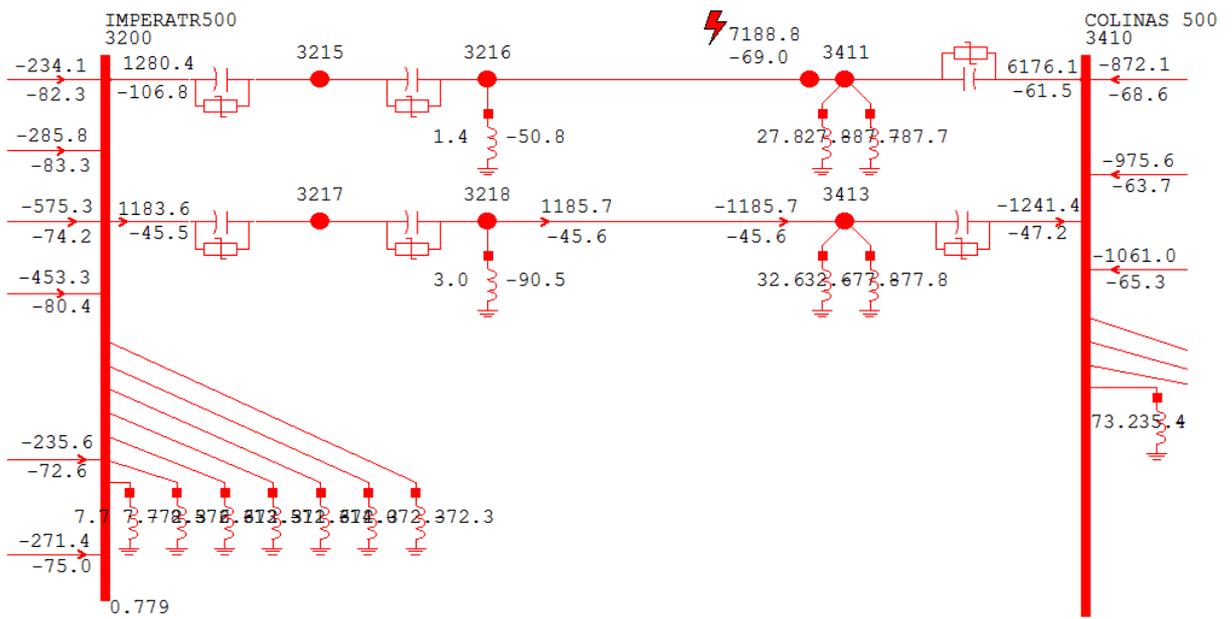


Figura 49: Resultado obtido para falta monofásica a 90% da LT Imperatriz-Colinas antes da implementação do disparo automático de *gap*

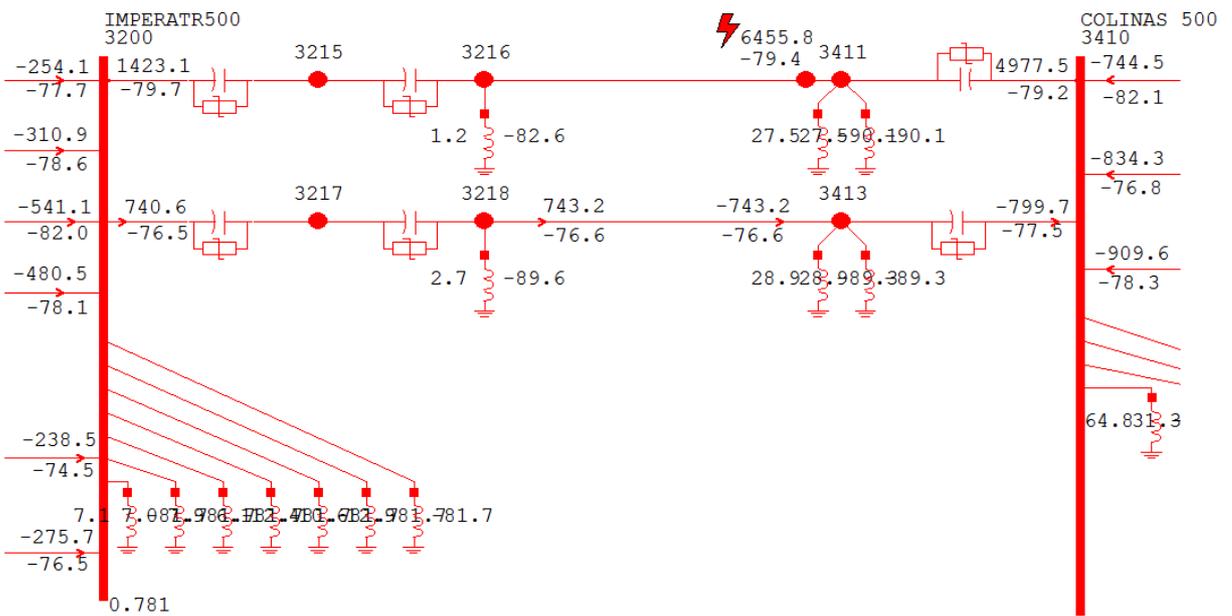


Figura 50: Resultado obtido para falta monofásica a 90% da LT Imperatriz-Colinas após a implementação do disparo automático de *gap*

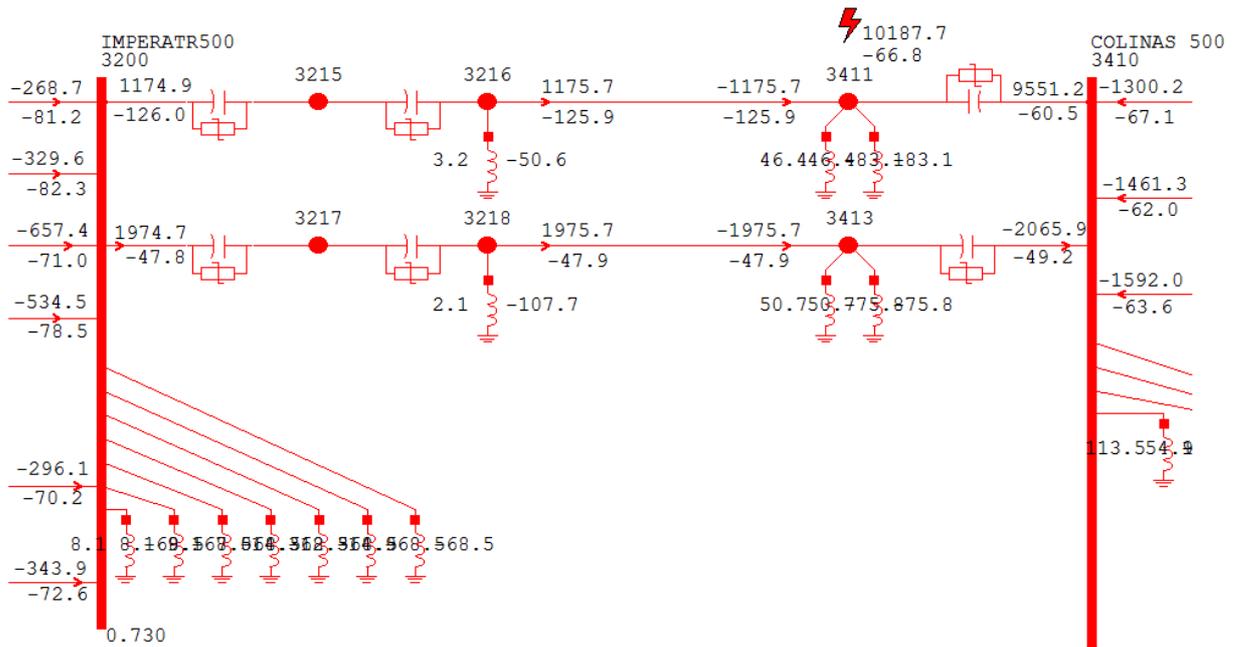
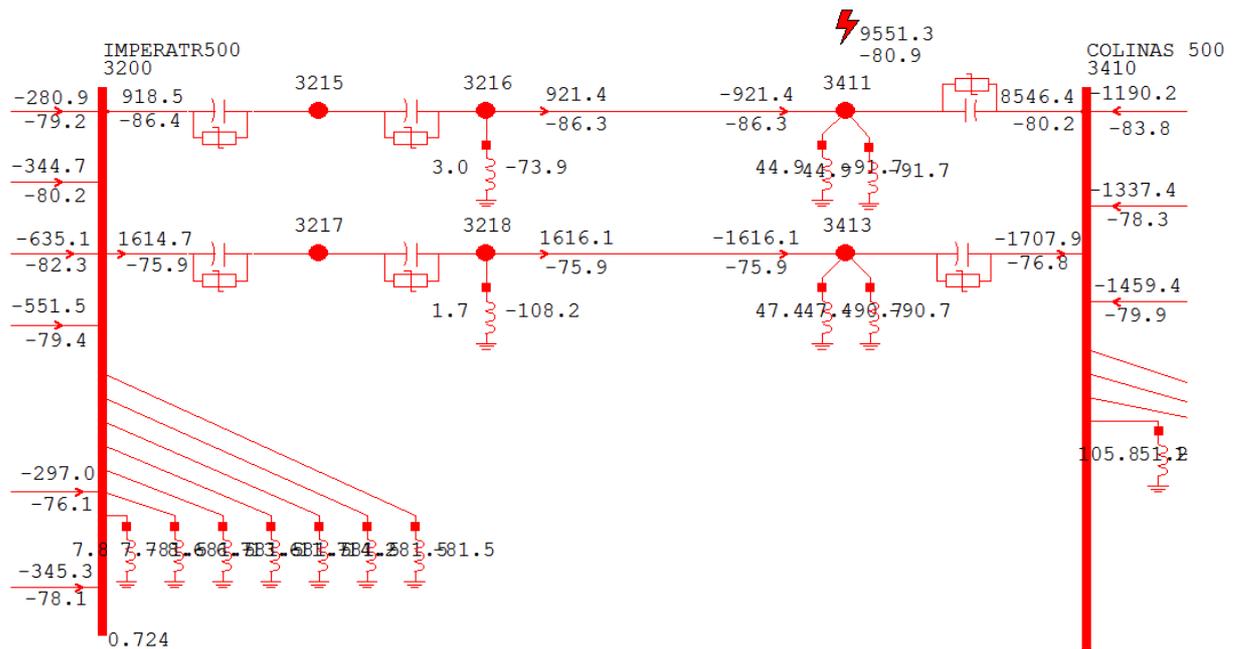


Figura 51: Resultado obtido para falta monofásica a 100% da LT Imperatriz-Colinas antes da implementação do disparo automático de *gap*



Utilizando-se novamente as denominações da Figura 32, a corrente que atravessa os capacitores (1) e (2), a corrente que atravessa o capacitor (3) e a corrente de curto são definidas como sendo I1, I2 e If, respectivamente. O sumário dos valores fasoriais destas correntes para as posições de aplicação de curto consideradas nas figuras anteriores pode ser visto na Tabela 7.

Posição na Linha	Correntes com MOVs e sem <i>gaps</i> (A)			Correntes com MOVs e com <i>gaps</i> (A)		
	I1	I2	If	I1	I2	If
0%	14058.7∠-51.4°	1682.4∠-119.7°	14803.7∠-57.5°	13503.9∠-84.5°	1015.3∠-87.8°	14563.5∠-84.7°
17%	6249∠-51.8°	1566.1∠-109.9°	7178.8∠-62.1	5559.6∠-70.1°	1351.2∠-88.3	6877.9∠-73.7°
90%	1280.4∠-106.8°	6176.1∠-61.5°	7188.8∠-69°	1423.1∠-79.7°	4977.5∠-79.2°	6455.8∠-79.4°
100%	1174.9∠-126°	9551.2∠-60.5°	10187.7∠-66.8°	918.5∠-86.4°	8546.4∠-80.2°	9551.3∠-80.9°

Tabela 7: Correntes nos capacitores e corrente de curto na linha com defeito para diversas posições de aplicação do curto

As reduções percentuais das amplitudes das correntes apresentadas na Tabela 7 podem ser vistas na Tabela 8.

Posição na Linha	Redução de Amplitude das Correntes (%)		
	I1	I2	If
0%	3.95	39.65	1.62
17%	11.03	13.72	4.19
90%	-11.15	19.41	10.20
100%	21.82	10.52	6.25

Tabela 8: Redução de amplitude das correntes da tabela 7 quando o disparo de gap é efetuado

Através das Tabelas 7 e 8, nota-se que, da mesma forma que no caso de curto trifásico, a consideração do disparo de *gap* leva a diferenças tanto em módulo quanto em fase nas correntes resultantes no sistema devido ao curto. Na maior parte dos casos, o fechamento de *gaps* leva as correntes a apresentarem ângulo mais indutivo, na faixa de 0° a -90°, o que é ocasionado pela redução da compensação série do sistema. Além disso, a maior parte das

correntes passa a ter módulo reduzido se comparado com o módulo obtido sem se considerar o disparo de *gap*.

IV.2.3 Alterações de Níveis de Curto-Circuito

Ainda em vista de se analisar as diferenças de resultados decorrentes da implementação do disparo automático de *gap* no programa, foram aplicados curtos trifásicos e monofásicos em barras da Interligação Norte-Sul. Através deste procedimento, é possível a verificação das alterações nas correntes de curto-circuito provocadas pela atuação dos *gaps* dos capacitores série que têm suas proteções representadas, quando comparadas com as correntes que surgem no sistema quando apenas a condução dos MOVs é levada em consideração.

As localizações das barras em que os curtos foram aplicados podem ser vistas na Figura 53, que representa o diagrama unifilar do trecho correspondente à Interligação Norte-Sul. Cabe ressaltar que apenas os elementos principais do sistema estão representados no diagrama.

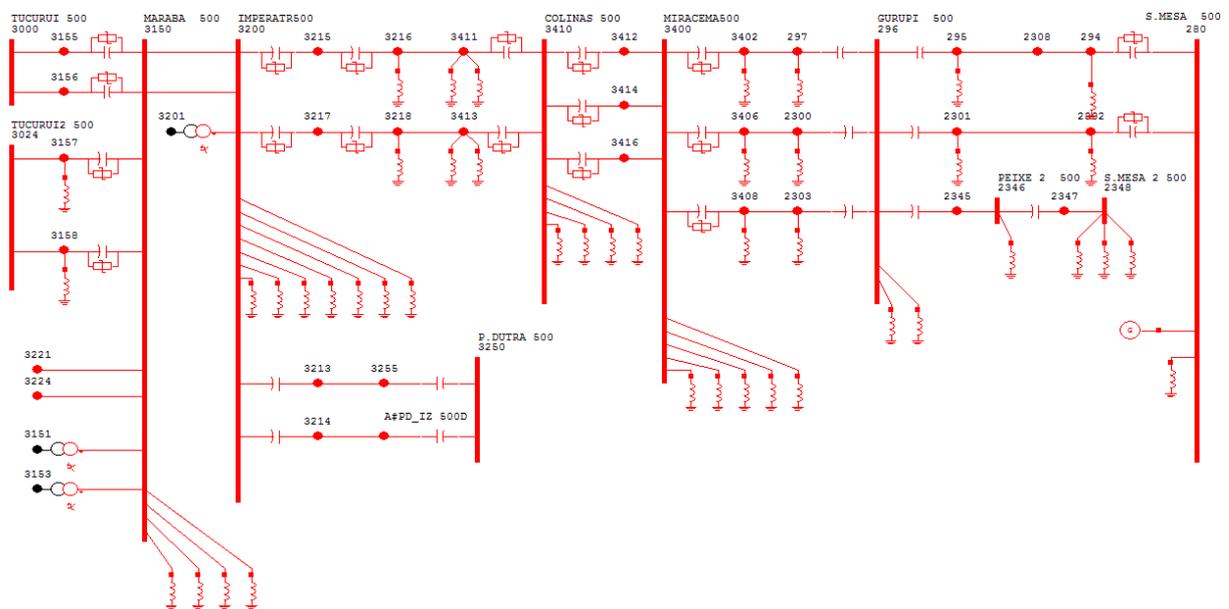


Figura 53: Diagrama unifilar representando a região em estudo

Os resultados obtidos foram retirados do programa e estão apresentados na Tabela 9. Os valores de níveis de curto assinalados são aqueles que sofreram variações quando considerado

o disparo de *gap*. Os níveis de curto monofásicos foram obtidos efetuando-se disparo de *gap* trifásico.

Barra onde o curto é aplicado	Correntes com MOVs e sem <i>gaps</i> (pu)		Correntes com MOVs e com <i>gaps</i> (pu)	
	3F	1F	3F	1F
3155	214	141	204	129
3156	213	140	203	129
3157	214	140	204	129
3158	214	139	204	129
3215	168	134	164	128
3216	155	128	159	126
3411	167	88	165	83
3217	168	134	164	128
3218	155	129	159	126
3413	167	89	165	83
3213	81	109	81	109
3255	141	227	141	227
3214	117	171	117	171
3256	294	557	294	557
3412	168	88	168	83
3414	168	88	168	83
3416	168	88	168	83
3402	162	111	161	107
297	265	265	381	279
3406	162	111	161	107
2300	265	261	381	268
3408	162	111	161	107
2303	265	258	380	261

295	623	224	1057	223
2308	146	115	139	107
294	178	180	172	172
2301	621	227	1080	225
2302	178	180	172	172
2345	331	132	306	132

Tabela 9: Variações nos níveis de curto de barras da Interligação Norte-Sul

Analisando-se a Tabela 9, percebe-se que os níveis de curto de grande parte das barras da Interligação Norte-Sul consideradas neste estudo sofrem variações consideráveis quando o disparo de *gap* é efetivado pelo programa, tanto para o caso de curto trifásico quanto para o caso de curto monofásico.

Nas linhas marcadas na Tabela 9, correspondentes aos níveis de curto obtidos para as barras 3216, 3218, 297, 2300, 2303, 295 e 2301, a tendência geral de redução das correntes de curto-circuito quando da ocorrência de disparo de *gap* em um sistema não ocorre. Nas barras 3216 e 3218, situadas nas linhas de transmissão que interligam a SE Imperatriz e a SE Colinas, o disparo de *gap* ocasiona um pequeno aumento no nível de curto trifásico. Nas barras 297, 2300 e 2303, situadas nas linhas de transmissão paralelas que interligam a SE Miracema e a SE Gurupi, esse aumento já é um pouco maior e ocorre tanto no nível de curto trifásico quanto no nível de curto monofásico. Nas barras 295 e 2301, situadas nas linhas de transmissão que interligam a SE Gurupi e a SE Serra da Mesa, o disparo de *gap* ocasiona aumento elevado do nível de curto trifásico, enquanto que o nível de curto monofásico apresenta comportamento normal.

A explicação para o comportamento não esperado dos níveis de curto das barras mencionadas no parágrafo anterior tem relação com o ângulo da impedância equivalente Z_{kk} de seqüência positiva. De fato, sendo este ângulo negativo, a eliminação da compensação série capacitiva provocada pelo disparo de *gap* leva à redução de Z_{kk} , provocando, desta forma, o aumento do nível de curto. Este caso é bastante incomum, visto que sistemas de alta tensão costumam ser predominantemente indutivos.

Os gráficos das figuras 54 e 55 mostram claramente as reduções percentuais dos níveis de curto das barras apresentadas na Tabela 9, considerando apenas as barras com modificações nesses níveis.

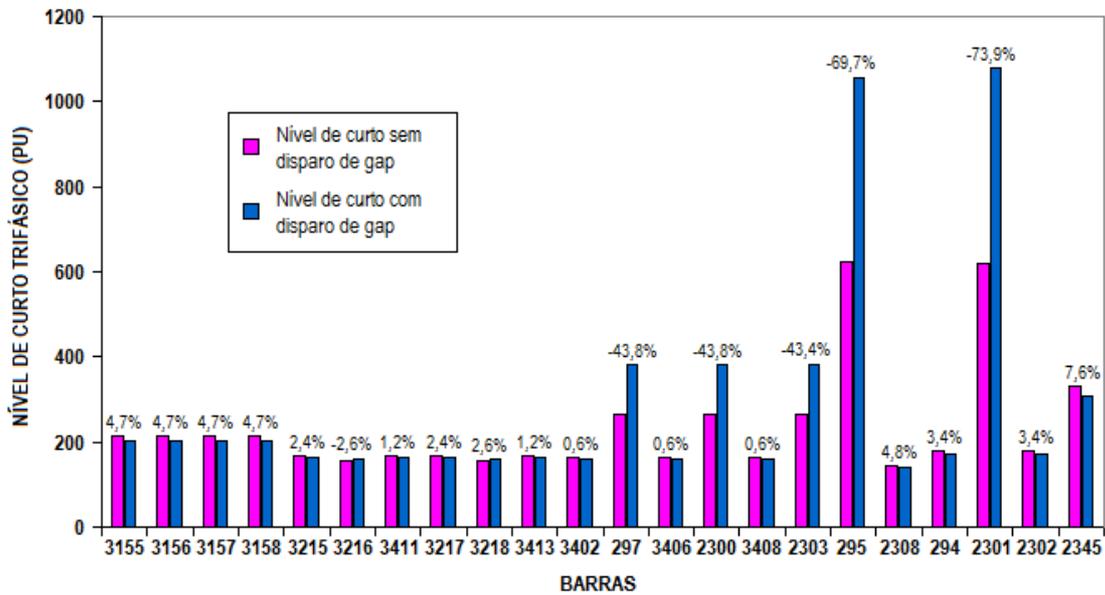


Figura 54: Reduções percentuais de níveis de curto trifásicos

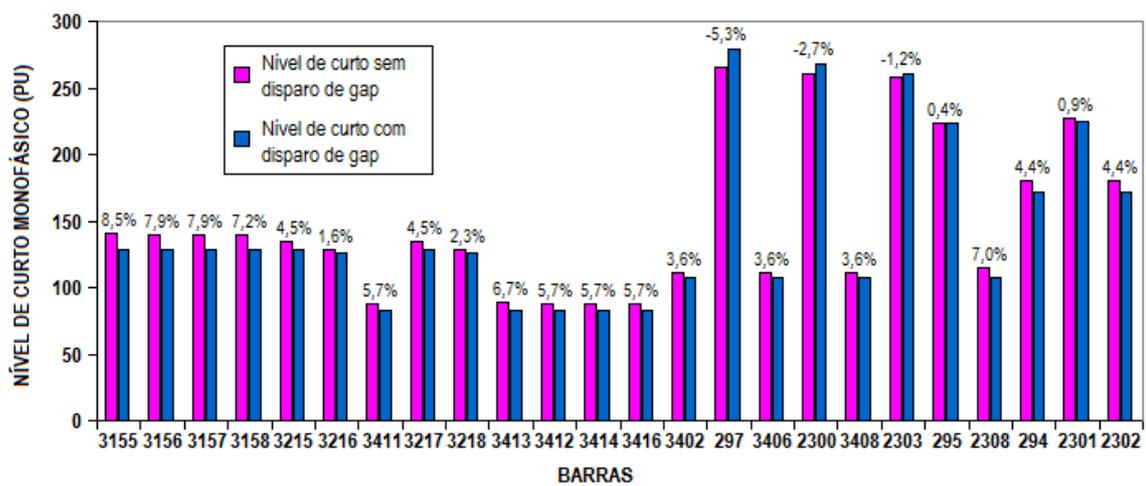


Figura 55: Reduções percentuais de níveis de curto monofásicos

Através das figuras 54 e 55, nota-se que a consideração do disparo de *gap* em uma análise de curto circuito ocasiona alterações percentuais consideráveis nos valores de níveis de curto em um sistema, o que demonstra a importância da implementação desse tipo de proteção em programas de análise de curto circuito.

IV.3 Sumário do Capítulo

Neste capítulo, foram apresentados resultados referentes à atuação dos diferentes tipos de proteção de capacitores série. Para tanto, foi realizado o estudo da Interligação Norte-Sul do Sistema Elétrico Brasileiro, devido ao fato de serem conhecidos dados reais das proteções de alguns dos capacitores instalados na mesma. Desta forma, foram aplicados curtos monofásicos e trifásicos ao longo de uma das linhas que interliga as Subestações Imperatriz e Colinas e foi possível a determinação de quais tipos de proteção atuariam, dependendo da localização da falta na linha. Foram ainda comparados os níveis de curto em barras da Interligação Norte-Sul, podendo-se analisar a diferença de resultados obtidos resultantes da implementação do disparo de *gap* no programa.

Capítulo V

Conclusões

A modelagem do disparo automático de *gap* apresenta funcionamento adequado e permite prever com maior precisão o comportamento real de um sistema de potência provido de capacitores série frente a curto-circuitos de qualquer tipo. Este fato é muito importante, pois o ideal é que se tenha a representação de equipamentos elétricos da forma mais próxima possível da realidade.

Análises que desconsideram a existência deste tipo de proteção podem fornecer resultados distantes da realidade em muitos pontos do sistema. Sem esta implementação, é difícil prever a ocorrência de fenômenos atípicos, como é o caso das faltas em que o disparo de *gaps* e a conseqüente redução das compensações série resulta na elevação da corrente de curto e das contribuições circulando pelo sistema, o que é contrário ao que seria usual.

Com a modificação da metodologia utilizada pelo ANAFAS, este tipo de consideração se torna mais simples, podendo-se analisar uma quantidade muito maior de contingências com um menor gasto de tempo e com a obtenção de resultados dentro de margens de erro aceitáveis. Sem esta modificação, o usuário do programa teria que tentar prever quais os capacitores que teriam disparo de *gap* e tentar obter resultados mais adequados fechando-os manualmente. No entanto, esta seria uma tarefa mais trabalhosa e só poderia ser feita nos casos de disparo de *gap* trifásico. A implementação realizada neste trabalho permite, desta forma, a automatização do disparo de *gap* e a possibilidade de escolha do tipo de fechamento a ser realizado (por fase ou trifásico).

Situações que não podiam ser representadas anteriormente de maneira automática, tais quais os casos de sistemas de potência com capacitores série providos apenas de *gaps* podem agora ser representadas, permitindo a obtenção de resultados mais fiéis à realidade.

O fato de a metodologia implementada ter caráter geral, com a realização do colapso de barras para cada fase de cada capacitor com necessidade de disparo de *gap*, permite uma maior liberdade para a simulação de ocorrências e simplifica os cálculos na medida em que dispensa o desacoplamento formal das redes de seqüência.

A checagem dos *gaps* apenas ao fim do processo de condução dos MOVs é a alternativa mais adequada e que produz resultados mais próximos da realidade.

A nova checagem da necessidade de disparo de *gap* mesmo após os disparos necessários já terem sido realizados realmente se faz necessária, visto que o disparo de *gaps* pode de fato levar a aumentos nas correntes passantes nos capacitores que podem vir a ocasionar o disparo de novos *gaps*. Desta forma, pode-se chegar a resultados imprecisos se esta nova checagem não for realizada.

Referências Bibliográficas

- [1] D. L. Goldsworthy, “A Linearized Model for MOV-Protected Series Capacitors,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 953-957, November 1987.
- [2] S. P. Roméro, J. I. P. Rossi e F. H. D. Oliveira, “Modelagem de Capacitor Série com Proteção MOV em Programas Modernos de Simulação de Curtos-Circuitos,” *IX SEPOPE*, Rio de Janeiro, Maio de 2004.
- [3] R. Grunbaum e J. Samuelsson, “Series Capacitors Facilitate Long Distance AC Power Transmission,” *Power Tech, 2005 IEEE Russia*, pp. 1-6, June 2005.
- [4] F. M. Resende, R. P. Dutt-Ross, J. M. Bressane e S. T. Ferreira, “Aplicação de Capacitores Série no Tronco 750 kV de Itaipu,” *VI SNPTEE* - 1981.
- [5] A. D’Ajuz, F. M. Resende, F. M. S. Carvalho, I. G. Nunes, J. A. Filho, L. E. N. Dias, M. P. Pereira, O. K. Filho e F. A. Morais, “Equipamentos Elétricos – Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão,” 1 ed. Rio de Janeiro, Furnas 1985.
- [6] R. C. de Lima Furnas e P. Lindberg, “Operational Experience of 800 kV Series Capacitors,” *Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005 IEEE*, pp. 399-402, 11-15 July 2005.
- [7] S. E. M. De Oliveira, I. Gardos e E. P. Fonseca, “Representation of Series Capacitors in Electric Power System Stability Studies,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 1119-1125, August 1991.
- [8] Bradwajn, W. F. Tinney, “Generalized Method of Fault Analysis”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, no. 6, pp. 1301-1306, June 1985.
- [9] F. L. Alvarado, S. K. Mong, M. K. Enns, “A Fault Program with Macros, Monitors and Direct Compensation in Mutual Groups”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-104, no. 5, pp. 1109-1120, May 1985.

[10] J. I. P. Rossi, “Modelagem de Proteção MOV em Capacitores Série em um Programa de Simulação de Falhas Simultâneas,” *Projeto Final, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.