Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL) Associação Ampla entre UFSJ e CEFET-MG





Emanuel Philipe Pereira Soares Ramos

PROTEÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE UTILIZANDO RELÉ DIFERENCIAL

Belo Horizonte 2014

Emanuel Philipe Pereira Soares Ramos

PROTEÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE UTILIZANDO RELÉ DIFERENCIAL

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre o CEFET-MG e a UFSJ, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos – SE. **Linha de Pesquisa:** Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos de Potência – POSEP.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira

Belo Horizonte 2014



Dissertação intitulada "PROTEÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE UTILIZANDO RELÉ DIFERENCIAL" de autoria do discente Emanuel Philipe Pereira Soares Ramos, aprovado pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

> Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira (Orientador) PPGEL/CEFET-MG

> > Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho DEE/UFMG.

> > > Prof. Dr. Rafael Silva Alípio PPGEL/CEFET-MG

> > > > Belo Horizonte 2014

DEDICATÓRIA

A Deus, nosso criador.

Aos meus pais, Sidney e Cláudia, por sempre acreditarem.

Aos meus avós, Laércio e Tereza, por terem me criado com todo carinho do mundo.

A minha amada Tia, Gabriela.

Ao Irmão (Caíke).

À minha esposa Laís, exemplo de paciência e carinho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida, alegria e disposição.

Agradeço ao prof. Eduardo Gonzaga por nossas conversas, principalmente aquelas de incentivo e amizade. Agradeço cada orientação e paciência ao longo do mestrado. Obrigado pelo respeito e carinho.

Agradeço aos professores do *PPGEL*, em especial a Professora Úrsula, a quem confiei as minhas angústias e ao Marcelo Stopa e Marcio Matias, pelo incentivo a continuidade dos estudos e vida profissional. Agradeço também ao pessoal da coordenação de eletrotécnica/Campus II, por serem tão receptivos nos cafés, em especial ao Wildemar, Beethoven e Joaquim. Agradeço aos amigos do Leacopi/CEFET-MG, pela convivência. Agradeço aos colegas do CEFET-MG, Curvelo, pelo carinho que me receberam. Isso tudo contribui para resultados positivos.

Agradeço aos colegas do CETEL-SENAI: Will, Vitor (Pedro), Jackson, Alexandre's, Rildo, Julio, Osmane, Gabriel, Rey, Marlon, Nilton, Devanir, Rosimar e todos os demais que de alguma forma contribuíram.

Agradeço a meus pais, Sidney e Claudia pelos ensinamentos que ao longo dos anos me tornam cada vez mais maduro.

A minha tia Gabriela e aos meus avôs Laércio e Tereza, a quem sempre terei dívidas sagradas.

Ao meu tão amado irmão Caíke Ramos, por existir e a Tânia Colina por ser tão próxima.

Agradeço a Celeste, Hebert e família pelo carinho.

Aos meus amigos Sérgio, Nem e Ricardo, simplesmente pela grande amizade.

Agradeço a minha esposa Laís, pelo amor, paciência, carinho, dedicação, incentivo, simplicidade, respeito, convívio....

"O essencial é invisível para os olhos."

Antoine de Saint-Exupéry

PROTEÇÃO DE LINHA DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE UTILIZANDO RELÉ DIFERENCIAL

EMANUEL PHILIPE PEREIRA SOARES RAMOS

RESUMO

A crescente demanda de energia elétrica faz com que a necessidade de investimentos no setor seja cada vez maior, pois a eletricidade é fundamentalmente importante para o desenvolvimento social e econômico do mundo. A proteção de linhas de transmissão é necessária para a integridade física e operacional dos sistemas de energia, porém incorporam-se cada vez mais ao sistema elétrico elementos compensadores de reativos com a finalidade de aumentar a estabilidade e a capacidade de transmissão da linha, tornando-se, assim, indispensável compreender a interação entre os relés de proteção e esses novos componentes inseridos. Neste âmbito, estudos relacionados à proteção de sistemas de transmissão são necessários, pois em alguns casos a atuação dos relés pode ser comprometida pela inserção destes novos componentes. A evolução dos algoritmos de detecção de falhas e proteção é notória, mas ainda não se tem uma forma de proteção altamente confiável devido aos fenômenos envolvidos. Esta dissertação se baseia no estudo dos relés de distância e diferencial aplicados às linhas de transmissão, onde se investigou os impactos pertinentes para o caso do uso de compensação série. As simulações para avaliar o comportamento dos algoritmos perante os diferentes tipos de faltas foram realizadas no software de transitórios eletromagnéticos ATP (Alternative Transient Program). Os algoritmos de proteção foram desenvolvidos através do software Matlab, onde foram testados para os dados de linhas de transmissão não compensada e configurações típicas com inserção de capacitores em série. Os resultados mostram a influência da compensação série para os diversos tipos de faltas no desempenho dos relés.

Palavras Chave: Relé Diferencial, Linha de Transmissão, Proteção de Sistemas Elétricos, Compensação Série.

TRANSMISSION LINE PROTECTION WITH COMPENSATION SERIES USING DIFFERENTIAL RELAY

EMANUEL PHILIPE PEREIRA SOARES RAMOS

ABSTRACT

The growing demand for eletricity makes the increase for investments in this sector, for the reason that eletricity is fundamental for the social and economic development of the world. The protection of transmission lines is required for physical and operational integrity of power systems, but it is commom to incorporate into the electrical system the reactive compensating elements, in order to increase the stability and capacity of the transmission line, being essential to understand the interaction between the protective relays and these new components inserted. In this context, studies related to the protection of transmission system are necessary, considering in some cases the actions of relays can be compromised by the inclusion of these new components. The evolution of fault detection algorithms and protection is easily seen, but still does not have a form of highly reliable protection due to the phenomena involved. This thesis is based on the study of differential and distance relays applied to transmission lines, where was investigated the relevant effects to the case of series compensation use. The simulations to evaluate the performance of the algorithms against different types of faults were carried out in the software of electromagnetic transient Alternative Transients Programs (ATP). The protection algorithms were developed using the MATLAB software, which were tested for the data of uncompensated transmission lines and typical configurations with series capacitor insertion. The results show the influence of series compensation for the various types of faults in the performance of the relays.

Keywords: Differential Relay, Transmission Line, Electrical System Protection, Compensation Series.

SUMÁRIO

Agra	ecimentos	V
ResumoVII		
Abst	ct	<i>v</i> III
Lista	e Fiauras	IX
Lista	e Tahelas	XVI
Lista	a Abraviaturas a Símbalas	
LISLU		۸۷1
1		
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivos	20
	L.1. Objetivos gerais	
		20
1.3	Metodologia	20
1.4	Estrutura do texto	21
2	VISÃO BIBLIOGRÁFICA	
3	ΝΗΔΥ ΠΕ ΤΡΔΝΥΜΙΥΥΑ̈́Ο ΓΟΜΡΕΝΥΔΠΔΥ	28
2 2 1	Vantagans a Desuantagans da componsasão sório de linha	20
5.1		
3.2	Efeitos da compensação série na operação do sistema	
	2.1. Efeitos positivos	33
3.3	Componentes da compensação serie	
	3.2 Centelhadores	
	3 Varistores	42
	3.4. Disjuntor	
	3.5. Circuito de amortecimento	43
	3.6. Reator e tiristores do CSCT	43
2/	Tinos construtivos do hancos do canasitoros	10
5.4	Tipos construtivos de balicos de capacitores	
	1.2 Proteção com varistores	
-		
4	INDAMENTOS DOS RELES DE PROTEÇÃO	
4.1.	onsiderações iniciais	48
4.2.	pos construtivos de relés de proteção	49
	2.1. Relés eletromecânicos	
	2.2. Relés eletrônicos	50
	2.3. Relés digitais	51
4.3.	Inções de proteção de linhas de transmissão	52
-	3.1. Relé de distância	
	4.3.1.1. Ajustes de relé de distância aplicado à proteção de linha compensada	
	3.2. Relé diferencial	59
	4.3.2.1. Planos de representação e lógica de atuação do relé diferencial	62

-	PROCES	SAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA	
	5.1. Pro	cessamento da falta	69
	5.1.1. [Detecção da falta	
	5.1.2. (Classificação dos tipos de falta	69
	5.2. Pro	cessamento de sinais	70
	5.2.1. F	iltros passa-baixa	70
	5.2.2.	axa de amostragem	70
	5.2.3. '	Sample and hold" e multiplexadores	71
	5.2.4. (Conversores A/D	71
	5.2.5. F	iltro para estimação de fasores	71
	5.2.5.1	. Algoritmo de Fourier	72
	5.2.5.2	. Resposta de frequência dos filtros	73
	5.3. Im	elementação do algoritmo diferencial de proteção	74
6	DECULT		70
υ	RESULT		
U	6.1. Res	ultados das simulações do sistema sem compensação série	
U	6.1.1. F	ultados das simulações do sistema sem compensação série altas monofásicas	
U	6.1.1. F	ultados das simulações do sistema sem compensação série altas monofásicas altas trifásicas	
U	6.1.1 Res 6.1.1. F 6.1.2. F 6.2. Res	ultados das simulações do sistema sem compensação série altas monofásicas altas trifásicas ultados das simulações com compensação série	
U	6.1. Res 6.1.1. F 6.1.2. F 6.2. Res 6.2.1. F	ultados das simulações do sistema sem compensação série altas monofásicas altas trifásicas ultados das simulações com compensação série altas monofásicas sem o dispositivo MOV	
U	6.1.1. Res 6.1.1. F 6.1.2. F 6.2. Res 6.2.1. F 6.2.1. F	ultados das simulações do sistema sem compensação série altas monofásicas altas trifásicas ultados das simulações com compensação série altas monofásicas sem o dispositivo MOV altas trifásicas sem o dispositivo MOV	
U	6.1. Res 6.1.1. F 6.1.2. F 6.2.1. F 6.2.1. F 6.2.1. F 6.2.2. F	ultados das simulações do sistema sem compensação série altas monofásicas altas trifásicas ultados das simulações com compensação série altas monofásicas sem o dispositivo MOV altas trifásicas sem o dispositivo MOV altas trifásicas sem o dispositivo MOV	81 81 90 95
U	6.1. Res 6.1.1. F 6.1.2. F 6.2.1. F 6.2.1. F 6.2.2. F 6.2.3. F	altas monofásicas sem o dispositivo MOV. Faltas trifásicas com a presença do MOV e SparkGap. Faltas trifásicas com a presença do MOV e SparkGap.	81 81 90 95 95 103 108 115
7	6.1.1. Res 6.1.1. F 6.1.2. F 6.2.1. F 6.2.1. F 6.2.2. F 6.2.3. F 6.2.3. F	ADOS OBTIDOS. altados das simulações do sistema sem compensação série faltas monofásicas altas trifásicas altados das simulações com compensação série altas monofásicas sem o dispositivo MOV faltas trifásicas sem o dispositivo MOV faltas trifásicas com a presença do MOV e SparkGap faltas trifásicas com a presença do MOV e SparkGap faltas trifásicas com a presença do MOV e SparkGap	81 81 90 95 95 103 108 115 133
78	6.1. Res 6.1.1. F 6.1.2. F 6.2.1. F 6.2.1. F 6.2.1. F 6.2.2. F 6.2.3. F CONCLU REFERÊ	ADOS OBTIDOS ultados das simulações do sistema sem compensação série Faltas monofásicas Faltas trifásicas ultados das simulações com compensação série Galtas monofásicas sem o dispositivo MOV Faltas trifásicas sem o dispositivo MOV Faltas monofásicas sem o dispositivo MOV Faltas trifásicas com a presença do MOV e SparkGap Faltas trifásicas com a presença do MOV e Spark Gap VSÕES NCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de um sistema com três linhas com compensação série	30
Figura 2 – Fluxo da barra 1 para a barra 2	31
Figura 3 – Fluxo da barra 1 para a barra 2, considerando a inserção do capacitor série	33
Figura 4 – Sistema de transmissão compensado em paralelo	34
Figura 5 – Oscilação de potência, reinserção lenta do capacitor	35
Figura 6 – Oscilação de potência, reinserção rápida do capacitor	36
Figura 7 – Corrente em uma linha de transmissão com a compensação série em uma situação normal	38
Figura 8 – Corrente em uma linha de transmissão com a compensação série em situação de inversão de	
corrente	38
Figura 9 – Corrente em uma linha de transmissão com a compensação série sem a inversão de tensão	39
Figura 10 – Corrente em uma linha de transmissão com a compensação série com a inversão de tensão	39
Figura 11 – Ligação dos componentes de um segmento do banco capacitor, com proteção através de varisto	or.41
Figura 12 – Configuração do capacitor série, utilizando como proteção o centelhador simples	44
Figura 13 – Configuração do capacitor série, utilizando como proteção o centelhador duplo	45
Figura 14 – Configuração do capacitor série, utilizando como proteção o varistor	46
Figura 15 – Configuração controlada por tiristores	47
Figura 16 – Evolução dos relés, desde os relés eletromecânicos até os dias atuais	48
Figura 17 – Relé do tipo disco inducão [32]	49
Figura 18 – Relé eletrônico ou estático [34]	50
Figura 19 – Relé Diaital [35]	51
Fiaura 20 – Características operacionais relé de impedância (a). relé MHO (b). relé de reatância (c)	54
Figura 21 – Característica operacional – curva auadrilateral	54
Figura 22 – Zonas de proteção dos relés de distância.	
Figura 22 – Digarama fasorial das tensões de polarização cruzada	
Figura 22 – Comparação da região de operação do relé mho com curva convencional e o mho com polarizad	าลึก
de memória	59
Figura 25 – Esquema funcional do relé de proteção diferencial	60 60
Figura 26 – Eluxo de corrente na falta interna e externa	60
Figura 27 – Figure de correcte na jara interna e externa international com a hohina de restrição	61
Figura 28 – Curva caraterística diferencial, análise do nlano cartesiano	62
Figura 29 – Regiões características de atuação do plano alfa	
Figura 30 – Zonas de restrição inseridas dentro do círculo do plano alfa, para diferentes valores de K	
Figura 30 – Conas de restrição inseriodo demero do encaro do plano dija, para diferences valores de Rimmini Figura 31 – Característica do plano alfa com características melhoradas, proposto para proteção diferencia	04 I 65
Figura 32 – Tolerância a erros de comunicação	66
Figura 32 – Tolerância nara outfeed	00 66
Figura 34 – Estrutura do relé digital	60
Figura 35 – Resposta em frequência dos filtros Seno. Cosseno e Fourier de 1 ciclo	00
Figura 26 – Eluvograma do algoritmo do protoção diferencial	75
Figura 30 – Flaxogranna do algoritmo de proteção algerencia	75 76
Figura 29 – Resultado da filtragom do single utilizando um filtro passa baixa do Puttorworth	70
Figura 30 – Resultado da Jilitageni do Sindi, alinzando uni jilito passa-baixa de Ballerworth	// 70
Figura 33 – Futumetros da linha de transmissão simulada	70
Figura 40 - Geometria da inflita de 545 KV	ور مە
Figura 41 – Diagrama do Sistema com compensação de transformador de corrente	00
Figura 42 – Curva curacterística de saturação de transformador de corrente	נס רס
Figura 43 – Tensoes trifácicas nas saldas dos TPS, após a falta monofácica, sem a componsação sório	20
Figura 44 – Correntes trijasicas nas salaas aos rCs, apos a jana monojasica, sem a compensação serie	82
Figure 45 – Corrente de Operação (d) e corrente de restrição (d), sem a compensação serie	82
rigura 40 — irajetoria da impedancia de jaita, para jaita monojasica a 5% da barra 1 e resistência de faita r	านเน,
Serii u cumpensuçuu serie	83
Figura 47 — Kele alferencial loperação x irestrição pará fálta trifásica a 5% da barra 1, $K_f = 0 \Omega$ sem a	
Compensação Serie.	84 . ≈ -
Figura 48 — Kele alferencial no plano alfa para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensaç	:ao
Serie.	84
riguru 49 — correntes trijasicas nas salaas aos 1Cs, apos a jaita monojasica, $R_f = 0.02$, sem a compensação s	erie.
	85

Figura 50 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 5% da barra 1 e R_f = 30 Ω , sem a compensação série
Figura 51 – Corrente de operação e corrente de restrição para falta monofásica a 5% da harra 1 R ₂ = 30.0 sem
r_{ij} a compansação sário
Eigura E2 – Rolé diferencial longração y troctrição para falta monofácica a EV do barra 1 R – 20 O com a
riguru 52 - kele ujerenciu ioperuçu x restriçu puru julu monojusicu u 5% uo buru 1, kf - 50 Ω, sem u
Cumpensação Serie.
Figura 53 – Rele algerencial loperação x irestrição para jalta monojasica a 95% da barra 1, $R_f = 0.0$, sem a
compensação serie
Figura 54 — Rele diferencial loperação x irestrição para faita monofásica a 95% da barra 1, R_f = 30 Ω, sem a
compensação serie
Figura 55 — Trajetória da impedância de falta monofásica na barra 1 e resistência de falta nula, sem a
compensação série
Figura 56 – Corrente de operação e corrente de restrição para uma falta monofásica na barra 1, $R_f = 0 \Omega$, sem a
compensação série
Figura 57 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica na barra 1, $R_{ m f}$ = 0 Ω, sem a
compensação série
Figura 58 – Comparadores de fase para indicar atuação do relé diferencial em caso de falta interna, sem a
compensação série
Figura 59 – Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após falta trifásica, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série 90
Figura 60 – Tensões trifásicas nas saídas dos TPs, após a falta trifásica, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série90
Figura 61 – Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após a falta trifásica, R_f = 30 Ω , sem a compensação série. 91
Figura 62 – Trajetória da impedância de falta, para falta trifásica a 5% da barra 1, $R_f=0 \Omega$, sem a compensação
série
Fiaura 63 – Relé diferencial no plano alfa modificado para falta trifásica a 5% da barra 1. R _f = 0 Ω, sem a
compensação série
Figura 64 – Relé diferencial loneração x Irestrição nara falta trifásica a 5% da harra 1 R_{f} = 30 O sem a
compensação série
Figura 65 – Relé diferencial no nlano alfa modificado nara falta trifásica a 95% da harra 1 R = 0.0 sem a
compensação série
Eigura 66 - Polé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifácica a 05% da barra 1 . P. = 20.0, com a
$rigura 00 - kele algerencia no plano alga modificado, para fara fara (1) asica a 95% da barra 1, k_f = 50 12, seni a$
Comparadar da faca da ralá diferencial para falta trifácias a OEM da barra 1. D. = 20.0
Figura 67 – Comparador de Jase do felte algerencial para felte trifácios na harra 2. $B = 0.0$ com a componencia
Figura 68 – Trajetoria da impedancia de jaita, para jaita trijasica na barra 2, $R_f = 0.02$, sem a compensação
serie
Figura 69 – Rele alferencial no plano alfa moalficado para falta trifasica na barra 2, $R_f = 0.02$, sem a
compensação serie
Figura 70 – Relé diferencial loperação x Irestrição para falta trifásica na barra 2, R_f = 30 Ω , sem a compensação
série
Figura 71 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores
instalados no início da linha, grau de compensação de 50%96
Figura 72 – Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após a falta monofásica 5% da barra 1, $R_{ m f}$ = 0 Ω, com
capacitores instalados no início da linha e grau de compensação de 50%
Figura 73 – Corrente de operação e corrente de restrição para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com
capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%97
Figura 74 – Relé diferencial loperação x Irestrição para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_{ m f}$ = 0 Ω, com
capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%97
Figura 75 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 5% da barra 1, R_f = 0 Ω , com
capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%
Figura 76 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 4 km da barra 1, R_{f} = 0 Ω , com
capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%
Figura 77 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 4 km da barra 1. R_f = 30 Ω , com
capacitores instalados no início da linha, arau de compensação de 50%
Figura 78 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 50% da barra 1. $R_r = 0 \Omega$. com
capacitores instalados no início da linha, arau de compensação de 50%
Figura 79 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 50% da barra 1 $R_{c}=0.0$ com
capacitores instalados no início da linha, arau de compensacão de 50%
, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,

-igura 80 – Trajetoria da impedancia de falta, para falta monofasica a 40 km da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com
capacitores instalados no inicio da linha, grau de compensação de 50%
-igura 81 – Reie diferencial no plano difa, para faita monofasica a 40 km da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores
nstalados no inicio da linna, grau de compensação de 50%
-igura 82 – Trajetoria da impedancia de faita, para faita monofasica a 76 km da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com
capacitores instalados no inicio da linha, grau de compensação de 50%
Figura 83 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 76 km da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com
capacitores instalados no inicio da linha, grau de compensação de 50%
-igura 84 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 76 km da barra 1, R_f = 30 Ω, com
capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%
-igura 85 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica na barra 2, $R_{ m f}$ = 0 Ω, com
capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%
igura 86 – Comparação entre as correntes originais e as correntes estimadas do TC 1, com capacitores
nstalados no início da linha, grau de compensação de 50%103
-igura 87 – Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após a falta monofásica a 5% da barra 1, $R_{ m f}$ = 0 Ω, com
apacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%
Figura 88 – Tensões trifásicas nas saídas dos TPs, após a falta monofásica a 5% da barra 1, $R_{ m f}$ = 0 Ω, com
apacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%
Figura 89 – Trajetória da impedância de falta, para falta a 4 km da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados
no início da linha, grau de compensação de 50%104
igura 90 – Relé diferencial loperação x Irestrição para falta monofásica a 5% da barra 1,
- Figura 91 – Relé diferencial loperação x Irestrição para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_{ m f}$ = 30 Ω, com
apacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%
Figura 92 – Trajetória da impedância de falta, para falta trifásica a 40 km da barra 1. $R_f = 0 \Omega$, com capacitores
nstalados no início da linha, arau de compensação de 50%
Figura 93 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta monofásica a 50% da barra 1. R₂= 0.0. com
ranacitores instalados no início da linha, arau de compensação de 50%
Figura 94 – Trajetória da impedância de falta, para falta trifásica a 40 km da harra 1. R₅ = 30.0, com canacitores
nstalados no início da linha, arau de compensação de 50%.
Figura 95 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para uma falta trifásica a 50% da harra 1, R _c = 30,0, com
igura 55 " Rele algerencia no plano alga modificado, para uma jana injusica a 50% da barra 1, $N_j = 50.52$, com
Eigura 96 – Relé diferencial no plano alfa, para falta trifásica a 95% da barra 1, $R_{\rm c}$ = 0,0, com capacitores
rigura 90 – Nele algerencial no plano alga, para jana injusica a 95% da barra 1, $N_f = 0.02$, com capacitores
Ligura 07 – Palá diferencial no plano alfa modificado, para falta trifácica a 05% da harra 1, P = 20,0, com
r_{f} - 50 Ω_{f} - 50 Ω_{f} compared to a second compared for a single second s
upucitores instalados no inicio da initia, grad de compensação de 50%
-igura 98 – Rele algerencial no plano alga modificado, para janta trijasica na barra 2, $R_f = 0.02$, com capacitores
nstalados no micio da linna, grau de compensação de 50%
-igura 99 – Trajetoria da Impedancia de faita, para faita monofásica a 5% de distancia da barra 1, $R_f = 0.02$,
com capacitores instalados no inicio da linna, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV 109
-igura 100 – Rele diferencial no plano alfa modificado, para faita monofasica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com
capacitores instalados no inicio da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV
-igura 101 – Comportamento de tensao, corrente e energia no MOV, perante a uma falta a 5% de distancia da
parra 1
-igura 102 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 50% de distância da barra 1, R_f = 0 Ω,
com capacitores no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV
-igura 103 — Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 50% da barra 1, R_f = 0 Ω, com
capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV
Figura 104 – Comportamento de tensão, corrente e energia no MOV, perante a uma falta a 50% de distância da
parra 1
Figura 105 — Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 95% de distância da barra 1, R_f = 0 Ω,
com capacitores no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV
igura 106 – Comportamento de tensão, corrente e energia no MOV, perante a uma falta a 95% de distância da
parra 1
-igura 107 — Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica na barra1, R_{f} = 0 Ω, com capacitores
nstalados no início da linha, grau de compensação de 50%112
- Figura 108 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica na barra 2, R_f = 0 Ω, com capacitores
nstalados no início da linha, grau de compensação de 50%113

Figura 109 – Relé diferencial loperação x Irestrição para falta monofásica externa, $R_f = 0\Omega$, com capacitores Figura 110 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 5% da barra 1, R_f = 30 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.114 Figura 111 – Relé diferencial no plano alfa modificado, falta monofásica a 95% da barra 1, R_{f} = 30 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50% prevendo entrada do MOV.114 Figura 112 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica na barra 2, R_f = 30 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%......114 Figura 113 – Relé diferencial loperação x Irestrição para falta trifásica a 5% da barra 1, $R_{
m f}$ = 0 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.115 Figura 114 – Relé diferencial loperação x Irestrição para falta trifásica a 5% da barra 2, R_i = 30 Ω, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.115 Figura 115 – Trajetória da impedância de falta, para falta trifásica a 95% de distância da barra 1, $R_{\rm f}$ = 0 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.116 Figura 116 – Trajetória da impedância de falta, para uma falta trifásica 95% de distância da barra 1, R_f = 30 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV...... 116 Figura 117 – Corrente de polarização para uma falta trifásica à 76 km de distância da barra 1, R_f = 0 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.117 Figura 118 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica a 95% da barra 1, R_{f} = 0 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.117 Figura 119 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica a 95% da barra 1, R_f = 30 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.118 Figura 120 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica na barra 2, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 121 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica na barra 2, R_f = 30 Ω , com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%......119 Figura 122 – Relé de distância, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 123 – Relé diferencial, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 124 – Relé de distância, para falta monofásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 125 – Relé diferencial, para falta monofásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 126 – Relé de distância, para falta trifásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados na metade da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV......121 Figura 127 – Relé diferencial, para falta trifásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0\Omega$, com capacitores Figura 128- Relé de distância, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 129 – Relé diferencial, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 130 – Relé de distância, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 131 – Relé diferencial, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 132 – Comparador de fases, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha e arau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV......124 Figura 133 – Relé de distância, para falta monofásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 134 – Relé diferencial, para falta monofásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 135 – Relé de distância, para falta trifásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0\Omega$, com capacitores Figura 136 – Relé diferencial, para falta trifásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores

Figura 137 – Comparador de fases, para uma falta trifásica a 20% de distância da barra 1, R_f = 0 Ω , com Figura 138 – Relé de distância, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores Figura 139 – Relé diferencial plano alfa modificado, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, $R_{\rm f}$ = 0 Ω , com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV...... 128 Figura 140 – Correntes trifásicas na saída dos TCs, com saturação do TC 2, após a falta monofásica a 80% da Figura 141 – Relé diferencial plano alfa, falta trifásica a 80% de distância da barra 1, com saturação do TC 2, R_f Figura 142 – Relé diferencial plano alfa modificado, falta trifásica a 80% de distância da barra 1, com saturação Figura 143 – Relé diferencial plano alfa modificado, para falta trifásica a barra 1, com saturação do TC 1, $R_f = 0$ Ω , com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%......130 Figura 144 – Relé diferencial plano alfa modificado, para falta trifásica a barra 2, com saturação do TC 1, $R_{\rm f}$ = 0 Ω , com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%......130 Figura 145 – Correntes trifásicas na saída dos Tcs, com saturação do TC 1 e TC 2, falta monofásica a 80% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha e com grau de compensação de 50%......131 Figura 146 – Relé diferencial plano alfa modificado, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, com

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Ocorrências de faltas no SEP em um sistema de 500 kV, em um período de 10 anos [1]	18
Tabela 2 – Possíveis faltas associadas à linha de transmissão	52
Tabela 3 – Equações de impedância aparente	53
Tabela 4 – Unidades operacionais de falta com polarização cruzada	58
Tabela 5 – Dados do sistema simulado com a compensação série	80
Tabela 6 – Resumo de atuações dos relés para faltas sem a compensação	132
Tabela 7 – Resumo de atuações dos relés para faltas com a compensação	132

Lista de abreviaturas

IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ATP	Alternative Transient Program
EMTP	Electromagnetic Transient Program
SEP	Sistema elétrico de potência
SIN	Sistema Nacional Interligado
DFT	Discrete Fourier Transformer
FACTS	Flexible AC Transmission System
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SVC	Static Var Compensator
IEC	International Electrotechnical Commission
СЅСТ	
MOV	Metal Oxide Varistor
ТС	Transformador de Corrente
ΤР	Transformador de Potencial

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência (SEP) é composto pelos sistema de geração, transmissão e distribuição. No Brasil, destacam-se linhas de transmissão em corrente alternada em um sistema nacional interligado (SIN) em crescente expansão.

Os equipamentos envolvidos nestas complexas estruturas estão expostos a eventuais falhas de funcionamento. Entretanto, devido à extensão e exposição ao tempo, uma atenção diferenciada deve ser dedicada ao sistema de transmissão, pois são neles notificados os maiores números de faltas, o que pode afetar a qualidade dos serviços prestados. Dentre as origens das interrupções, tem-se a Tabela 1 que mostra o número de faltas para cada setor do sistema elétrico. Nota-se que cerca 83% das faltas envolvem as linhas de transmissão [1].

Setor do sistema elétrico	Número de Faltas
Linhas de Transmissão	82
Circuitos disjuntores	4
Autotransformadores	6
Barramentos	1
Geradores	1
Falha humana	5

Tabela 1 - Ocorrências de faltas no SEP em um sistema de 500 kV, em um período de 10 anos [1].

Devido à importância da eletricidade, deseja-se que os sistemas de transmissão, geração e distribuição de energia elétrica sejam eficientes para atender o aumento de demanda e robustos perante as eventuais falhas. Em contrapartida, sistemas elétricos de potência são estruturas complexas e apresentam elevados custos de implementação e manutenção, além de estarem expostos ao tempo, o que os torna susceptíveis a interferências ligadas a operação e a fatores externos.

Nesse contexto, estudos relacionados à melhor proteção destes sistemas se tornam indispensáveis, e comumente são aplicados relés com este intuito. O IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) define o relé de proteção como tendo a função de detectar trechos ou equipamentos defeituosos ou condições anormais, de natureza perigosa, em sistemas de potência, e que seja capaz de iniciar uma ação de controle apropriada [2].

Um sistema de proteção geralmente atua isolando um trecho do circuito ou um equipamento exposto a uma condição de operação crítica, caracterizada por sobrecorrente, sobretensão, queda de tensão e outros [3]. Afirma-se, ainda, que o relé é um dos equipamentos mais importantes e uma devida atenção a este componente deve ser dada, pois estes dispositivos monitoram continuamente parâmetros do sistema elétrico, tais como tensão, corrente, frequência e potência e, baseando-se nestes parâmetros, o relé deve tomar decisões se um dado circuito ou equipamento deve ser retirado de operação. Assim, o relé deverá ser capaz de distinguir uma operação normal de uma operação anormal para que uma decisão não seja errônea.

Outro fator relevante é que a cada dia novos elementos são incorporados ao sistema elétrico, como compensadores em linhas de transmissão, tornando-se indispensável compreender a interação entre os relés de proteção e esses elementos. Com a evolução das técnicas de detecção de falhas e proteção de sistemas, estudos devem ser realizados, devido a eventuais dificuldades de detecção de defeitos.

Esta dissertação faz a análise de um algoritmo de um relé de proteção diferencial aplicado a linhas de transmissão, comparando-o com o de um relé de distância convencional, de forma a investigar a interação destes com os demais componentes envolvidos no sistema, em especial capacitores série.

1.1. Motivação

A proteção numérica é um assunto atualmente pesquisado por universidades e fabricantes. A eficiência dos relés para conter problemas relacionados a linhas de transmissão devido à inserção de novos elementos, especificamente compensação série, deve ser avaliada.

É possível, através de uma pesquisa científica, buscar melhorias em algoritmos propostos na literatura, para que se encontrem novas formas de proteger sistemas de energia perante aos elementos de compensação inseridos e averiguar qual relé é mais confiável para proteção dessas configurações de linha.

1.2. Objetivos

1.1.1. Objetivos gerais

O objetivo desta dissertação é apontar alguns fatores que afetam o desempenho do relé de distância e investigar a eficiência do relé diferencial aplicado às linhas de transmissão compensadas, na ocorrência de faltas.

Neste trabalho, aplica-se o relé diferencial para proteção de linhas compensadas, averiguando os principais aspectos positivos para a aplicação em linhas de transmissão, visto que atualmente os problemas relacionados à comunicação entre estes relés estão praticamente superados.

Para realizar a pesquisa e dar suporte aos resultados, um sistema de potência trifásico, baseado em uma linha convencional, foi modelado com o auxílio do *software Alternative Transients Programs* (ATP) e os algoritmos de proteção implementados no *software* MATLAB.

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica dos artigos técnicos que tratam do assunto.
- Propor um sistema elétrico de potência, baseado em linhas convencionais, que será utilizado para obtenção de resultados.
- Avaliar o equacionamento matemático, as condições de teste e os resultados obtidos de modo a eleger as técnicas que apresentem maior viabilidade de serem aplicadas em condições reais de operação.
- Implementar os algoritmos de relé de distância e de relé diferencial com o objetivo de compará-los, apontando vantagens e desvantagens de sua utilização na proteção de linhas transmissão.

1.3. Metodologia

O trabalho é iniciado com uma pesquisa bibliográfica onde foi feito um levantamento dos algoritmos a serem aplicados em situações práticas e que apresentaram os melhores resultados. Nesta fase, o desempenho do algoritmo diferencial frente a linhas de transmissão compensadas foi analisado para comparar e verificar sua eficiência, baseando-se no esforço computacional e a precisão dos resultados.

Para testar os algoritmos de detecção de faltas, foi gerado um banco de dados, a partir do ATP. Além dos modelos dos componentes básicos disponíveis no programa como: fontes, elementos lineares e chaves, o ponto mais importante nesta etapa foi verificar a capacidade de atuação do relé em linhas compensadas. Entretanto, primeiramente foram implementadas linhas sem a compensação, sendo aos poucos incrementadas mediante a inserção de compensação série, para representar adequadamente as condições reais de curto-circuito [4] [5] [6] [7] [8].

Logo em seguida, de forma a verificar a eficiência dos métodos e realizar os estudos e observações necessárias, foram implementadas através do *software* Matlab todas as rotinas para tratamento dos dados, leitura dos arquivos gerados no ATP, filtragem digital, interpolação e as técnicas de detecção. Como o objetivo desta dissertação é a comparação do algoritmo numérico diferencial com o de relé de distância mho, ambos foram implementados e posteriormente validados.

Para validação dos resultados, uma última etapa foi necessária para testar o algoritmo mencionado, em situações tais como:

- Curtos-circuitos monofásicos e trifásicos em vários pontos da linha;
- Curto-circuito em linhas sem e com a compensação série;
- Variação da capacidade de curto-circuito das fontes;
- Variação da resistência de falta;

1.4. Estrutura do texto

A dissertação proposta tem como foco a análise do algoritmo de relé diferencial aplicado à linha de transmissão diante da compensação série, sendo feitas comparações com o relé de distância, averiguando as principais vantagens de se utilizar o relé diferencial, conceitos básicos de compensação de linha de transmissão de energia e os impactos causados no sistema devido a essa compensação foram inseridos na pesquisa e mencionados na dissertação.

No capítulo 2, uma revisão bibliográfica é realizada, trazendo na ordem cronológica os principais artigos relacionados à proteção de sistemas, artigos esses de grande importância para o desenvolvimento dos algoritmos e interpretação dos resultados coletados. Nesta bibliografia, também estão presentes temas de proteção numérica e linhas de transmissão compensadas. No capítulo 3, são realizados estudos baseados na compensação série de linhas de transmissão. Este capítulo traz o capacitor série e suas características construtivas, o fluxo do sistema compensado em falta, as formas de proteção do capacitor série, as características do sistema compensado e as vantagens e desvantagens da compensação série.

O capítulo 4 descreve a evolução dos relés até os dias atuais, expondo de forma mais detalhada uma teoria sobre os relés microprocessados. São mencionadas as filosofias de proteção dos relés numéricos de distância e diferencial, assim como as características operacionais de tais relés. Uma interessante ressalva é feita neste capítulo quanto aos fatores que influenciam o relé de distância convencional com curva mho na proteção de linhas de transmissão. São realizadas simulações computacionais utilizando o algoritmo numérico do relé de distância, ressaltando as situações que dificultam a operação deste relé.

O capítulo 5 é dedicado ao processamento dos dados de entrada como a forma de detecção das faltas, classificação, cálculo dos parâmetros envolvidos, indicação das taxas de amostragem e filtro passa-baixa. São descritos também os principais algoritmos de filtros presentes na literatura, tais como: algoritmos baseados no Método dos Mínimos Quadrados e algoritmos baseados na análise de Fourier. Nesse capítulo, também são retratados os princípios fundamentais para implementação do algoritmo do relé numérico diferencial. Além disso, os conceitos do algoritmo de proteção diferencial são discutidos, expondo a teoria para que seja desenvolvido. Os aspectos técnicos relevantes são descritos; apresenta-se a forma de análise de resultados do relé numérico diferencial nos planos cartesiano, alfa e alfa modificado e procede-se à validação do algoritmo desenvolvido.

O capítulo 6, por sua vez, apresenta o sistema elétrico de potência simulado, com os parâmetros relacionados à linha, sem a presença do capacitor série e com sua presença. São feitos comentários acerca dos testes e simulações realizadas e são expostos os resultados obtidos através das simulações, assim como as devidas discussões. Nesse capítulo, é possível observar o comportamento do relé diferencial para proteção de linha de transmissão compensada.

Finalmente, no capítulo 7, a conclusão dos resultados e dos estudos é apresentada, assim como a sugestão para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros relatos de relés numéricos se deram ao final da década de 60, porém se popularizaram entre meados da década de 80 e 90, inclusive com aspectos ligados às componentes simétricas do sistema. Em 1971, uma relevante contribuição foi sugerida por MAN, B. J. e MORRISON, J. F. [9], que descrevem um algoritmo de ajuste de curva baseado em diferenciação. O algoritmo proposto pelos autores, apesar de eficiente para sinais puramente senoidais, não se comportava bem para sinais sob a influência de componente contínua, o que dificultava a utilização do mesmo em alguns casos envolvendo este modelo de sinal.

Em seguida, em 1972, tem-se uma proposta idealizada por GILCHRIST, G. B. *et al* [10]. Baseando-se nos mesmos princípios propostos por MAN, B. J. e MORRISON, J. F. apresentaram um algoritmo de ajuste de curva. Entretanto, devido a uma segunda derivada incrementada ao método, é diagnosticada uma melhoria significativa quanto à presença de componentes contínuas no sinal. Esse trabalho resultou, inclusive, na implementação física em um relé numérico denominado de PRODAR 70.

Em 1977, PHADKE, A.G. *et al* [11] publicaram um trabalho que utilizava o conceito de componentes simétricas para proteger o sistema elétrico. O algoritmo desenvolvido pelo autor simplificava as várias equações existentes na época para calcular as faltas, em uma única equação. Segundo os autores, consegue-se, através desta única equação, calcular as dez possíveis faltas existentes no sistema: três faltas fase-fase, três tipos de falta fase-terra, três tipos de falta fase-fase-terra e a falta trifásica, gerando com isso uma grande simplificação computacional.

Posteriormente, em 1979, SACHDEV, M. S. e BARIBEAU, M. A. [12] formularam uma boa solução para um problema do algoritmo PRODAR 70, que era o fato de este não se comportar bem mediante as componentes harmônicas envolvidas no sinal. Os autores sugerem nesta pesquisa a utilização de um algoritmo baseado na técnica de ajuste por mínimos quadrados, considerando os sinais de entrada formados por uma exponencial decrescente e um conjunto de ondas

senoidais. Este algoritmo trazia a solução dos problemas mencionados anteriormente.

Em 1988, BOZOKI, B. *et al.* [13] relataram as tendências de projetos relacionados com proteção de linhas dos Estados Unidos e Canadá. Neste artigo, os autores explicam os tipos de linhas de transmissão destas localidades, os níveis de tensões, o número de linhas de transmissões e quais os sistemas fracos e fortes da região. Os autores descrevem as principais faltas existentes, detalham também os tipos de proteções aplicadas, assim como os sistemas de comunicações entre relés existentes na época, e mencionam a utilização do relé de distância e a facilidade de se proteger linhas de menores extensões quando comparadas com linhas de grandes extensões.

Em 1990, BHATTI, A. A. [14] avalia o desempenho dos microcomputadores baseados na proteção diferencial. O trabalho avalia os efeitos das faltas no sistema e evidencia, já na década de 90, a diminuição dos preços dos microcomputadores e o aumento da utilização de tecnologias com variáveis microprocessadas. O autor afirma que, na ocorrência de uma falta primária, há uma grande contribuição da corrente capacitiva da fase defeituosa para a fase saudável, o que tende ao disparo acidental dos componentes de proteção. O artigo relata brevemente formas para sanar este problema e mostra as vantagens da utilização da proteção diferencial proposta, mas ressaltam a complexidade de se parametrizar as correntes de atuação do relé. Para aumentar a precisão do algoritmo, os autores utilizaram o conceito das constantes ABCD da linha de transmissão obtidas através da combinação das matrizes de parâmetros dos vários componentes do sistema, incluindo reatores e capacitores série para as linhas compensadas.

Em 1998, PEREIRA, C. e CRUZ, F. C. [15] descrevem uma abordagem de quatro filtros envolvendo algoritmos baseados em um caso particular dos Erros Mínimos Quadrados. Neste trabalho, são descritas a implementação dos filtros Seno, Cosseno, Fourier Clássico e o Filtro Híbrido, que são aplicados a um relé numérico de proteção de distância. Através dos resultados, os autores comprovam a eficiência dos algoritmos baseados na transformada discreta de Fourier.

Já no âmbito da proteção diferencial, no ano de 2000, NGUYEN, T. T. [16] compara a dinâmica de resposta da proteção diferencial. O autor relata que a técnica tem sido implementada com base em comparações de sinais de avarias e dos sinais

parametrizados no relé de proteção, porém reconhece a necessidade de alta largura de banda no canal de comunicação e alta precisão no casamento do tempo dos sinais de avarias e sinais recebidos de terminais remotos da linha de transmissão. Para tornar este requisito menos impactante, uma nova forma de comparação de proteção diferencial digital foi utilizada, um método baseado em comparações de carga. Neste novo modelo, segundo o autor, consegue-se uma prévia de sinais recebidos; logo, o atraso é minimizado. Conforme descrito no artigo, o método baseado na comparação de cargas possui vantagens em relação aos métodos tradicionais devido ao fato de minimizar a excessiva demora no tempo de atuação da proteção e a não utilização da Transformada Discreta de Fourier (DFT).

Em 2001, ITO, H. *et al.* [17] começam a se preocupar com a velocidade de operação dos relés desenvolvidos com a função 87L, propondo soluções para a melhoria do tempo de atuação de relés baseados neste tipo de proteção. Os autores evidenciam as vantagens do relé diferencial quanto à alta seletividade, à boa aplicação em sistemas fracos e à melhor operação diante de componentes de frequência alta e contínua no sistema, além de destacarem que o conceito utilizado promove a frequência de chaveamento na entrada a 2400 Hz para um circuito de 50 Hz, reduzindo o erro de *aliasing*, atingindo uma operação de alta velocidade.

Em 2003, COURY, D. V. e NAVARRO, E. C. [18] apresentam um algoritmo diferencial aplicado à proteção de linhas de transmissão compensadas, em que é desenvolvido um algoritmo de proteção diferencial retratado no plano cartesiano e, posteriormente, submetido a diferentes tipos de falta. No mesmo ano, os autores investigam a análise da proteção diferencial utilizando o plano α [19]. Neste artigo, é explicado o conceito da proteção diferencial, a qual, segundo os autores, contorna os erros intrínsecos e impostos ao sistema elétrico. A proteção diferencial é implementada sob diversas modalidades, sendo o relé diferencial percentual uma solução para problemas relacionados com a utilização desta proteção e, conforme o artigo, este relé é o meio termo entre o relé de sobrecorrente ligado como diferencial e o relé de alta impedância além de possuir a vantagem de ser implementável em qualquer tecnologia: eletromecânica, estática ou numérica.

Nesse trabalho, os autores destacam que a proteção diferencial supera em muito a proteção de distância no que diz respeito à acomodação de resistência de falta, tornando-se inclusive atrativa em linhas de transmissão aéreas dotadas de religamento automático monopolar. Ressalta-se também que, como toda proteção unitária, a função diferencial não provê proteção de retaguarda remota para faltas nos componentes adjacentes. Nessa pesquisa, uma contextualização do plan**a** é mostrada, apresentando-se resultados de simulações realizadas. Destaca-se a grande tendência da utilização de fibras óticas como meio de comunicação entre subestações, avaliando que com a tecnologia existente a integração da função 87L é permitida, e que a utilização desta proteção será crescente no Brasil. Assim como trabalhos anteriores, o artigo apresentado mostra a importância da compensação dos pequenos atrasos impostos pelo sistema de comunicação e cita que uma especial atenção deve ser dada para assimetria entre os canais, pois ambos os fatores causam efeitos na detecção de faltas.

DUTRA, R. A. *et al.* [20] propõem um trabalho no qual são sugeridas soluções para proteção em linhas compensadas. Ressaltam a importância da compensação da linha de transmissão, no entanto, acentuam que do ponto de vista de proteção, estas compensações podem trazer diversos problemas. Nesse trabalho, os autores debatem estes principais problemas além de propor soluções de proteção para sistemas compensados.

Os mesmos autores em [21], avaliam um algoritmo para proteção de linhas compensadas. Neste artigo, apresentado ao IEEE, advertem em relação aos cuidados que se deve tomar para aplicar esse tipo de proteção, tais como a saturação dos transformadores de corrente e a falsa operação dos relés de proteção diferencial. O algoritmo implementado utiliza como análise o plano alfa, e é utilizado o filtro discreto de Fourier de um ciclo, preferido, segundo os autores, para análises deste modelo de proteção. O algoritmo é simulado e testado em um sistema de 440 kV.

Posteriormente, em 2008, um relé integrado para proteção diferencial de linhas de transmissão é apresentado por REN, Y. L., *et al.* [22]. Afirmando as vantagens de se integrar vários tipos de proteção em um único componente e que, devido ao crescimento de tecnologias ligadas à proteção, esta conduta está cada vez mais confiável. As simulações desenvolvidas comprovam a eficiência do relé integrado mediante as avarias no sistema.

No ano de 2010, é descrita por DAMBHARE, S. *et al.* [23] a utilização de funções de janela no algoritmo. Os autores afirmam que o algoritmo proposto se

baseia no "janelamento" do sinal e pode ser aplicado para proteção de linhas de transmissão compensadas com bastante eficiência. O algoritmo traz uma visão diferente dos algoritmos utilizados atualmente, que se baseiam em fasores do sistema. Os autores se justificam devido ao fato de que os atuais programas de transientes não trabalham com fasores de alta frequência, fasores esses ocorridos no primeiro momento da falta. Logo, os autores afirmam que o método de janela colabora para esta restrição.

Posteriormente, em 2011, BEJMERT, D. *et al.* [24] aplica o que delimitam como um avançado algoritmo de proteção diferencial. No texto, os autores aplicam a proteção para *"Tapped transmission line"*, justificando que, quando se tem esta configuração de linha, em alguns momentos a atuação do relé diferencial pode ser ineficaz ou demorada. Um dos motivos que contribuem para que esses relés não sejam eficazes, segundo os autores, pode ser a contribuição da corrente de *"In rush"*, provocada pela energização de transformadores. O algoritmo descrito é comparado com a proteção clássica existente usando o ATP-EMTP, mostrando-se confiável e seguro.

Em trabalho recente, apresentado em 2012, YUAN, Z. e ZHANG, C. [25] citam os conceitos de ondas viajantes na proteção diferencial e confirmam através dos resultados de simulações desenvolvidas, que o algoritmo, além de possuir velocidade, é confiável. O algoritmo explora o valor de pico destas ondas e busca reduzir a quantidade de tráfego no canal de comunicação.

3 LINHAS DE TRANSMISSÃO COMPENSADAS

Um grande desafio na área de energia elétrica é a capacidade de transmissão da linha. Existem diversas técnicas para aumentar a capacidade de transmissão de uma linha. Uma solução é elevar a tensão nominal, entretanto esta alternativa torna-se limitada devido a princípios construtivos dos equipamentos envolvidos. Outra maneira de solucionar o problema é a construção de novas linhas em paralelo, o que necessita de altos investimentos financeiros e elevados impactos ambientais. Uma alternativa interessante neste cenário é a compensação da linha, anulando parcialmente os valores de indutância e/ou capacitância. Essa compensação auxilia na diminuição da impedância característica da linha, aumentando a capacidade de transmissão.

Para linhas de transmissão, os parâmetros série (resistência e reatância indutiva) são responsáveis por parte das quedas de tensões envolvidas no sistema. A aplicação da compensação série torna-se econômica quando aplicada em linhas de transmissão longas, entretanto, quando necessário é aconselhada em linhas curtas.

Atualmente, vem se tornando comum a aplicação de elementos em série às linhas de transmissão com o intuito de compensar a reatância indutiva da própria linha de transmissão. Para isso, são utilizados capacitores em série providos de sistemas de proteção ou compensação através de FACT's (*Flexible AC Transmission System*) baseados em elementos de eletrônica de potência.

No Brasil, as primeiras linhas operando com a compensação série se deram em 1989, no sistema de 765 kV, projetado para transmissão da energia da usina de Itaipu. A utilização de capacitores série difundiu-se na década de 90 com crescentes aplicações em linhas de 500 kV. Atualmente, o sistema elétrico de potência possui 64 destes capacitores instalados, sendo a maioria deles no sistema de 500 kV (44 instalações). A compensação série vem sofrendo inúmeros avanços tecnológicos, sendo a bibliografia sobre capacitores série reforçada no decorrer dos anos [4].

3.1. Vantagens e Desvantagens da compensação série de linha.

A inserção de capacitores série em pontos estratégicos do sistema resulta na diminuição das reatâncias série envolvidas na linha de transmissão e, consequentemente, minimizam a distância elétrica. A instalação de capacitores série proporciona [4]:

- Aumento da capacidade de transmissão de potência da linha;
- Aumento da estabilidade do sistema;
- Menor queda de tensão ao longo da linha;
- Redução das perdas globais do sistema;
- Economia de custos quando comparados a alternativas técnicas possíveis.

Em contrapartida, a utilização destes capacitores série com o intuito de compensar o sistema torna-se um desafio para a proteção, principalmente para o relé de distância, que é altamente dependente da impedância da linha de transmissão. Os principais problemas que a inserção dos capacitores em série introduz ao relé são [6] [26]:

- Variação no alcance para o relé de distância;
- Inversão de corrente;
- Inversão de tensão;
- Frequências sub-harmônicas.

As vantagens citadas acima são mais relevantes que as desvantagens mencionadas, pois contribuem para evitar as construções de novas linhas de transmissão, visto que ocorre o aumento da capacidade transportada e até mesmo a diminuição de perdas globais.

A instalação de compensação série no sistema geralmente apresenta custos mais baixos do que os de construção de novas linhas, além de serem mais rapidamente implementadas e com menores impactos ambientais, pois a área de ocupação é muito menor. Todos esses fatores agregados contribuíram para que a compensação série de linhas se tornasse atualmente um recurso técnico altamente recomendado e comumente utilizado pelas empresas dos setores de transmissão,

geralmente associados a linhas de transmissão de longa distância, nas quais a característica indutiva é ainda maior.

Com a inserção do capacitor, é comum o aparecimento de correntes de curto-circuito elevada, que é função da reatância do capacitor, grau de compensação e características da rede. Em consequência desta alta corrente, as sobretensões nos capacitores exigiriam isolamentos inviáveis [4]. Logo, justifica-se a preocupação com a proteção por razões econômicas de projeto das unidades capacitivas e dos equipamentos do sistema elétrico no geral. O exemplo a seguir ilustra a importância da proteção do banco de capacitor série.

Dado o sistema da Figura 1, de três linhas com parâmetros idênticos e compensadas em 50%, exposto a uma falta trifásica no ponto F, e considerando a reatância equivalente do sistema muito grande com relação às demais, a corrente seria dada pela Equação 1.



Figura 1 - Exemplo de um sistema com três linhas com compensação série.



Observa-se que:

- Caso =0,33 , a corrente de curto-circuito é infinita.
- Como a tensão no capacitor é a integral da corrente dividida pela capacitância, sendo os valores de correntes elevadas, haveria valores altíssimos de sobretensões, inviabilizando economicamente o projeto de isoladores e, consequentemente, o projeto do capacitor série.

Para que as instalações de capacitores série se tornassem viáveis, sistemas de proteção para o desvio de corrente são necessários. Até os anos 80 esquemas com centelhadores eram comumente utilizados, porém foram substituídos na década de 90 por varistores a óxido metálico (MOV).

A aplicação de capacitores série ainda é restrita e não obrigatória, proporcionando diferentes concepções de projetos e números reduzidos e limitados de pequenos fabricantes dessa tecnologia. Assim, não existe um consenso quanto à padronização de bancos de capacitores e as normas vigentes ainda não contemplam a instalação completa dos bancos e equipamentos associados a ela.

Atualmente, a norma existente que trata do tema é a Norma ABNT: NBR 8763 "Capacitores série para sistemas de potência", sendo sua última versão de julho de 1998, que se baseia na IEC 143:1992. Vale novamente ressaltar que essas normas não abrangem muitos padrões, mas apresentam definições importantes quanto à especificação e aos ensaios.

3.2. Efeitos da compensação série na operação do sistema

O comportamento do sistema compensado merece mais atenção em relação aos efeitos causados no sistema. Em uma linha de transmissão, um dos principais problemas associados é a determinação de sua capacidade máxima de transmissão de potência ativa [27] [28]. Para se chegar às equações necessárias de fluxo de potência, a Figura 2 foi utilizada.



Figura 2 – Fluxo da barra 1 para a barra 2

A potência aparente da fonte 1 é dada por , a tensão e ângulo representados respectivamente por e . Analogamente, tem-se na fonte 2 a potência aparente , e tensão e ângulo e . Considerando os dados acima, as equações básicas (2) e (3), respectivamente potência ativa e reativa, fornecem estimativas razoáveis do comportamento da linha de transmissão, considerando a linha sem perdas.

(2)

_____(3)

Onde:

potência ativa transmitida da barra B1 para a barra B2 ; = potência
 reativa transmitida da barra B1 para a barra B2; = tensões nas barras 1 e 2;
 reatância indutiva da linha de transmissão; = diferença entre o
 ângulo da barra B1 e da barra B2

Observa-se pelas equações que a potência ativa transmitida por uma linha de transmissão é diretamente proporcional às tensões dos extremos e ao seno do ângulo de carga da mesma e inversamente proporcional à reatância da linha de transmissão. Assim, quanto maior esta reatância indutiva menor será a capacidade de transmissão da linha.

O grau de compensação da linha está relacionado ao valor do capacitor utilizado. Para se calcular o grau de compensação (GC) da linha, utiliza-se a relação entre a reatância capacitiva da compensação série e a reatância indutiva da linha demonstrada pela Equação (4) [5].

— (4)

Onde:

grau de compensação da linha em porcentagem;
 reatância
 indutiva da linha de transmissão;
 reatância capacitiva inserida na linha de transmissão.

O valor de compensação está definido tipicamente entre 25 a 70% da indutância da linha de transmissão que se deseja compensar [5]. Outros estudos

descrevem que o grau de compensação varia de 25 a 75% [7]. Ambos apontam que o grau de compensação inferior a 25% é economicamente inviável.

3.2.1. Efeitos positivos

A utilização da compensação série visa reduzir a reatância indutiva da linha, possibilitando uma maior capacidade de transmissão devido à subtração da parte reativa capacitiva no sistema. A Figura 3 demonstra a nova configuração com presença do capacitor série.



Figura 3 – Fluxo da barra 1 para a barra 2, considerando a inserção do capacitor série.

A presença da capacitância série promove as seguintes mudanças nas equações de potência ativa e reativa:

Pela equação (5) e (6), para melhorar a potência ativa transmitida em uma linha de transmissão, são possíveis três estratégias:

- Aumento das tensões nos terminais V₁ e V₂.
- Aumento do ângulo até 90°.
- Redução da reatância indutiva característica da linha.

Sabe-se que os dois primeiros argumentos são dificultados por inviabilidade técnica. O aumento da tensão V₁ e V₂ proporciona o aumento de P₁₂, o que seria possível através da compensação derivada, limitada em apenas 5% da tensão nominal do sistema em cada terminal. Logo, a elevação de tensão obtida seria de apenas 10%.

À medida que se eleva até 90°, ocorre aumento significativo de P_{12} . No entanto, na ocorrência de um defeito no sistema, para uma dada potência transmitida, quanto menor for esse ângulo mais estável será esse sistema para o período "pós-defeito".

Restando a terceira opção, observa-se que com a presença do capacitor a reatância resultante é menor, acarretando um aumento de capacidade de transmissão da linha, ressaltando-se que a potência reativa também é diminuída, melhorando a estabilidade da linha em questão.

Em relação à estabilidade, um exemplo pode ser mencionado. A Figura 4 retrata uma máquina ligada ao sistema de barra infinita através de duas linhas com compensação série [4].



Figura 4 – Sistema de transmissão compensado em paralelo

A variação de potência elétrica com o ângulo de carga é vista na Figura 5. Na ocorrência de uma falta na barra B3 da figura 4 e considerando a não atuação dos reguladores de tensão e velocidade, quatro importantes estágios são relatados no comportamento do sistema.



Figura 5 - Oscilação de potência, reinserção lenta do capacitor

No estágio 1, o sistema está carregado e com condições normais de operação. Na ocorrência do defeito na barra B3, surgem elevadas correntes de falta e, para que ocorra a proteção do capacitor da linha, o mesmo é curto-circuitado, sendo que isso também poderá ocorrer com o capacitor da linha 2. Para essa primeira consideração, supõe-se a não existência de proteção MOV, ficando os capacitores protegidos apenas com a proteção de centelhadores.

Com a presença da falta, a reatância de transferência da linha é aumentada e, consequentemente, a potência ativa transmitida é consideravelmente reduzida. Quanto mais severo o problema, menor será a potência transmitida. O estágio 2 demonstra o comportamento da linha em curto logo após o disparo do gap do capacitor deixando a barra B2 e B3 em um mesmo potencial, anulando com isso a amplitude da tensão da barra B2. Portanto, a transferência de potência entre as barras B1 e B2 é inexistente.

O estágio 3 caracteriza a eliminação do defeito com a abertura da linha defeituosa. Nota-se que com apenas uma linha em funcionamento a potência transmitida cai consideravelmente se comparada com as condições normais de operação. Isso é ainda mais relevante quando ocorre o disparo do centelhador da linha em paralelo.

Com a reinserção dos capacitores no sistema, tem-se a situação mostrada no estágio 4. Observa-se que a potência transmitida é maior se comparada com o estágio 3 embora ainda seja menor se comparada com as condições normais. Em condições normais, o sistema possui a potência elétrica do gerador constante e igual à potência mecânica no eixo da turbina. Quando é caracterizado o defeito e a potência elétrica se encontra no estágio 2, abaixo do referencial de potência mecânica, a máquina tende a acelerar aumentando o ângulo δ . Após a limpeza da falta, a potência elétrica torna-se maior que a potência mecânica e ocorre o efeito de frenagem da máquina. A área A1 indica a situação durante o período de falta, quando a máquina estava sujeita a acelerar. Na área A2, a máquina ainda está acelerando, porém, após a eliminação da falta. A área A3 indica uma situação de frenagem, mas sem a inserção dos capacitores. Após a inserção, a situação passa a ser caracterizada pela área 4. Na situação em que o somatório das áreas A3 e A4 for maior que o somatório das áreas A1 e A2, pode-se dizer que o sistema é estável, caso contrário o sistema é dito instável.

A Figura 6 ilustra mais uma vez as curvas de potência versus abertura angular, porém, nesta situação demonstrada, a reinserção dos capacitores no sistema ocorre de forma instantânea. Leva-se agora em consideração que o sistema é provido de proteção MOV. Observa-se que o sistema é muito mais estável que no caso anterior, indicando maior transferência de potência.



Figura 6 – Oscilação de potência, reinserção rápida do capacitor.

Uma consideração importante é que, caso ambos os capacitores sejam munidos de MOV e centelhador, uma falta na barra C continuaria disparando o centelhador do capacitor da linha em curto. Entretanto, possivelmente o centelhador da linha em paralelo não seria sensibilizado e a condução ocorreria através do MOV. Nesse caso, quando ocorresse a abertura da linha em curto, o capacitor da linha em
paralelo seria instantaneamente reinserido. Em tal situação, consideram-se os estágios 3 e 4 da figura 6 como sendo um único estágio [29].

3.2.2. Efeitos negativos

Frequência de Ressonância (Subsíncrona)

Quando a linha é munida de compensação série, é introduzido ao sistema, devido à interação entre a reatância capacitiva em série e a reatância indutiva da linha, um circuito ressonante série, cuja frequência de ressonância é dada pela Equação (7):

Onde:

frequência de ressonância;
 frequência fundamental;
 reatância
 indutiva da linha de transmissão;
 reatância capacitiva inserida na linha de transmissão;
 reatância Thevenin dos geradores envolvidos.

Em geral, o valor da frequência de ressonância, também denominada subsíncrona, é menor que o valor da frequência de transmissão, variando entre 25 e 30 Hz. As frequências subsíncronas não são eliminadas no processo de estimação fasorial, pois, a priori, não são conhecidas em virtude da variação do grau de compensação das linhas [8].

Inversão de corrente em condições de falta

A inversão de corrente ocorre quando a reatância capacitiva é maior que o somatório da reatância da fonte e da linha de transmissão .

Não ocorre inversão de corrente

Ocorre inversão de corrente

Na Figura 7 e Figura 8 mostram-se, respectivamente, uma situação normal e uma situação de inversão de corrente.



Figura 7 - Corrente em uma linha de transmissão com a compensação série em uma situação normal.



Figura 8 – Corrente em uma linha de transmissão com a compensação série em situação de inversão de corrente.

A corrente de curto-circuito, para esse caso, é calculada conforme a equação (8):

Quando ocorre a inversão da corrente, a corrente de falta fluirá em direção à fonte, isto é, com sentido inverso, ocasionando problemas na atuação correta dos relés de distância que são instalados com o intuito de sanarem curtos-circuitos que se encontram à frente deles [8].

Existem algumas possíveis soluções para o problema de inversão de corrente:

- Dimensionamento da reatância capacitiva baseando-se com a soma total das reatâncias indutivas das fontes e da linha de transmissão;
- Alocação de capacitores nas duas extremidades da linha de transmissão ao invés de em apenas um ponto.
- Ajuste do disparo do centelhador (*Spark Gap*) em valores mínimos, evitando com isso a inversão de corrente.

Dentre as soluções, a mais comum é o dimensionamento do capacitor de acordo com a indutância do sistema. Quando isso não é possível, opta-se por disparo precoce do centelhador, como na terceira opção [5] [8] [30].

Inversão de Tensão em condições de falta

Para que ocorra a inversão de tensão, a reatância capacitiva () inserida com a compensação deverá ser menor do que a soma total das reatâncias do sistema e, além disso, a reatância capacitiva () deverá ser maior do que a reatância indutiva da linha de transmissão () até o ponto de falta. Logo, esta situação poderá ocorrer para faltas no trecho entre a instalação do banco e o ponto onde a reatância indutiva da linha de transmissão é a mesma em módulo da reatância capacitiva.

) Situação em que ocorre a inversão de tensão.

Nas Figuras 9 e 10 mostram, respectivamente, uma situação normal e uma situação de inversão de tensão.



Figura 9 - Corrente em uma linha de transmissão com a compensação série sem a inversão de tensão.



Figura 10 - Corrente em uma linha de transmissão com a compensação série com a inversão de tensão.

A inversão de tensão poderá provocar disparo indevido dos relés de distância, caso a fonte de potencial do relé seja localizada no lado da barra da subestação e não na saída da linha de transmissão. Uma falta interna pode ser percebida pelo relé como uma falta externa e vice-versa.

São mostradas abaixo três possíveis soluções para o problema de inversão de tensão:

- Polarização dos relés numéricos de proteção através de referência cruzada;
- Polarização por memória da tensão de fase ou por sequência positiva de pré-falta;
- Ajuste do disparo do centelhador (*Spark Gap*) em valores mínimos de corrente, evitando com isso a inversão de tensão.

Dentre as soluções apresentadas, a mais utilizada é a polarização por memória de tensão e análise do *loop* de corrente durante a ocorrência da falta. Entretanto, como a pior possibilidade de inversão de tensão ocorre para faltas logo após o banco de capacitor, o disparo rápido do centelhador novamente é utilizado como forma de evitar a inversão de tensão [5].

3.3. Componentes da compensação série

A compensação série é uma estrutura composta por diversos componentes, alguns já mencionados, geralmente montada em plataformas isoladas, uma para cada fase, e que necessita de sistema de comunicação com os acionamentos localizados ao nível do solo. Na Figura 11 é mostrado um esquema com os componentes básicos, observa-se a presença de sistemas de proteção, controle e supervisão (PSC), coluna de comunicação (CC) e acionamento do disjuntor (AD).



Figura 11 – Ligação dos componentes de um segmento do banco capacitor, com proteção através de varistor.

Dependendo da potência, os bancos são distribuídos por segmentos com associações em série ou em paralelo, conforme definição proposta pela ABNT [4].

3.3.1. Unidades capacitivas

Conforme denominação da ABNT, as unidades capacitivas são constituídas de diversos elementos capacitivos, ligados em paralelo e/ou série, em função da potência da unidade e do projeto do fabricante. A capacidade (kVAr) e a tensão de cada unidade são definidas pelo fabricante em função da dimensão da instalação do capacitor série. Os bancos podem ser autoprotegidos e os fusíveis de proteção podem ser individuais, com cada elemento capacitivo contendo seu respectivo fusível, ou pode ser utilizado apenas um fusível externo para proteger a unidade.

3.3.2. Centelhadores

Em função da evolução tecnológica, hoje os bancos de capacitores possuem como principal sistema limitador os varistores. Entretanto, os centelhadores ainda são usados em instalações mais antigas para proteção contra sobretensões,

apresentando bom desempenho, além de continuarem a ser aplicados na proteção dos varistores.

Os centelhadores atuais são ventilados a ar, em cubículos espaçosos, e possuem atualmente disparo por injeção de plasma, comandado pela proteção microprocessada dos varistores contra sobrecargas.

3.3.3. Varistores

Os varistores são resistores de óxido metálico, com acentuada não linearidade, possuindo as mesmas características dos para-raios das subestações, sendo o que os diferencia são os arranjos de montagens dos módulos, pois a tensão nominal do banco capacitor é, geralmente, bem inferior à do sistema, reduzindo o número dos módulos em série. Em contrapartida, a capacidade de dissipação de energia é geralmente maior, o que em alguns casos torna necessário aumentar os módulos em série. A capacidade de dissipação depende dos níveis de curto-circuito e pode chegar a algumas dezenas de megajoules.

3.3.4. Disjuntor

Os disjuntores convencionais de subestações devem possuir alta capacidade de abertura, baixa corrente de fechamento e razoáveis requisitos de tensão de restabelecimento. Em contrapartida, os disjuntores utilizados na compensação série devem ter como requisitos principais, pequenas capacidades de abertura, alta tensão de restabelecimento devido à abertura capacitiva e alta corrente de fechamento. O fechamento do disjuntor é solicitado sob duas condições:

- A extinção do arco elétrico curto-circuitando o centelhador dá-se sob condição de corrente de defeito.
- Para retirar o banco de capacitores de operação, em condições normais, para alguma manutenção, há a descarga dos capacitores e corrente de alta frequência e magnitude.

Entretanto, a operação de abertura ocorre com correntes normais de carga e com frequentes sobretensões de reinserção. Por esses motivos, o disjuntor pode ter características especiais, embora seja frequente a utilização de disjuntores normais de subestações. Como a tensão do capacitor é inferior ao sistema, pode-se utilizar, por exemplo, um disjuntor de 145 kV em um capacitor instalado em um sistema de 500 kV.

3.3.5. Circuito de amortecimento

As consequências de uma descarga do banco capacitor pelo disparo de um centelhador ou fechamento de um disjuntor em derivação devem ser rapidamente reduzidas para que se assegure a integridade física das unidades capacitivas, dos centelhadores e dos disjuntores, e o circuito de amortecimento (CA) tem esta função.

Este sistema consiste basicamente de um reator em paralelo com um resistor. O amortecimento da descarga do capacitor deve ser feito de modo que os fusíveis das unidades não atuem.

No dimensionamento do sistema de amortecimento definem-se as correntes de pico admissíveis em função das características dos capacitores. Em função dos projetos elaborados pelos fabricantes, normalmente, é exigido que o amortecimento seja tal que a corrente no segundo meio ciclo seja menor que 50% do pico do primeiro ciclo, garantindo, assim, a integridade física dos componentes envolvidos.

3.3.6. Reator e tiristores do CSCT

Nesta configuração, além de todos os componentes já mencionados, há um reator paralelo ao capacitor e aos tiristores que o controlam. A utilização desta configuração mostrou-se eficaz em algumas aplicações para controlar oscilações eletromecânicas de baixa frequência e baixo amortecimento. Os tiristores envolvidos nesta configuração são refrigerados a água desionizada, que circula em circuito fechado e é refrigerada no solo [4].

3.4. Tipos construtivos de bancos de capacitores

Atualmente, alguns principais tipos construtivos de bancos de capacitores são instalados, divergindo principalmente quanto às diferenças de atuação do sistema de proteção contra sobretensões, que irá definir os principais equipamentos da instalação, sendo usualmente aplicada a tecnologia de proteção com centelhadores, com varistores e capacitor controlado por tiristores.

3.4.1. Proteção com centelhadores

Inicialmente, quando os primeiros bancos de capacitores foram instalados, não existiam ainda varistores com tecnologia consolidada e confiável aos quais se agregasse uma proteção contra sobretensão confiável no momento da falta. Assim, as proteções inseridas nestes capacitores em série eram baseadas em variação das configurações utilizando-se centelhadores. Este tipo de proteção foi aplicado de forma prática e até hoje é utilizado, embora se prefiram atualmente as proteções baseadas em varistores e eletrônica de potência.

Capacitores com centelhador simples

O centelhador simples é uma das primeiras aplicações utilizadas na proteção de capacitores em série. O esquema simplificado desta configuração é mostrado na Figura 12.



Figura 12 - Configuração do capacitor série, utilizando como proteção o centelhador simples.

O funcionamento desta configuração é descrita da seguinte forma, após a ocorrência de falta no sistema:

- Quando o nível de tensão nos terminais do centelhador atinge o valor ajustado, o centelhador G dispara, desviando a corrente que passa pelo capacitor.
- Para resfriamento do centelhador e para permitir condições dielétricas adequadas à proteção do capacitor após o seu disparo, o disjuntor D é fechado, desviando a corrente do centelhador.

 Em seguida, quando o defeito é eliminado, o disjuntor D é aberto, restabelecendo a operação do capacitor.

A reinserção do capacitor série na rede depende do projeto do disjuntor e do centelhador. Este disjuntor também possui a função de auxílio, caso seja necessário dar manutenção neste capacitor. A ventilação deste centelhador também varia conforme o projeto, podendo ser ventilados a ar natural ou a ar comprimido. Quanto ao circuito de amortecimento, sua função é dissipar a energia do capacitor, quando curto-circuitado, e é constituído de um varistor em paralelo com um indutor.

Capacitores com centelhador duplo

Em alguns casos, é utilizado o esquema com dois centelhadores com o intuito de auxiliar no tempo de recuperação do primeiro centelhador. Esta configuração pode ser visualizada conforme a Figura 13.



Figura 13 – Configuração do capacitor série, utilizando como proteção o centelhador duplo

Neste caso, o centelhador de desvio da corrente G1 é ajustado com tensão de disparo na ordem de 20% inferior ao de reinserção, G2. O funcionamento desta configuração é descrito da seguinte forma, após a ocorrência de falta no sistema:

 Quando o nível de tensão nos terminais do centelhador atinge o valor ajustado, o centelhador G1 dispara, desviando a corrente que passa pelo capacitor.

- Após a eliminação da falta, o D1 é aberto e o capacitor passa a ser protegido pelo centelhador G2 até que ocorra a recuperação de G1. Nesta etapa, o sistema funciona com centelhador simples.
- Quando G1 é recuperado, o disjuntor D1 se fecha e o esquema de centelhador duplo é restaurado.
- O disjuntor D2 é utilizado na ocorrência de falha interna ao banco. Neste caso, o D2 é aberto e as seccionadoras são acionadas para isolação do sistema, sem a necessidade de se interromper a linha.

A justificativa para aplicação desta configuração é que, apesar de se ter o dobro de centelhadores e disjuntores, os requisitos sobre esses equipamentos são menores.

3.4.2. Proteção com varistores

Uma contribuição significativa aos bancos de capacitores foram os varistores a óxido metálico, que são resistores não lineares assim como os pára-raios das subestações. Seu funcionamento é descrito como um circuito praticamente aberto até que a sua tensão de condução seja atingida. A Figura 14 ilustra esta configuração.



Figura 14 - Configuração do capacitor série, utilizando como proteção o varistor

Após a ocorrência de falta na linha, o funcionamento deste modelo procede conforme abaixo:

• Quando é atingida a tensão de disparo do varistor, o mesmo passa a conduzir, desviando a corrente de falta presente no capacitor.

 Após a eliminação da falta, o varistor interrompe a condução, restabelecendo o sistema original.

Para faltas internas, pode-se notar a presença de um sistema centelhador simples, que é disparado quando a proteção do varistor detecta sobrecarga.

Uma modificação de configuração pode ser visualizada na Figura 15. Observa-se que agora existe a presença de tiristores, recebendo o nome de "Capacitor Série Controlado por Tiristores" (CSCT). Além de um sistema de proteção por varistores, existe um reator cuja função já não é mais proteger contra sobretensões, e sim, alterar a reatância do banco série, ajustando, consequentemente, a potência da linha a valores desejados.



Figura 15 – Configuração controlada por tiristores

Quando se tem um capacitor em paralelo com um indutor, a reatância resultante é vista na equação (9):

= reatância do capacitor.

= reatância do indutor;

Onde:

Quando é muito maior que , é possível ajustar com valores indutivos. Sendo assim, tem-se versatilidade nos ajustes de reatância impostos à linha.

(9)

FUNDAMENTOS DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

Neste capítulo, são apresentados os fundamentos teóricos acerca dos relés de distância e diferencial.

4.1. Considerações iniciais

A proteção de sistemas elétricos é altamente dependente dos relés. Entretanto, ao longo dos anos, modernizações foram surgindo para que se chegasse aos atuais relés existentes. A Figura 16 mostra de forma resumida a evolução dos relés.

Relés Eletromecânicos				
 1901 – Relé de sobrecorrente de indução 				
 1908 – Relé diferencial 				
 1910 – Relé direcional 				
 1921 – Relé de distância tipo impedância 				
 1937 – Relé de distância tipo mho 				
Relés Estáticos				
 1925 – 1948: 1º geração – Válvulas eletrônicas 				
 1949 – 1960: 2º geração – Transistores 				
 1961 – 1970: 3º geração – Cl's 				
 1971 – Atual: 4º geração – Relés digitais microprocessados 				

Figura 16 – Evolução dos relés, desde os relés eletromecânicos até os dias atuais.

Os primeiros relés, os eletromecânicos, surgiram em torno de 1830 e têm os créditos graças ao cientista norte-americano Joseph Henry, que constatou a invenção devido a estudos ligados ao comportamento de eletroímãs. A popularização de sua invenção se deu após a sua morte já em 1878.

Posteriormente, na década de 1930, uma segunda geração de relés tornou-se eminente, os relés eletrônicos. Esses componentes tornaram-se populares em torno de 1950 e, atualmente, são utilizados os relés numéricos ou digitais, considerados os de terceira geração.

Os relés a partir da terceira fase possuem vantagens consideráveis quando comparados com os relés eletrônicos e eletromecânicos, pois incorporam todas as facilidades da tecnologia microprocessada, além de serem confiáveis e relativamente baratos, considerando-se as vantagens oferecidas. Atualmente, os relés mais fabricados são os microprocessados devido às inúmeras vantagens operacionais disponibilizadas por eles [31].

4.2. Tipos construtivos de relés de proteção

4.2.1. Relés eletromecânicos

Os relés eletromecânicos são equipamentos que possuem bobinas, disco de indução, molas, contatos fixos e móveis, proporcionando-lhes maior robustez dentre os relés. Devido a esses fatores, são características desses tipos de relés serem de fácil parametrização.

Os ajustes desses relés são feitos por intermédio de "diais" instalados no relé. Uma desvantagem significativa dos relés eletromecânicos é a necessidade, em muitos casos, de uma fonte externa de corrente elevada para realizar seus ajustes. A sinalização utilizada pelo relé é do tipo mecânico e a operação é relatada através de bandeirolas vermelhas. A Figura 17 apresenta o relé do tipo indução.



Figura 17 – Relé do tipo disco indução [32]

Os relés do tipo indução são dispositivos de vida útil longa e muitas subestações, unidades fabris e comerciais ainda possuem os relés eletromecânicos instalados, justificando o seu estudo até os dias atuais, embora seja uma tecnologia pouco utilizada para novos projetos. Além disso, é útil do ponto de vista didático.

4.2.2. Relés eletrônicos

Os primeiro relés eletrônicos, também conhecidos como relés estáticos, utilizavam componentes eletrônicos discretos, o que aumentava os custos e a complexidade do mesmo. O objetivo principal dos relés estáticos era melhorar a confiabilidade, velocidade e sensibilidade dos sistemas de proteção. Com a evolução dos microprocessadores, partes móveis susceptíveis a desgastes foram removidas, tornando possível tal objetivo [33].

Uma vantagem significativa desse tipo de relé com relação aos relés eletromecânicos era a facilidade de alteração de curvas de operação e a precisão de ajuste de valores operacionais. Essa nova geração de relés trazia dimensões reduzidas se comparadas com os eletromecânicos, o que proporcionava painéis de comando e controle menores.

A constituição operacional era formada predominantemente por circuitos integrados que desempenhavam a função desejada. Seus ajustes são realizados também por intermédio de "diais" presentes na parte frontal do relé, sendo que cada dial ajusta uma determinada função de proteção, tais como: corrente, tempo, tensão etc. A sinalização de operação é visível na parte frontal do relé através de *Led's* de cores vermelha e verde. Na Figura 18, é possível visualizar esse relé.



Figura 18 – Relé eletrônico ou estático [34]

Outra vantagem a ser mencionada é o fato de consumirem potências menores da fonte de alimentação, TCs e TPs, com precisões elevadas e de fácil ajuste, além de possuírem alta velocidade de operação.

4.2.3. Relés digitais

Os relés digitais atualmente dominam o mercado, pois a automação dos circuitos envolvidos no sistema elétrico de proteção é cada vez mais significativa. Os relés digitais são constituídos de circuitos baseados em microprocessadores, são adventos dos relés eletromecânicos e eletrônicos, portanto mantém os mesmos princípios das funções de proteção.

O princípio de funcionamento do relé microprocessado baseia-se em algoritmos computacionais, o que facilita a inserção de novas características e funcionalidades, pois dados do sistema são captados através de TCs e TPs inseridos na rede e processados através de instruções escritas por um programa de computador. Desta forma, é possível incrementar o relé de diversas funções, com economia e confiabilidade, permitindo também processamentos de dados mais complexos. A Figura 19 ilustra a parte frontal de um relé digital.



Figura 19 – Relé Digital [35]

Por utilizarem algoritmos, os relés de proteção digitais oferecem mais versatilidade, sensibilidade, armazenamento interno e velocidade de atuação, além de funções de comunicação, medidas elétricas, sinalização remota e controle. Outras vantagens incluídas nos relés digitais são:

- Podem-se incluir várias funcionalidades em um único relé, além de mais de uma opção de proteção em um único dispositivo;
- São geralmente menores, ocupando menos espaço físico no interior dos painéis de proteção;

 Comunicação muito mais efetiva com outros relés, através de redes padronizadas.

Os relés digitais melhoraram consideravelmente os esquemas de proteção devido a essas vantagens oferecidas [36].

4.3. Funções de proteção de linhas de transmissão

4.3.1. Relé de distância

Os relés de distância são alimentados por tensão e corrente e a sua denominação é devido à proporcionalidade entre o comprimento da linha de transmissão e a sua impedância [31].

Considerando que a resistência de falta seja desprezível, a tensão no ponto de defeito é praticamente nula. Porém, à medida que se afasta do ponto de defeito no sentido da fonte, esta tensão tende a aumentar devido à queda de tensão na linha de transmissão sujeita à falta. O relé de distância processa os sinais de tensão e corrente provenientes dos TPs e TCs, sendo essa razão a impedância medida pelo relé.

Os ajustes do relé de distância devem estar sensibilizados a atuarem em diferentes tipos de falta. Devido a este fato é comum, neste relé, serem definidas unidades operacionais referentes aos loops de falta. Para proteção completa de uma linha, seis unidades de operação são necessárias para atender as possíveis faltas numa linha de transmissão, conforme mostrado na Tabela 2.

Tipo da Falta	Nomenclatura da Falta	Quantidade
Monofásica	A-T, B-T, C-T	3
Bifásica	A-B, B-C, C-A	3
Bifásica a terra	A-B-T, B-C-T, C-A-T	3
Trifásica	A-B-C, A-B-C-T	2

Tabela 2 – Possíveis faltas associadas à linha de transmissão.

Na Tabela 3, visualizam-se as seis unidades operacionais e suas respectivas equações de impedância aparente [37].

Unidades operacionais	Tensão no relé	Corrente no relé	Impedância aparente
NA	Va		
BN	Vb		
CN	Vc		
AB	Va – Vb		
BC	Vb – Vc		
CA	Vc – Va		

Tabela 3 – Equações de impedância aparente

Por intermédio de alterações nas grandezas de entrada de seis unidades de operação e restrição, os relés de distância podem ser classificados de várias maneiras, com características peculiares que os tornam adequados a aplicações definidas em linhas de transmissões. Algumas dessas características podem ser vistas na Figura 20. Nessa figura, são apresentadas as características operacionais no plano R-X para três modelos de configuração de relé: relé de impedância, mho ou admitância e reatância.

O relé de impedância tem o plano R-X centrado na origem, e pode-se notar que o mesmo só exerce função direcional quando uma unidade direcional é acoplada ao relé [31] [36].

O relé mho exerce naturalmente a função direcional, abrangendo uma área que passa pela origem e com uma inclinação que é determinada pela impedância da linha que se deseja proteger. Entretanto, ele apresenta dificuldades na operação para defeitos muito próximos à barra de sua instalação, pois nessas condições a tensão do sistema pode chegar muito próxima de zero.

O relé de reatância, assim como o relé de impedância, não é direcional, torna-se passível de erros, geralmente a utilização dessas características devem ser associadas com a utilização de uma unidade mho.



Figura 20 – Características operacionais relé de impedância (a), relé MHO (b), relé de reatância (c).

As interações entre a resistência do arco elétrico e a resistência de falta podem interferir no ponto de falta, jogando-o para fora da zona de atuação do relé de distância. Atualmente, para sanar este tipo de problema, relés com características quadrilaterais são bastante utilizados. É possível observar que, por sua própria característica geométrica, a curva quadrilateral comporta-se de forma adequada às faltas que envolvem resistências de terra.

A Figura 21 ilustra a curva quadrilateral, ressaltando-se que existem ainda diversas configurações de curvas de proteção de distância, não cabendo a essa dissertação aprofundar-se neste tópico.



Figura 21 – Característica operacional – curva quadrilateral

O relé de distância pode ser aplicado em um sistema com várias linhas de transmissão, dividido em zonas de atuação conforme mostrado na Figura 22. As características de zonas de atuação mais utilizadas são [36]:

 1^a zona: corresponde a 80% do comprimento da linha LT1, podendo chegar a 90%.

- 2^a zona: corresponde a 100% de alcance da linha LT1 e mais 20% a 50% de alcance da linha LT2.
- 3^a zona: corresponde a 100% de alcance da linha LT1, mais 100% da linha LT2 e mais 20% da linha LT3.
- 4ª zona: corresponde à zona reserva, quando o alcance do relé está no sentido inverso ao anteriormente adotado, limitando-se ao secundário do transformador.



Figura 22 – Zonas de proteção dos relés de distância.

Para critério de coordenação, adota-se:

• Proteção de 1ª zona

Essa proteção não é dotada de temporização intencional. O tempo de operação do relé é intrínseco ao equipamento. Nessa zona, diz-se que a atuação é instantânea.

• Proteção de 2ª zona

Quando se têm tensões na ordem de 138 a 230 kV, esta proteção é ajustada para um tempo de 0,40 a 0,60 s, variando conforme o projeto de coordenação com proteções de 2^a zona dos terminais remotos. Entretanto, quando o sistema é de 69 kV, a proteção de 2^a zona é normalmente ajustada para 0,80 s.

• Proteção de 3ª zona

Para proteção de 3^a zona, usa-se normalmente um tempo de 0,80 a 1,0 s, variando conforme o esquema de proteção adotado. Deve-se utilizar a faixa superior de temporização anterior quando a proteção de 3^a zona se sobrepuser à de 2^a zona de uma barra adjacente ou ainda quando alcançar o secundário do transformador de

potência da subestação remota. Quando aplicados em sistemas de 69 kV, a coordenação com as proteções de sobrecorrente força o ajuste de tempo da proteção em 3ª zona do relé de distância ser de 1,2 s.

• Proteção de 4ª zona

Para proteção em 4^a zona, em sistemas de 138 a 230 kV, adota-se em geral 1,0 s. Vale ressaltar que a proteção deve satisfazer a coordenação. Já em sistemas de 69 kV, a proteção em 4^a zona é normalmente utilizada como unidade de sobrecorrente direcional e o tempo ajustado segue a coordenação de projeto, adotando-se em geral 1,5 s.

4.3.1.1. <u>Ajustes de relé de distância aplicado à proteção de</u> <u>linha compensada</u>

Quando se trata de linhas compensadas à proteção de distância deve-se adequar a essa nova característica, pois os impactos da compensação são significativos do ponto de vista dessa proteção. O ajuste de 80 a 90% da linha acarreta sobrealcance para faltas após os capacitores série, isso se deve as compensações elevadas existentes na linha que como já mencionado podem chegar a 75% o valor da indutância da linha.

Os ajustes dos relés devem levar em conta o capacitor série presentes nos loops de falta e os efeitos da compensação nos ajustes do relé dependem da: localização da alimentação de potencial; localização dos bancos de capacitores de compensação série; níveis de compensação utilizados; tipos de proteção utilizado nos bancos capacitores (Gap ou Mov) [7] [38].

Quando os capacitores são protegidos por Gap, o ajuste em primeira zona a fim de resolver o problema de sobrealcance da zona 1 pode ser feito considerando a reatância do banco capacitor X_c, como descrito na Equação (10):

(10)

Pode-se utilizar também um fator de segurança (k), que leva em consideração a tensão de disparo do Gap e a tensão RMS do sistema. Logo o ajuste ficará como na Equação (11):

(11)

Onde:

Onde: é tensão de disparo do Gap; é a tensão RMS fase-fase do sistema.

A utilização da solução acima, embora melhore os resultados de sobrealcance, não garante a resolução da proteção em primeira zona, sendo sugerida uma modelagem do sistema em um software de transitórios eletromagnéticos para um seguro ajuste [38].

Para o ajuste de segunda zona, como o objetivo é proteger o restante da linha não protegida em primeira zona, deve-se garantir que o relé sobrealcance o barramento remoto. O ajuste deverá ser superior a 110 ou 120% da impedância da linha, seus ajustes continuam prevendo a temporização intencional para que ocorra a coordenação das proteções em outros terminais e para garantir que as linhas e disjuntores mais próximos ao problema sejam abertos [7].

A aplicação da polarização cruzada pode ser útil por considerar não somente referências de fases em falta, mas também a tensão de uma terceira fase. Utiliza-se de um percentual de tensão de fases sãs rebatida para apresentar ângulo de fase similar ao que a tensão da fase de falta exibia na condição pré-falta. Essa contribuição faz com a impedância vista fique maior que a real para faltas internas e bem negativa para faltas externas. Essa aplicação é útil para faltas nas proximidades do barramento onde a proteção está localizada [7] [39]. Na Figura 23 é mostrado o diagrama fasorial para uma polarização feita para uma falta AT, utilizando a tensão BC. É possível observar a polarização cruzada sendo aplicada.



Tensões pre falta

Figura 23 – Diagrama fasorial das tensões de polarização cruzada

Na polarização cruzada as tensões vistas pelo relé são combinações entre as tensões das fases em falta e as tensões das fases sãs, atribuindo um percentual k de contribuição das fases em falta. Na Tabela 4 tem-se a polarização cruzada, sendo o k geralmente de 0,85 [39].

Unid. opera.	Tensão no Relé	Corren. relé	Equações de impedância monitorada
AT			
ВТ			
СТ			
AB	_		
BC	_		
CA	_		

Tabela 4 - Unidades operacionais de falta com polarização cruzada

A polarização cruzada não é aplicável à faltas trifásicas na origem, devido ao fato de todas as tensões fase-fase e fase-neutro se anularem. Este problema pode ser resolvido com a aplicação de memória pré-falta, ou utilizando outras grandezas que não sejam as tensões fase-fase ou fase-neutro na polarização cruzada.

A polarização por memória é uma boa solução para sanar alguns problemas relacionados à compensação da linha, tais como a inversão de tensão e corrente. A principal característica da polarização de memória é o aproveitamento da tensão pré-falta durante alguns ciclos, garantindo a operação do relé de distância.

Com a leitura da impedância de pré-falta, ocorre à expansão da região de operação do relé, o círculo é aumentado agregando o ponto de origem do diagrama

R-X, sendo interessante para acomodar a inversão de corrente e faltas próximas ao primeiro barramento. Na Figura 24 são apresentadas as duas curvas do relé, a mho convencional e com polarização de memória.



Figura 24 – Comparação da região de operação do relé mho com curva convencional e o mho com polarização de memória.

As equações referentes à polarização por memória são idênticas às utilizadas na polarização normal de sequência positiva, tendo como alteração apenas a utilização de algumas amostras da região de pré falta [39].

4.3.2. Relé diferencial

A proteção diferencial é baseada na comparação entre as correntes elétricas que circulam entre duas extremidades do elemento que se deseja proteger, sendo estes os limites da proteção. Na ocorrência de diferença entre as correntes que circulam, o relé envia um sinal para que ocorra a atuação do disjuntor, retirando o trecho defeituoso. Vale ressaltar que a seletividade desta proteção é excelente, pois as correntes coletadas pelos TCs limitam a atuação deste relé somente àquela zona, restringindo operações fora da zona protegida.

Na proteção diferencial aplicada a linhas de transmissão, são comparados os valores de corrente que circulam em uma extremidade da linha de transmissão com valores de correntes que circulam na extremidade oposta. O relé diferencial pode ser uma alternativa para proteção de linhas de transmissão curtas [36]. Como mostrado na Figura 25 o que delimita a região protegida são TCs.



Figura 25 – Esquema funcional do relé de proteção diferencial

Nas condições normais de operação do sistema, os fasores e possuem o mesmo sentido. Logo, a corrente que passa pela bobina de operação é nula, evitando-se, assim, a sua atuação. Porém, quando a falta ocorre dentro da região protegida, uma corrente resultante faz com que exista uma corrente na bobina de operação, causando a atuação do relé. Na Figura 26, é mostrado o fluxo de corrente na falta interna e externa.



Figura 26 – Fluxo de corrente na falta interna e externa

A aplicação desta técnica de maneira elementar não é recomendada, visto que os erros intrínsecos do sistema, tais como correntes de magnetização distintas entre os TCs, erros de medições, saturação podem ocasionar atuação indesejável do relé [26]. Para contornar esse problema e proteger a linha, utiliza-se a proteção diferencial percentual. Nesse tipo de aplicação, além da tradicional bobina de operação, tem-se incorporado ao relé a bobina de restrição, cuja função principal é permitir a atuação do relé quando ocorrer um curto interno e enfraquecê-lo para faltas externas [40]. Na Figura 27, demonstra-se a inserção da bobina de restrição.



Figura 27 – Esquema funcional do relé de proteção diferencial com a bobina de restrição

No equacionamento do funcionamento desse relé proposto, tem-se que o torque de operação se iguala ao torque de restrição. A Equação 12 mostra a corrente de operação e a Equação 13 mostra a corrente de restrição.

O critério de operação ideal é definido conforme abaixo:

Quando o ajuste percentual é considerado, incrementa-se uma corrente de pick-up crescente, que representa uma porcentagem da corrente de defeito externo, o que torna o relé menos susceptível às falhas externas. Essa característica de polarização (BIAS) ou ajuste percentual é descrito na Equação 14.

$$---------(14)$$

Se:

Opera Limite

Não Opera

A proteção diferencial de linha de transmissão vem gradativamente sendo utilizada para proteção de linhas de transmissão de curta distância. A maior motivação para utilização desses relés é que a proteção diferencial não é sensibilizada pelas correntes de defeito resultantes de falhas ocorridas fora da zona protegida. Entretanto, vale ressaltar que cuidados devem ser tomados ao se utilizar essa proteção para proteger linhas de transmissão. No decorrer da dissertação, são mencionadas as restrições de se aplicar o relé diferencial a linhas de energia.

4.3.2.1. Planos de representação e lógica de atuação do relé diferencial

Para diagnóstico de falta e análise de resultados, são propostas duas ferramentas gráficas, denominadas plano cartesiano ou de operação e plano alfa, sendo que, no segundo caso, foi proposta uma modificação de suas características com o intuito de melhorar o diagnóstico de faltas. Além disso, uma teoria de comparadores é aplicada ao relé, obtendo ótimos resultados para avaliação de sistemas faltosos.

<u>Plano cartesiano I_{op} x I_r</u>

Nessa primeira ferramenta gráfica, o critério de operação baseia-se em plotar no plano cartesiano, as correntes de operação em função das correntes de restrição. Nessa circunstância, há a separação da região de atuação e a região de não atuação. Assim, o diagnóstico de falta deve feito verificando-se o plano cartesiano diferencial percentual, I_{op} x I_r, visualizado na Figura 28.



Figura 28 - Curva caraterística diferencial, análise do plano cartesiano

Observa-se que, se as amostras de corrente estiverem acima do limiar ajustado, ocorre à atuação do relé diferencial, fazendo que o *trip* no disjuntor ocorra a fim de causar o mínimo de avarias possíveis ao sistema. Ressalta-se que quanto maior o valor de B, menos sensível é o relé.

Plano alfa e alfa com características melhoradas

Para alternativa de representação gráfica, esse segundo plano é proposto. Como as correntes envolvidas em todo o processo de falta são grandezas fasoriais, pode-se representa-las em um plano complexo, denominado plano alfa, que mostra a relação entre a corrente local e remota através de uma parte real e imaginária [41]. A definição desse plano é dada pelas relações (15) e (16).

onde:

— (16)

Quando se analisa o plano- α , percebe-se vantagens em relação ao plano operacional, pois nele são caracterizadas algumas condições do sistema. Na Figura 29 são mostradas as regiões características desse plano. Para um curto fora da área de alcance ou operação normal , e nessa situação, a razão entre os fasores representa o ponto (-1,0) no plano, logo para faltas externas, as amostras circulam em torno do ponto (-1,0) [42]. Para uma falta interna, dentro da zona protegida, as amostras se direcionam para região descrita como falta interna, onde a parte real das amostras em falta adquirem valores positivos. Entretanto, na ocorrência de uma falta com contribuição amena de uma das fontes, as amostras tendem a se direcionar para as regiões descritas como *outlow*, mesmo se tratando de uma falta interna aos limites de proteção.



Figura 29 - Regiões características de atuação do plano alfa.

As zonas de restrições são mostradas na Figura 30. Observa-se que o que restringe a operação do relé são as circunferências de restrição. Quando as amostras estão dentro desse circulo característico, próximos de (-1,0) o sistema está em condição normal ou existe um falta externa aos limites de proteção, quando as amostras extrapolam a circunferência, o sistema está em falta. Os ajustes de zona de restrição podem ser modificados através de diferentes valores de K, alterando assim a sensibilidade do relé.



Figura 30 - Zonas de restrição inseridas dentro do círculo do plano alfa, para diferentes valores de K.

Quando se protege uma linha de transmissão com a proteção diferencial, além dos erros típicos como saturação e erros de medição dos TCs, outros erros são característicos devidos até mesmo às dimensões das linhas envolvidas.

Para que se garanta a comunicação eficiente entre os relés envolvidos, são utilizados canais e tecnologias de comunicação. No entanto, em muitos casos, essa troca de informação entre os equipamentos apresentam atrasos, comprometendo o desempenho dos relés. Além disso, linhas de transmissão podem apresentar correntes capacitivas capazes de ocasionar o disparo indevido do relé diferencial [42].

Os curtos dentro da zona protegida pelos TCs apresentam aproximadamente o mesmo ângulo, entretanto, os atrasos referentes aos canais de comunicação, na faixa de 3 a 5 ms causam assimetria na comunicação dos relés, logo as amostras se deslocam verticalmente, devido a diferença de ângulo entre elas. Nesse caso, as amostras tendem a ficar fora da faixa de atuação do relé. Quanto maior as linhas de transmissão, maiores são os atrasos.

Outro fator relevante é que em algumas situações, mesmo na ocorrência de uma falta fora dos limites de atuação do relé, devido à saturação dos TCs, contribuição pequena de uma das fontes ou até mesmo para faltas internas resistivas em uma linha muito carregada, poderá surgir amostras na região denominada *outfeed*. Dependendo da sensibilidade K do relé as regiões de restrição e *outfeed* se interceptam, nessa situação as amostras permanecem dentro da região de restrição, o relé não é sensibilizado, atuando de forma incorreta.

Levando em conta as características citadas acima, foi proposta uma análise na trajetória dos pontos no plano alfa com características modificadas que acomodam melhor as amostras em curto e atentam para as regiões mencionadas. Define-se esse plano como duas retas passando pela origem definidas por um ângulo α e circunferências de raios R e 1/R. Esse plano pode ser visualizado na Figura 31.



Figura 31 – Característica do plano alfa com características melhoradas, proposto para proteção diferencial.

Com as modificações realizadas, várias vantagens podem ser mencionadas. Uma vantagem significativa é quanto à tolerância a assimetria dos canais de comunicação e à tolerância aos chamados *outfeed*.

Na Figura 32 é demonstrada a região de tolerância à assimétrica do canal de comunicação, para uma mesma tolerância a *outfeed*, isso é para um mesmo K e na Figura 33 é ilustrada a tolerância a *outfeed*, também conhecido como *outflow* [42] [43].



Figura 32 - Tolerância a erros de comunicação



Figura 33 – Tolerância para outfeed.

Teoria dos comparadores aplicada ao relé diferencial

A filosofia de proteção se baseia na comparação de grandezas. Os relés comparadores de grandezas se mostraram eficientes e simples, e foram então, incorporadas aos relés numéricos [43].

Para grandezas complexas existem dois tipos de comparadores, o de magnitude e o de fase, sendo que o comparador de magnitude possui grandezas S_o (grandeza de operação) e S_R (grandeza de restrição) e um comando de *trip* de saída. O comparador de fase apresenta grandezas de medição e polarização (S_m e S_p), além de também possuir uma saída de *trip* seno ou cosseno. Abaixo, é demonstrada a lógica de operação de dois comparadores.

(Comparador de Magnitude)

— (Comparador de Fase Cosseno)

O comparador implementado no relé foi o comparador Schweitzer, proposto em 1993 por Schweitzer e Roberts, que é um novo equacionamento do comparador tipo cosseno. Quando se analisa o produto de um sinal A pelo conjugado de um sinal B, tem-se intrínseco no resultado a defasagem angular entre os sinais A e B.

Tem-se assim, os comparadores do tipo cosseno e seno, respectivamente representados pelas variáveis C_{cos} e C_{sen} . A lógica de operação do comparador do tipo cosseno pode ser visualizado abaixo.

Observa-se que com o produto de suas partes reais somado com o produto de suas partes imaginárias realiza-se a comparação de fase entre dois vetores e avaliando apenas o sinal C_{cos} é possível determinar se um ponto está dentro ($C_{cos} \ge 0$) ou fora ($C_{cos} < 0$) da região de atuação [43].

5 PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA

Os relés digitais de proteção são compostos por microprocessadores dedicados e especificados para este fim. Recebem sinais de entrada das grandezas e parâmetros ajustados e o *software* processa toda a lógica de proteção através de um algoritmo de proteção. Essa característica confere ao relé a multifuncionalidade, associando, por exemplo, vários algoritmos de proteção a somente um relé, quando desejável [40]. Na Figura 34 é mostrada a estrutura de um relé digital.



Figura 34 – Estrutura do relé digital

Os algoritmos desenvolvidos nos relés digitais são geralmente distribuídos internamente em formatos de blocos, facilitando com isso o manuseio das informações. Para se tornar possíveis os resultados desta dissertação, é descrito neste capítulo a estrutura do relé digital, assim como os conceitos utilizados para a implementação dos algoritmos de proteção de distância e diferencial proposto para proteção de linhas de transmissão.

5.1. Processamento da falta

Para processamento da falta, muitos dados são necessários ao relé de proteção de linha de transmissão. Devido a essas exigências, uma série de operações de multiplicações e divisões devem ser executadas para atuação do relé. Entretanto, o cálculo constante desses parâmetros solicitados pelo relé torna a aplicação do mesmo inviável, pois são operações que podem apresentar grande consumo de tempo computacional e, consequentemente, atrasos na proteção da linha.

Atualmente, os algoritmos computacionais existentes não calculam estes parâmetros de maneira constante a fim de evitar esses atrasos ou até mesmo utilizar o processamento para outras funcionalidades. Os relés atuais são implementados de forma a realizarem este cálculo apenas quando necessário, isto é, apenas na presença de uma falta. Devido a esse motivo, a rotina de detecção de falta se torna tão necessária, pois ela determina o instante em que o relé deve começar a calcular parâmetros necessários para a sua atuação visando à extinção da falta.

5.1.1. Detecção da falta

Para a detecção da falta realizam-se rotinas computacionais para identificar o estado em que o sistema se encontra, isto é, faz-se um processo de detecção de falta. Uma das formas de se detectar a falta é através da comparação entre os sinais pré-falta e pós-falta. Sem a presença de falta, os ciclos comparados de tensões e correntes não apresentam variações bruscas de amplitude e frequência.

5.1.2. Classificação dos tipos de falta

Uma rotina é geralmente desenvolvida com o intuito de determinar o tipo de falta, classificando-a, para que o relé escolha as tensões e correntes apropriadas para o cálculo, não realizando cálculos desnecessários.

Muitas técnicas são desenvolvidas na literatura, apresentando vantagens e desvantagens. Embora o objetivo desta dissertação não seja o aprofundamento nas técnicas de classificação de falta, verifica-se que as mais comuns são as baseadas nas componentes de Clarke, redes neurais, utilização do neutro para distinção de faltas proveniente do contato com a terra, etc.

5.2. Processamento de sinais

Os dados necessários para operação do relé variam conforme o tipo e a função do relé de proteção. Em sua grande maioria, esses dados são coletados com o auxílio de transformadores de corrente e de potencial, que, além de diminuírem o valor de tensão e corrente de entrada a níveis propícios aos circuitos microprocessados, também isolam eletricamente o circuito.

Primeiramente, devido ao fato de os dados coletados poderem possuir amplo espectro de frequência, os sinais são filtrados através de um filtro analógico passa-baixa. Em seguida, um circuito "*Sample and Hold*" amostra essas entradas analógicas até que o circuito multiplexador leia a entrada do sinal desejado. No conversor A/D, os sinais analógicos são convertidos para a forma digital em intervalos definidos de amostragem. Na fase final, um algoritmo numérico para estimação de fasores é utilizado e aplicado à lógica do relé de proteção. Nos itens respectivos, é abordado de maneira simples, porém necessária, as funções de cada bloco intrínseco ao relé digital.

5.2.1. Filtros passa-baixa

Para os relés de proteção, tipicamente um filtro passa-baixa é utilizado como filtro *antialiasing*, impedindo que as altas frequências sejam amostradas, pois comumente esses dados na ocorrência da falta possuem harmônicas de ordem elevada e que devem ser filtradas, a fim de inserir menos erros no processamento digital dos sinais. Para essa função, um filtro passa-baixa *Butterworth, Chebyshev, ou Basel* é empregado em aplicações de filtragem dos canais analógicos de relés microprocessados [5] [40].

5.2.2. Taxa de amostragem

Em relés digitais microprocessados, a amostragem dos sinais analógicos, provenientes dos TCs e TPs, é extremamente importante. É essencial que a amostragem seja realizada de maneira adequada, para que os sinais sejam corretamente convertidos em sinais digitais e, futuramente, manuseados pela lógica do relé. Em sua grande maioria, os relés de proteção trabalham com taxas de amostragem fixa e múltipla da frequência nominal do sistema de potência. As taxas de amostragem dos relés numéricos variam conforme a funcionalidade do relé e o fabricante do mesmo. Comumente, os algoritmos numéricos trabalham com taxas de amostragem que variam entre 4 a 64 amostras por ciclo.

A escolha quanto à taxa de amostragem mais indicada está ligada ao teorema de Nyquist e quanto à capacidade e tempo de processamento. Ressalta-se que a precisão dos valores a serem obtidos nos cálculos realizados pelo algoritmo é influenciada pelo tamanho da janela de amostragem. O tratamento dos dados originados dos sistemas de medições são tão importantes quanto à lógica do relé propriamente dita, pois, com o tratamento inadequado, todo o processo de tomada de decisões será comprometida.

5.2.3. "Sample and hold" e multiplexadores

Para que os cálculos possam ser realizados em uma mesma base de tempo, aplicam-se dispositivos conhecidos como "*Sample and Hold*" associados a multiplexadores, ficando os "*sample and hold*" responsáveis pelo armazenamento e amostragem dos dados coletados e os dispositivos multiplexadores responsáveis pela leitura apenas dos sinais desejados. Entretanto, a finalidade do multiplexador é executar a escolha de um sinal dos vários canais analógicos de entrada existentes, fazendo com que a transmissão desses sinais ocorra de maneira simultânea. O multiplexador evita, assim, a utilização de um conversor A/D para cada um dos sinais de tensão e corrente coletado, permitindo a utilização de apenas um conversor A/D.

5.2.4. Conversores A/D

Como dito anteriormente, o sistema de aquisição analógico tem que ser convertido em sua forma digital para que os sinais sejam microprocessados pelo relé. O conversor A/D tem por finalidade converter sinais analógicos para a forma digital, com intervalos definidos pelo sistema de amostragem.

5.2.5. Filtro para estimação de fasores

O relé monitora continuamente grandezas do sistema elétrico, tais como tensão, corrente, frequência e, a partir desses valores, os algoritmos de proteção estimam os fasores envolvidos no processamento do sinal. Contudo, o relé deverá ser capaz de distinguir uma operação normal de uma operação anormal, utilizando amostras de fasores de corrente e/ou tensão e considerando os valores de pick-up ajustados. Nesta dissertação, o filtro implementado foi o de Fourier de um ciclo [40].

5.2.5.1. <u>Algoritmo de Fourier</u>

O filtro de Fourier clássico, assim como o filtro cosseno e seno, é descrito em [15]. O algoritmo deste trabalho foi implementado através de:

Onde é o número de pontos da janela de dados considerada e o é o ângulo característico. O fasor associado à fundamental é descrito como:

ou

Dependendo de qual é a onda de referência, seno ou cosseno, respectivamente. Pode-se demonstrar uma aproximação, efetuando apenas o cálculo de , coeficiente relacionado ao seno, e considera o como sendo o próprio calculado – de ciclos antes, uma vez que a função cosseno é equivalente à função seno calculada – de ciclos antes. O filtro descrito recebe o nome de filtro Seno.

(23)

De forma análoga, no filtro cosseno se calcula coeficiente relacionado ao cosseno eo valor de é o valor de calculado – de ciclos antes, visto que a função seno é equivalente à função cosseno calculada – de ciclos antes. O filtro descrito recebe o nome de filtro Cosseno.

(21)
É importante ressaltar que os filtros seno e cosseno são restritos aos casos onde ---- e --- são valores inteiros.

5.2.5.2. Resposta de frequência dos filtros

Na Figura 35 é apresentado o resultado da resposta em frequência dos filtros Cosseno, Seno e Fourier. Para tal resultado são consideradas 16 amostras por ciclo e janela de dados de um ciclo.



Figura 35 - Resposta em frequência dos filtros Seno, Cosseno e Fourier de 1 ciclo.

Observa-se a eficiência dos três algoritmos na estimação do sinal da fundamental (60 Hz) e nota-se que as componentes de frequências superiores são atenuadas. É visível que o filtro seno se comporta melhor na extinção de componentes em alta frequência, por possuir lóbulos laterais menores.

Esse critério credencia o filtro a atuar melhor na eliminação de componentes de alta frequência existente em condições de falta. Quanto ao filtro Cosseno, percebe-se sua melhor exclusão de componentes DC. O filtro de Fourier apresenta um comportamento intermediário entre os outros dois.

(24)

(25)

5.3. Implementação do algoritmo diferencial de proteção

O algoritmo implementado para realização da proteção diferencial de linha de transmissão foi realizado no *software* Matlab, utilizando os conceitos descritos no capitulo 4, onde é discutido a lógica de operação do relé diferencial. A Figura 36 apresenta o fluxograma do relé de proteção diferencial, com os principais blocos referentes ao relé.



Figura 36 – Fluxograma do algoritmo de proteção diferencial

Os dados de entrada são coletados com o auxílio de transformadores de corrente, que diminuem o valor de corrente de entrada a níveis propícios aos circuitos microprocessados e também isolam eletricamente o circuito. Os dados são provenientes da simulação realizada no software ATP, e os valores de corrente são coletados nas duas subestações definidas no modelo simulado.

Em seguida, as medições são filtradas utilizando um filtro passa-baixa. Para essa função, é empregado um filtro passa-baixa *Butterworth* com as seguintes características:

- Frequência de corte = 100 Hz
- Ordem do filtro = 2

A resposta em frequência do filtro é mostrada na Figura 37. Observa-se que o filtro atua como previsto nas especificações, atenuando frequências superiores a 100 Hz, que é a frequência de corte do mesmo.



Figura 37 – Resposta em frequência do filtro passa-baixa Butterworth.

Essa conclusão da eficiência é também observada na Figura 38, que compara o sinal original da falta com o sinal após a filtragem. Nota-se uma presença maior de componentes de alta frequência no sinal real.



Figura 38 - Resultado da filtragem do sinal, utilizando um filtro passa-baixa de Butterworth.

Os algoritmos numéricos trabalham com taxas de amostragem que variam entre 4 a 64 amostras por ciclo. Para o algoritmo desenvolvido, 16 amostras por ciclo foram suficientes para que o relé se mantivesse rápido e confiável.

Posteriormente, para extração da componente fundamental, um filtro de Fourier de um ciclo foi utilizado, permitindo a extração da componente fundamental das tensões e correntes, componentes essas utilizadas para realização da lógica do relé.

O relé diferencial é analisado no plano R-X de operação, plano alfa e alfa com características modificadas. Outro fator utilizado para diagnóstico de atuação do relé diferencial é uma teoria de comparadores proposta na referência [43].

6 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da dissertação. Além disso, é feita uma descrição do sistema utilizado para as simulações das faltas processadas pelos algoritmos implementados.

As simulações foram realizadas no *software ATP*, que efetua a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes elétricas. Para o trabalho proposto é utilizado um sistema de 345 kV, provido de subestações, considerando-se a impedância equivalente em seus terminais. Dois sistemas foram simulados, um sem compensação série e outro com um fator de compensação série, caracterizando uma linha de transmissão compensada. A linha simulada tem uma extensão de 80 km, sendo o modelo adotado o *J-Marti* disponível no *software ATP*. Os dados utilizados podem ser visualizados na Figura 39, enquanto que geometria da linha de 345 kV pode ser vista na Figura 40.

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.5156	1.48	0.06114	-7.5	12.5	7	45.72	0	2
2	2	0.5156	1.48	0.06114	0	12.5	7	45.72	0	2
3	3	0.5156	1.48	0.06114	7.5	12.5	7	45.72	0	2
4	0	1E-6	0.489	1.4907	-4.5	22.2	18.24	0	0	0
5	0	1E-6	0.489	1.4907	4.5	22.2	18.24	0	0	0

Figura 39 – Parâmetros da linha de transmissão simulada.



Figura 40 - Geometria da linha de 345 kV

O sistema simulado é apresentado na Figura 41, sendo constituído de duas fontes interligadas por uma linha de transmissão de 80 km já descrita, transformadores de potencial e os transformadores de corrente. Observa-se também, a presença do capacitor série, com o intuito de compensar a linha de transmissão.

A compensação da linha é mostrada próxima a barra 1, entretanto, foram realizados testes deslocando o capacitor ao longo da linha de transmissão. O valor de capacitância utilizada de $180 \,\mu$ F, que é suficiente para compensar a linha em 50%.

Os dados e parâmetros utilizados para a simulação podem ser coletados na Tabela 5 e os cálculos dos parâmetros da linha foram adquiridos com auxílio do *software* ATP, através da *Rotina Line Constants*. O sistema possui uma frequência nominal em 60 Hz.

As faltas foram simuladas a 5%, 50% e 95% de distância da barra 1, além de faltas em ambas as barras, fora do limite de atuação do relé diferencial. Para uma análise mais aprofundada, foram também simuladas faltas com resistências, 0 Ω , 10 Ω e 30 Ω .



Figura 41 - Diagrama do sistema com compensação série utilizado para o estudo do relé diferencial.

		Resistência (Ω/km)	Indutância (mH/km)	Capacitância (ηF/km)	Extensão linha
Fonte 1 (345kV /-90%)	Pos.	4,00	95,00	-	-
	Zero	4,00	95,00	-	-
Fonte 2 (345kV /-75%)	Pos.	6,5	135	-	-
	Zero	3,0	106	-	-
Linha de transmissão	Pos.	0,031432	0,967983	12,05	
	Zero	0,423463	3,319633	7,786	80 km

Tabela 5 – Dados do sistema simulado com a compensação série.

Com o sistema descrito foram simuladas mais 200 faltas em diferentes condições. Primeiramente, são simuladas faltas fase-terra, fase-fase-terra e trifásicas na linha de transmissão sem a compensação série, com resistência 0 Ω e em seguida com a inserção de resistências. Posteriormente inseriu-se ao sistema a compensação série, sendo os mesmos testes realizados, tanto para faltas monofásicas quanto para faltas trifásicas. Em seguida, provocou-se a saturação do transformador de corrente em algumas faltas para que esse efeito fosse investigado. A curva característica de saturação inseridos no software ATP referente aos transformadores de corrente são mostradas na Figura 42 e a metodologia utilizada para saturar os TCs foi à inserção de carga em seu secundário (*Burden*).



Figura 42 - Curva característica de saturação de transformador de corrente.

6.1. Resultados das simulações do sistema sem compensação série

As faltas seguintes são do sistema mostrado inicialmente, porém, sem a presença do capacitor para compensação série.

6.1.1. Faltas monofásicas

As tensões e correntes para uma falta monofásica, a 50% da barra 1 são mostradas na Figura 43 e na Figura 44, coletadas a partir dos TPs e TCs. Na Figura 45 apresentam-se os valores de corrente de operação juntamente com a corrente de restrição, ambas utilizadas para os cálculos do relé diferencial. Observa-se a existência da falta na fase A, devido a elevado valor da corrente de operação e uma baixa corrente de restrição. É importante salientar a presença de oscilações nos primeiros ciclos de falta, além de se observar que a corrente de operação nas demais fases é pequena.



Figura 43 - Tensões trifásicas nas saídas dos TPs, após a falta monofásica, sem a compensação série.



Figura 44 - Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após a falta monofásica, sem a compensação série.



Figura 45 - Corrente de operação (a) e corrente de restrição (b), sem a compensação série.

Uma característica fundamental para análise da proteção da linha de transmissão é a trajetória da impedância de falta para os diversos *loops* de medições. Essa característica é ainda mais importante quando se aplica a proteção de linha através do relé de distância. Essa análise consiste na observação da impedância no plano complexo, desde o ponto de condição de carga estável, passando pelo transitório da falta até o momento de regime permanente de falta.

Na Figura 46 observa-se que a trajetória da impedância de falta converge para o ponto de atuação do relé de distância, devido a uma falta monofásica AT a 4 km de distância da barra 1. Para os resultados descritos é considerado um relé de distância com curva característica mho convencional, sendo dois ajustes, um de primeira zona considerando uma proteção de 85% da linha de transmissão e um ajuste de segunda zona considerando 100% do primeiro trecho e 50% da impedância da fonte do terminal remoto.

Na Figura 47 é apresentado o resultado do relé diferencial utilizando-se o plano operacional para uma falta a 5% de distância da barra 1. É possível notar que as amostras de corrente saem de um estado de pré-falta para a região descrita como de operação do relé.



Figura 46 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 5% da barra 1 e resistência de falta nula, sem a compensação série.



Figura 47 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta trifásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$ sem a compensação série.

É importante salientar que a característica de seletividade do trecho protegido é intrínseca ao relé diferencial, pois o que delimita a área protegida são os TCs alocados nas extremidades das linhas de transmissão.

Na Figura 48 é mostrada a operação do relé diferencial através do plano alfa. Tem-se o caminho das amostras desde o ponto de carga até o ponto de falta, que ao contrário da curva do relé de distância mho, se encontra na região externa do ciclo.



Figura 48 – Relé diferencial no plano alfa para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.

Para a condição de falta próxima da barra 1 e sem a compensação série, é possível notar que ambos os relés tiveram operação satisfatória, não ocorrendo dificuldade de atuação.

Nessa próxima etapa insere-se uma falta, com resistência de 30 Ω e na Figura 49 têm-se as ondas de corrente. Observa-se uma menor oscilação das ondas presentes nos TCs e também menor influência da componente DC, enquanto que a amplitude da falta é suavemente menor devido à inserção da resistência.



Figura 49 – Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após a falta monofásica, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.

Na Figura 50 é demonstrada a trajetória da impedância desde o ponto de carga até a estabilidade da impedância de falta do relé de distância curva mho, que apesar de ter atuado apresentou maior dificuldade, sendo possível observar amostras em segunda zona. Esses resultados eram previstos para o relé de distância, ainda mais por ser uma linha de transmissão curta. Para essa proteção cujas características de resistência de falta são maiores, aconselha-se a utilização da curva quadrilateral, para acomodar melhor as amostras de impedância de falta.

O relé diferencial não encontra dificuldades, atuando corretamente para essa falha. Na Figura 51 observam-se a presença da corrente de operação e de restrição relacionadas ao relé diferencial. A resistência de falta diminui a oscilação presente nos primeiros ciclos da falta.



Figura 50 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 5% da barra 1 e $R_f = 30 \Omega$, sem a compensação série.



Figura 51 – Corrente de operação e corrente de restrição para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, sem a compensação série.

Na Figura 52 apresentam-se o plano operacional do relé diferencial e sua atuação para este tipo de falta.



Figura 52 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta monofásica a 5% do barra 1, $R_f = 30 \Omega$, sem a compensação série.

Para uma falta próxima a barra da subestação 2, o relé diferencial atua de forma correta não importando a distância em relação à barra 1. Sabe-se que a distância de ocorrência da falta influi significativamente na impedância medida, entretanto, o relé diferencial é pouco vulnerável a esta mudança, diferentemente do relé de distância. Isto é visto na Figura 53 que expõe o comportamento do relé diferencial no plano operacional para falta 95% da barra 1.



Figura 53 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta monofásica a 95% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.

Para uma falta próxima da barra 2, com presença de resistência de falta, através da Figura 54 é possível observar a atuação do relé diferencial no plano operacional. Que é altamente seletivo.



Figura 54 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta monofásica a 95% da barra 1, R_f = 30 Ω , sem a compensação série.

Observa-se na Figura 55, a característica de operação através do relé de distância com curva mho quando a falta ocorre fora dos limites de atuação dos relés (falta na barra 1).



Figura 55 – Trajetória da impedância de falta monofásica na barra 1 e resistência de falta nula, sem a compensação série.

Na Figura 56 nota-se uma corrente de operação baixa quando comparada com a alta corrente de restrição existente neste caso. Este resultado é previsível, pois a falta ocorre fora dos TCs que delimitam a região de operação do relé diferencial. Nenhum dos relés atuou, se mostrando satisfatórios quanto à aplicação.



Figura 56 – Corrente de operação e corrente de restrição para uma falta monofásica na barra 1, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.

Para reforçar os resultados descritos utiliza-se também o plano alfa modificado do relé diferencial.

Na Figura 57 são mostradas as impedâncias localizadas dentro do círculo, o que significa que o relé diferencial não iria atuar para esta falta.



Figura 57 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica na barra 1, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.

Na Figura 58 o comparador de fase possui elevados valores positivos, também mostrando que a falta ocorreu fora da zona de atuação.



Figura 58 – Comparadores de fase para indicar atuação do relé diferencial em caso de falta interna, sem a compensação série.

O relé diferencial se mostra estável para uma falta fora de seus limites, se mostrando seletivo, operando apenas para faltas em trechos delimitados pelos TCs presentes em suas extremidades.

6.1.2. Faltas trifásicas

Após os testes do sistema exposto a uma falta monofásica, um conjunto de simulações é realizado para verificar as operações dos relés quando submetidos à faltas trifásicas.

Na Figura 59 são mostradas as ondas de corrente, enquanto que na Figura 60 as ondas de tensão para uma falta na metade da linha de transmissão, com $R_f = 0 \Omega$. Em seguida, aumenta-se a resistência de falta, e novamente se exibe as correntes, conforme Figura 61.



Figura 59 – Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após falta trifásica, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.



Figura 60 – Tensões trifásicas nas saídas dos TPs, após a falta trifásica, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.



Figura 61 – Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após a falta trifásica, $R_f = 30 \Omega$, sem a compensação série.

Para uma falta trifásica a 5% de distância da barra 1 sem a presença da resistência de falta, tanto o relé de distância quanto o relé diferencial se mostraram eficientes, conforme Figura 62 e Figura 63, referentes ao relé de distância e relé diferencial respectivamente.

Na Figura 64 é exibida a atuação do relé diferencial no plano operacional, para uma falta próxima a barra 1. O relé diferencial atua corretamente.



Figura 62 – Trajetória da impedância de falta, para falta trifásica a 5% da barra 1, R_f = 0 Ω , sem a compensação série.



Figura 63 – Relé diferencial no plano alfa modificado para falta trifásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.



Figura 64 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta trifásica a 5% da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, sem a compensação série.

Na Figura 65 é exposto o plano alfa com características modificadas, tendose a atuação do relé diferencial para está falta trifásica próxima a barra 2.



Figura 65 – Relé diferencial no plano alfa modificado para falta trifásica a 95% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.

Quando o sistema é submetido a uma falta nas proximidades da barra 2 e com resistência de falta, o relé diferencial não encontra dificuldades. Na Figura 66 visualiza-se a operação do relé diferencial no plano alfa modificado e o comparador de fase evidencia a correta atuação na Figura 67.



Figura 66 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica a 95% da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, sem a compensação série.



Figura 67 – Comparador de fase do relé diferencial para falta trifásica a 95% da barra 1, R_f = 30 Ω .

Dando continuidade aos testes, insere-se uma falta trifásica na barra da subestação 2, fora dos limites dos transformadores de corrente do diferencial e abrangendo a segunda zona do relé de distância.

Na Figura 68 apresentam-se o resultado da trajetória da impedância para o algoritmo do relé de distância. Ocorre atuação em segunda zona para essa simulação.



Figura 68 – Trajetória da impedância de falta, para falta trifásica na barra 2, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.

Na Figura 69 têm-se as amostras dentro do circulo o que demonstra não atuação do relé do diferencial, confirmando a seletividade do relé.



Figura 69 – Relé diferencial no plano alfa modificado para falta trifásica na barra 2, $R_f = 0 \Omega$, sem a compensação série.

Quando se insere uma resistência de 30Ω a falta externa, o relé diferencial continua a trazer bons resultados, de acordo com a Figura 70.



Figura 70 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta trifásica na barra 2, $R_f = 30 \Omega$, sem a compensação série.

6.2. Resultados das simulações com compensação série

Nessa fase da dissertação, considera-se uma compensação série de 50% do valor de reatância da linha. São testados transitórios em que o capacitor permanece inserido na linha de transmissão até a atuação do sistema de proteção, e posteriormente os resultados provenientes da complementação do dispositivo MOV e do *Spark-Gap*, com o intuito de retirar o capacitor para protegê-lo.

São realizadas avaliações do sistema com a presença faltas em diferentes pontos, sem e com resistência. Com as simulações realizadas foi possível constatar vários efeitos da compensação de linha de transmissão para os sistemas de proteção.

6.2.1. Faltas monofásicas sem o dispositivo MOV

Inicialmente, na Figura 71 é possível constatar erro do relé de distância com característica mho para atuar em uma falta monofásicas a 4 km de distância da barra 1, pois essa falta estaria dentro da primeira zona de atuação do relé de distância, entretanto é possível notar que a impedância se direciona para um ponto fora da zona de atuação, neste caso o relé de distância não identifica o curto, devido a sua característica unidirecional, não extinguindo a falta. Este efeito é causado pela inversão de corrente devido a característica capacitiva da linha.



Figura 71 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Na Figura 72, é possível observar a presença de frequências sub-harmônicas. Observa-se uma queda considerável da contribuição da componente DC do sinal, isso ocorre devido à característica da inserção do capacitor.



Figura 72 – Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após a falta monofásica 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha e grau de compensação de 50%.

Na Figura 73 visualiza-se a corrente de operação e a corrente de restrição do relé diferencial para este modelo de falta. É possível notar também o aumento das componentes sub-harmônicas.



Figura 73 – Corrente de operação e corrente de restrição para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Para o algoritmo diferencial aplicado, a grande variação da corrente de operação e de restrição causada pela inserção do capacitor série, eleva os valores das amostras diferenciais, como pode ser observado na Figura 74. Entretanto, pode-se constatar por essa mesma figura e pela Figura 75 que a atuação do relé diferencial não é comprometida para esta falta.



Figura 74 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 75 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Na Figura 76 visualiza-se a trajetória da impedância para uma falta com 30Ω de resistência a 4 km da barra 1. Observa-se a atuação equivocada do relé de distância, o relé atuaria em segunda zona. A eficiência do relé diferencial é mostrada na Figura 77.



Figura 76 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 4 km da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 77 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 4 km da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Na Figura 78 apresentam-se o comportamento do relé de distância perante a uma falta a 40 km de distância da barra 1. Nesta figura pode-se analisar a trajetória da impedância de falta, que apesar de estar dentro da curva de atuação do relé, nota-se que o perfil de falta se assemelha a uma falta próxima ao barramento, o que não condiz com a situação real.



Figura 78 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 50% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

O relé diferencial atua corretamente. Na Figura 79 é demonstrada a atuação no plano alfa modificado, as amostras caminham para o ponto externo a área delimitada, caracterizando atuação do relé.

Para a falta monofásica no meio da linha de transmissão com resistência de 30 Ω, tem-se na Figura 80 que o relé de distância atuará em segunda zona, um comportamento bem distinto em relação à falta sem a presença de resistência.



Figura 79 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 50% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 80 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 40 km da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Na Figura 81, que mostra o plano alfa do relé diferencial para uma falta monofásica com resistência de 30Ω, é evidenciada a atuação correta do relé diferencial.



Figura 81 – Relé diferencial no plano alfa, para falta monofásica a 40 km da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Na Figura 82, para uma falta a 76 km da barra 1 e com resistência nula temse duas evidências significativas: primeiro a atuação em primeira zona, que é errônea carecido o fato da falta esta localizada a 95% da barra 1 e faltas em primeira zona compreendem apenas a 85% da distância. A segunda evidência é presença das frequências sub-harmônicas, devido à trajetória espiral. Na Figura 83 é mostrado o bom resultado do relé diferencial no plano alfa modificado, sendo a trajetória espiral também é observada.



Figura 82 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 76 km da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 83 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 76 km da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Na ocorrência da falta a 76 km de distância da barra 1. Quando a linha é protegida com o relé diferencial, não teríamos problema, conforme a Figura 84. A característica espiral é minimizada com a presença da resistência de falta em ambos os relés.



Figura 84 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 76 km da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Quando a falta ocorre na barra 2, o relé diferencial permanece inerte, pois a falta ocorre fora dos seus limites de atuação, como mostrado na Figura 85.

Na Figura 86, também é possível observar influência das frequências subharmônicas, que dificultam a estimativa de corrente realizada pelo algoritmo. É possível visualizar que diferentemente de casos anteriores, a corrente real e a estimada são distintas nos primeiros ciclos da falta.



Figura 85 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica na barra 2, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 86 – Comparação entre as correntes originais e as correntes estimadas do TC 1, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

6.2.1. Faltas trifásicas sem o dispositivo MOV

Para a falta trifásica localizada a 4 km da barra 1, sem a presença do dispositivo MOV, o comportamento das correntes trifásicas são mostrados na Figura 87 enquanto as tensões na Figura 88. Nota-se elevada oscilação na corrente, nos primeiros ciclos de falta. A trajetória da impedância para esta falta pode ser verificada na Figura 89, sendo verificada a inversão de corrente deslocando a falta para fora da curva mho.



Figura 87 – Correntes trifásicas nas saídas dos TCs, após a falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 88 – Tensões trifásicas nas saídas dos TPs, após a falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 89 – Trajetória da impedância de falta, para falta a 4 km da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Nota-se na Figura 90, que o relé de proteção diferencial não encontra dificuldades para atuar de forma correta para falta trifásica, apesar de maior amplitude das amostras e da maior oscilação das correntes de entrada.



Figura 90 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

O relé diferencial não encontra dificuldade mesmo na presença da resistência, isso pode ser concluído pela Figura 91.



Figura 91 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Para faltas trifásicas no meio da linha, visualiza-se na Figura 92 a atuação incorreta do relé de distância, a trajetória em espiral da impedância de falta dificulta o diagnostico da mesma. Quanto ao relé diferencial, o mesmo continua com desempenho satisfatório, como mostrado na Figura 93. Na Figura 94 observa-se que

com a inserção da resistência de 30Ω, ocorre uma menor oscilação da trajetória de impedância, mas o relé de distância ainda falha.



Figura 92 – Trajetória da impedância de falta, para falta trifásica a 40 km da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 93 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta monofásica a 50% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 94 – Trajetória da impedância de falta, para falta trifásica a 40 km da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Na Figura 95 nota-se que o relé diferencial, mesmo com valores resistivo e com o sistema compensado permanece a oferecer desempenho satisfatório.



Figura 95 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para uma falta trifásica a 50% da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Para faltas trifásicas próximas a barra 2. Na Figura 96 e Figura 97 são apresentados os resultados para o relé diferencial, respectivamente sem e com resistência de falta. É possível observar uma grande oscilação das amostras de corrente diferencial, entretanto não interfere no bom desempenho do relé.



Figura 96 – Relé diferencial no plano alfa, para falta trifásica a 95% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 97 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica a 95% da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Para a falta externa na barra 2 da subestação. O relé diferencial atua normalmente, como mostrado na Figura 98.



Figura 98 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica na barra 2, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

6.2.2. Faltas monofásicas com a presença do MOV e SparkGap

A presença do MOV no sistema diminui a oscilação de corrente e tensão logo após a ocorrência da falta, isso influi diretamente no calculo da impedância. É possível observar na Figura 99 que o relé de distância possui menor oscilação até o ponto de convergência.


Figura 99 – Trajetória da Impedância de falta, para falta monofásica a 5% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Na Figura 100 é possível observar a atuação correta do relé diferencial.



Figura 100 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Na Figura 101 é possível notar a tensão, corrente e energia sobre o MOV para uma falta a 5% de distância da barra 1. Quando é percebido pelo MOV que o sistema está em falta, a tensão sobre ele o capacitor instalado tende a valores altíssimos o que causa o disparo e condução do dispositivo, entretanto, observa-se que a energia se estabiliza em um dado momento devido ao disparo do *Spark Gap*.



Figura 101 – Comportamento de tensão, corrente e energia no MOV, perante a uma falta a 5% de distância da barra 1.

Com a distância de falta a 50% da barra 1, têm-se os seguintes resultados vistos na Figura 102 para o relé de distância e na Figura 103 para o relé diferencial.



Figura 102 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 50% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 103 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 50% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



A tensão, corrente e energia sobre o MOV é observado na Figura 104.

Figura 104 – Comportamento de tensão, corrente e energia no MOV, perante a uma falta a 50% de distância da barra 1.

Para uma distância de falta a 95% da barra 1, é possível observar na Figura 105 que para o relé de distância ocorreu atuação, pois o relé deveria atuar em segunda zona e é possível notar amostras dentro da primeira zona.

Na Figura 106 é observado à tensão, corrente e energia sobre o MOV, notase que à medida que se aumenta a distância da falta do ponto de instalação dos sistemas de compensação menor é a energia dissipada.



Figura 105 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica a 95% de distância da barra 1, R_f = 0 Ω, com capacitores no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 106 – Comportamento de tensão, corrente e energia no MOV, perante a uma falta a 95% de distância da barra 1.

Para resultados de faltas fora dos limites de atuação dos relés, tem-se duas situações distintas, as faltas podem ocorrer antes a barra 1 como na Figura 107 ou posterior a barra 2, como mostrado na Figura 108, ambas referentes ao relé de distância.

Na Figura 109 é visto a operação do relé diferencial. O relé atua corretamente para a falta.



Figura 107 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica na barra1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 108 – Trajetória da impedância de falta, para falta monofásica na barra 2, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%



Figura 109 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta monofásica externa, $R_f = 0\Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Na Figura 110 e Figura 111 apresentam-se os resultados para relé diferencial para faltas a 5% e 95% de distância da barra 1 e com resistência de falta de 30Ω . É possível salientar que o relé diferencial não encontra dificuldades para atuar.



Figura 110 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica a 5% da barra 1, $R_f = 30\Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 111 – Relé diferencial no plano alfa modificado, falta monofásica a 95% da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50% prevendo entrada do MOV.

Na ocorrência de falta externa aos limites do TC, com resistência de terra a 30Ω, na Figura 112 ressaltam-se a operação correta do relé diferencial.



Figura 112 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta monofásica na barra 2, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

6.2.3. Faltas trifásicas com a presença do MOV e Spark Gap

Nas condições de falta trifásica, observa-se na Figura 113 e Figura 114 o relé diferencial para faltas trifásicas, sem resistência e com resistência, respectivamente. É possível notar eficiência em ambos os casos.



Figura 113 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta trifásica a 5% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 114 – Relé diferencial Ioperação x Irestrição para falta trifásica a 5% da barra 2, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Os resultados mostrados na Figura 115 e Figura 116 são referentes ao relé de distância mediante a uma falta próxima da barra 2, respectivamente para resistência nula e de 30Ω . Em ambos os caso o relé deveria atuar em segunda zona, entretanto, isso não ocorre, pois na primeira situação as amostras estão dentro da

zona 1, enquanto que na segunda situação as amostras estão fora da zona de atuação, resultando em atuação indevida em ambas as circunstâncias.



Figura 115 – Trajetória da impedância de falta, para falta trifásica a 95% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 116 – Trajetória da impedância de falta, para uma falta trifásica 95% de distância da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

A Figura 117 é importante, pois mostra a polarização do relé diferencial. Nas primeiras amostras de corrente é notória a presença do capacitor devido aos altos valores de corrente, após a atuação do MOV a polarização se estabiliza. Nota-se que os valores estão acima dos estabelecidos, acusando falta na linha.



Figura 117 – Corrente de polarização para uma falta trifásica à 76 km de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Na Figura 118 e Figura 119 são mostrados o comportamento do relé diferencial no plano alfa modificado para a falta a 76 km da barra 1 sem e com resistência de falta.



Figura 118 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica a 95% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 119 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica a 95% da barra 1, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Para faltas trifásicas fora dos limites de atuação dos relés, com resistência de falta igual a 30Ω . O relé diferencial permanece atuando corretamente em ambos os casos, como mostrado na Figura 120 e Figura 121 que evidenciam a falta externa sem e com resistência de falta.



Figura 120 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica na barra 2, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 121 – Relé diferencial no plano alfa modificado, para falta trifásica na barra 2, $R_f = 30 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha, grau de compensação de 50%.

Outro ponto a ser analisado são os resultados variando-se o local de inserção do capacitor, que é deslocado para a metade e final da linha.

Inicialmente com o capacitor instalado no meio da linha é possível observar que para uma falta anterior ao capacitor, conforme Figura 122, que o relé de distância não é afetado pela compensação da linha.



Figura 122 – Relé de distância, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados na metade da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

O relé diferencial também não tem dificuldade em detectar a falta, pode ser visualizada na Figura 123.



Figura 123 – Relé diferencial, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados na metade da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Quando a falta ocorre posterior ao capacitor, na segunda metade da linha, é possível constatar que a trajetória de impedâncias dentro da zona de atuação possui uma trajetória espiral, reflexos das frequências sub-harmônicas proporcionadas pela inserção dos capacitores. É possível observar também um pequeno erro de alcance do relé. Essas afirmações podem ser visualizadas na Figura 124.



Figura 124 – Relé de distância, para falta monofásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados na metade da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

O relé diferencial, mais uma vez se mostra imune com relação à variação da posição de instalação dos capacitores. Na Figura 125 é mostrado o resultado pertinentes a esse relé.



Figura 125 – Relé diferencial, para falta monofásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados na metade da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Para faltas trifásicas na primeira metade da linha, assim como para faltas monofásicas o relé de distância não encontra dificuldades em sanar a falta, assim como pode ser visto na Figura 126.



Figura 126 – Relé de distância, para falta trifásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados na metade da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

O relé diferencial também opera corretamente, como visualizado na Figura 127.



Figura 127 – Relé diferencial, para falta trifásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0\Omega$, com capacitores instalados na metade da linha e grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Para faltas posteriores ao capacitor a 80% de distância da barra 1 é importante ressaltar a grande influência do capacitor nos resultados. Na Figura 128 é mostrado o resultado do relé de distância e na Figura 129 os resultados para o relé diferencial.



Figura 128- Relé de distância, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, R_f = 0 Ω, com capacitores instalados na metade da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 129 – Relé diferencial, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, R_f = 0 Ω, com capacitores instalados na metade da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Quando o capacitor é inserido no final da linha, para uma falta a 20% de distância da barra 1, os resultados permanecem como descritos, quando a falta ocorre anterior ao capacitor, os efeitos da compensação são minimizados para o relé de distância, enquanto que para o relé diferencial a posição do capacitor não influência nos resultados da proteção.

Na Figura 130 é visualizado o resultado referente ao relé de distância, enquanto que na Figura 131 o resultado referente ao relé diferencial, para evidenciar o resultado do relé diferencial a Figura 132 demonstra o comparador de fases.



Figura 130 – Relé de distância, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 131 – Relé diferencial, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 132 – Comparador de fases, para falta monofásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha e grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Quando a falta ocorre a 80% de distância da barra 1, com os capacitores instalados ao final da linha, observa-se pela Figura 133 uma atuação correta em primeira zona relé de distância.



Figura 133 – Relé de distância, para falta monofásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

O relé diferencial não encontra dificuldades para identificar a falta, conforme mostrado na Figura 134.



Figura 134 – Relé diferencial, para falta monofásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Para faltas trifásicas na primeira metade da linha, assim como para faltas monofásica o relé de distância não encontra dificuldade. Como o capacitor está no final da linha, não influência a equação final, conforme Figura 135.



Figura 135 – Relé de distância, para falta trifásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0\Omega$, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Para o relé diferencial, os resultados são mostrados na Figura 136 e Figura 137 que retratam respectivamente o relé diferencial no plano alfa modificado e o comparador de fases. Observa-se que ambas as figuras ressaltam o desempenho satisfatório do relé diferencial.



Figura 136 – Relé diferencial, para falta trifásica a 20% de distância da barra 1, R_f = 0 Ω, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.



Figura 137 – Comparador de fases, para uma falta trifásica a 20% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha e grau de compensação de 50%.

Para faltas trifásicas na segunda metade da linha, assim como para faltas monofásica o relé de distância não encontra dificuldade em sanar a falta. As conclusões podem ser vistas na Figura 138.



Figura 138 – Relé de distância, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Os resultados da Figura 139 trazem testes realizados com o relé diferencial e ressaltam o bom desempenho do relé.



Figura 139 – Relé diferencial plano alfa modificado, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%, prevendo entrada do MOV.

Em caso de saturação do transformador de corrente a onda referentes aos TCs são modificadas, como se observa na Figura 140, onde ocorre a saturação em apenas um dos transformadores.



Figura 140 – Correntes trifásicas na saída dos TCs, com saturação do TC 2, após a falta monofásica a 80% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha e com grau de compensação de 50%.

Nesse caso, o relé diferencial pode ser prejudicado por trabalhar com a comparação das amostras dos transdutores. Observa-se na Figura 141 que as amostras estão bem próximas da região em que o relé não atuaria.



Figura 141 – Relé diferencial plano alfa, falta trifásica a 80% de distância da barra 1, com saturação do TC 2, R_f = 0 Ω, com capacitores instalados ao final da linha e grau de compensação de 50%.

Para casos em que ocorra a saturação do transformador de corrente a análise no plano alfa modificado é indicada, pois sua região delimitada acolhe melhor as amostras de falta, como observado na Figura 142.



Figura 142 – Relé diferencial plano alfa modificado, falta trifásica a 80% de distância da barra 1, com saturação do TC 2, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha e grau de compensação de 50%.

Na Figura 143 e Figura 144, são mostradas respectivamente uma falta na barra 1 e 2, fora dos limites de atuação do relé diferencial e com apenas transformador de corrente da barra 1 saturado.



Figura 143 – Relé diferencial plano alfa modificado, para falta trifásica a barra 1, com saturação do TC 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%.



Figura 144 – Relé diferencial plano alfa modificado, para falta trifásica a barra 2, com saturação do TC 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados ao final da linha, grau de compensação de 50%.

É possível notar que para esses casos o relé diferencial não se comporta de forma adequada. Sendo a maior dificuldade encontrada pelo relé diferencial.

Na Figura 145 é apresentada a forma de onda nos TCs quando ocorre a saturação de ambos os lados dos transdutores.



Figura 145 – Correntes trifásicas na saída dos Tcs, com saturação do TC 1 e TC 2, falta monofásica a 80% da barra 1, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores instalados no início da linha e com grau de compensação de 50%.

Na Figura 146, nota-se a atuação correta do relé diferencial, a saturação de ambos os TCs não causam danos severos a atuação do relé diferencial.



Figura 146 – Relé diferencial plano alfa modificado, para falta trifásica a 80% de distância da barra 1, com saturação do TC1 e TC 2, $R_f = 0 \Omega$, com capacitores ao final da linha, grau de compensação de 50%.

Na Tabela 6, é mostrado um resumo de atuação dos relés de distância e diferencial para linha sem a compensação, enquanto que na Tabela 7 é apresentado o resultado das faltas simuladas guando se insere os capacitores na linha.

		Relé Distância		Relé Diferencial					
	Nº de Faltas	Atuação correta	% Acertos	Nº de Faltas	Atuação correta	% Acertos			
Falta Fase – Terra	28	21	75,00%	30	30	100,00%			
Falta Fase-Fase-Terra	9	7	77,77%	9	9	100,00%			
Falta Trifásicas	21	17	80,95%	30	30	100,00%			
Total	58	45	77,58%	69	69	100,00%			

Tabela 6 - Resumo de atuações dos relés para faltas sem a compensação

Tabela 7 – Resumo de atuações dos relés para faltas com a compensação

Tipo de Falta Fase – Terra Fase – Fase – Terra Trifásica – Terra		Relé Distância		Relé Diferencial				
	Nº de Faltas	Atuação correta	% Acertos	Nº de Faltas	Atuação correta	% Acertos		
Fase – Terra	45	30	66,66%	51	51	100,00%		
Fase – Fase – Terra	14	10	71,42%	19	19	100,00%		
Trifásica – Terra	53	25	47,16%	62	60	96,77%		
Total	112	55	49,10%	132	130	98,48%		

É possível constatar através das tabelas que o capacitor interfere significativamente na proteção de distância, fazendo com que a taxa de acertos do relé de distância diminua. Vale ressaltar que a proteção de distância foi inserida de forma convencional, sendo necessário para aplicação de linha compensadas ajustes, alem de curvas quadrilaterais para proteção fase-terra.

Em relação ao relé diferencial, esse é pouco afetado pela inserção dos capacitores série e continua a desempenhar resultados satisfatórios para proteção da linha.

7 conclusões

A dissertação proposta faz uma comparação de algoritmos numéricos de proteção aplicados a linhas de transmissão compensadas. Foram analisados os algoritmos de relé de distância com curva convencional mho utilizando Fourier de um ciclo e o relé diferencial com análises nos planos: operacional, alfa e alfa com características melhoradas. Também, em alguns casos, foi aplicado um comparador.

Foram simulados diversos tipos de faltas em um sistema modelado através do *software* ATP, primeiramente, sem a compensação série e, em seguida, com a compensação. Inicialmente, sem a presença do capacitor série, ambos os relés se comportaram de forma adequada. A maior dificuldade encontrada pelo relé de distância foi em faltas com resistência, como já era de se esperar, pois a curva utilizada é mho, sugerindo-se nestes casos a utilização de uma curva simultânea quadrilateral para proteção de falta fase-terra. O relé diferencial, tanto no plano operacional quanto nos planos alfas não encontrou dificuldade, sendo efetivo em 100% dos casos simulados.

Posteriormente, quando são inseridos os capacitores na linha de transmissão, os ajustes do relé de distância são prejudicados, devido aos efeitos causados pela inserção da compensação. O relé de distância é altamente dependente da impedância da linha, que é modificada com inserção dos capacitores série, sendo que este relé se mostra instável em muitas faltas em linhas compensadas, atuando incorretamente em muitos casos testados. A utilização dessa proteção para linhas compensadas não é vetada, mas se deve avaliar o tipo de proteção dos capacitores, grau de compensação e local de instalação, para que sejam realizados ajustes adequados.

Quando se protege os capacitores com MOV (*Metal Oxide Varistor*) os resultados são mais satisfatórios, pois ocorre a retirada mais efetiva do banco de capacitores poucos ciclos após a ocorrência da falta.

À medida que se aumenta o grau de compensação, os efeitos de inversão de corrente são maiores, tornando o relé incapaz de identificar a falta em suas zonas de atuação. Uma boa solução para esses casos são as polarizações por memória e cruzada. Conclui-se também, que para proteção de distância, com os capacitores instalados ao final da linha, os efeitos da compensação série são minimizados.

Quanto à utilização do relé diferencial em linhas de transmissão compensadas, os bons resultados se comprovaram nos testes realizados. O algoritmo diferencial detectou praticamente todas as faltas testadas, se mostrando altamente seletivo e, além disso, indicou robustez mesmo em faltas com resistências, não sendo influenciado inclusive pela forma de proteção do banco de capacitores.

O caso mais crítico para o relé diferencial foi à saturação de apenas um dos transformados do trecho protegido, nesses casos testados o relé diferencial não se comporta de forma adequada. Nessa situação, a utilização do plano alfa com características melhoradas é aconselhável, pois acomoda melhor as amostras de falta.

O relé diferencial se mostra promissor para proteção de linhas de transmissão, pois problemas relacionados com sincronismos das amostras coletadas pelos transformadores de corrente são atualmente incipientes para linhas curtas.

Como sugestões investigativas, alguns temas podem ser citados:

- Aplicação de algoritmos baseados em redes neurais, lógica *fuzzy* e Transformada Wavelet para linhas compensadas.
- Interação dos relés com conceitos de compensação série, baseados na utilização de elementos FACT's.
- Sistemas de comunicação na aplicação da proteção diferencial para proteção de linhas de transmissão longas.
- Técnicas de proteção adaptativa para linhas compensadas.
- Formas de polarização, que possam melhorar o desempenho da proteção de distância aplicada a proteção de linhas compensadas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1. COURY, D. V. Introdução aos Sistemas Elétricos de Potência, Escola de Engenharia de São Carlos (EESP), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2002.
- SWITCHGEAR CCOMMITTEE OF THE IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. IEEE Standard Definitions for Power Switchgear. New York: Institute ofElectrical and Electronica Engineers, 1992. Disponível em: <<u>http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=182886</u>>.
- 3. HEWITSON, L.; BROWN, M.; RAMESH, B. **Practical Power Systems Protection**. Netherlands: Elsevier, 2004.
- 4. FRONTIN, S. de O (org.). Equipamentos de alta tensão prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Teixeira, 2013. 934 p.: il.
- 5. OLIVEIRA, A. L. P. de. Avaliação do comportamento da proteção de distância em linhas de transmissão com compensação série fixa através da simulação digital em tempo real. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá (MG), 2007.Disponível em:<<u>http://www.gqee.unifei.edu.br/arquivos_upload/mesdou/43/43.pdf</u>>.
- 6. LAMBERT, J.; PHADKE, A. G.; MCNABB, D. Accurate voltage phasor measurement in a series-compensated network. IEEE Transactionson Power Delivery, v. 9, n. 1, p. 501-509, Jan. 1994.
- LIMA, M. M. M. Alguns fatores afetando o desempenho de relés de distância. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,2006. Disponível em: <<u>http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2006092802.pdf</u>>
- 8. MOURA, D. S.; MOREIRA, F. A.; SILVA, K. M. **Avaliação do impacto da compensação** série na proteção de distância de linhas de transmissão usando estimação e fasores. In IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Goiânia-GO. Vol. Único.
- MAN, B. J.; MORRISON, J. F. (1971) Digital Calculation of Impedance for Transmission Line Protection, IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, v. PAS-90, p. 270-279.
- GILCHRIST, G. B.; ROCKEFELER, G. D.; UDREN, E. A. (1972) High Speed Distance Relaying Using a Digital Computer – Parts I and II, IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-91, no 3, pp. 1235-1258.

- PHADKE, A.G.; IBRAHIM, M.; HLIBKA, T. Fundamental Basis for Distance Relaying with Symmetrical Components, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No.2, Março/Abril 1977.
- SACHDEV, M.S.; BARIBEAU, M.A. (1979). A New Algorithm for Digital Impedance Relays, IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, no 6, pp. 2232-2240.
- 13. BOZOKI, B. ; BURZESE, A.A.; DISANTE, H.; FOHEY, J.; HASENWINKLE, I.O.; LATHAM, J.R.; MARSH JR, W.J.; MOZINA, C.J.; SANFORD, D.E.; SCHULZE, L.J.; TAYLOR, R.P. and ZANDER, T.A. Line Protection Design Trends In the Usa And Canada, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, n° 4, Oct. 1988.
- BHATTI, A. A. Performace Analysis Of Microcomputer Based Differential Protection Of UHV Lines Under Selective Phase Switching, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990.
- 15. PEREIRA, C.; CRUZ, F. C. (1998). Análise do desempenho de quatro filtros digitais de Fourier para proteção de distância de linhas de transmissão, In VI STPC - SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE, Natal. Vol. Único, p. 01-07.
- 16. NGUYEN, T.T. Dynamic Responses Of change Comparison Digital Differential Protection For Transmission Lines, Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM 2000, Hong Kong, Oct2000.
- 17. ITO, H.; SHUTO,I.; AYAKAWA, H.; BEAUMONT, P.; OKUNO, K. Development Of An Improved Multifunction High Speed Operating Current Differential Relay For Transmission Line Protection, Developments in Power System Protection, Conference Publication No.479 0 IEE 2001.
- COURY, D. V, NAVARRO, E. C. Um algoritmo para proteção diferencial digital de linhas de transmissão compensadas, SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Out, 2003, Uberlândia – Minas Gerais, Brasil.
- NAVARRO, E. C.; COURY, D. V; ORDACGI, J. M.; MORAES, R. M. Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão Análise no Plano α, VII Seminário Técnico de Proteção e Controle, Jun, 2003, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.
- 20. DUTRA, R. A.; SANTOS, L. F.; JÚNIOR, G. C. Soluções de Aplicações de Sistemas de Proteção de Distância em Linhas com Compensação Série, VIII Seminário Técnico de Proteção e Controle, Jun/Jul, 2005, Rio de Janeiro – RJ.
- 21. SANTOS, L. F.; SILVEIRA, P. M. Evaluation of Numerical Distance Protection Algorithms for Series Compensated Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, nº 6, 2006.
- 22. REN, Y. L.; BO, Z. Q.; HE, J. H.; KLIMEK, A. An Integrated Relay for Differential Protection of Transmission Lines, IEEE Transactions on Power Delivery, 78-1-4244-1762, Set. 2008.

- 23. DAMBHARE, S.; SOMAN, S. A.; CHANDORKAR, M. C. Current Differential Protection of Transmission Line Using the Moving Window Averaging Technique, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, n° 2, April. 2010.
- 24. BEJMERT, D.; REBIZANT, W.; WISZNIEWSKI, A. Enhanced Differential Protection Algorithm for Tapped Transmission Lines, IEEE Trondheim Power Tech, 2011.
- 25. YUAN, Z.; ZHANG, C. Studies of an Algorithm of High Speed Travelling Wave Differential Protection for EHV/UHV Transmission Line, IEEE Transactions on Power Delivery, 2012.
- 26. NAVARRO, E. C. Proteção diferencial digital de linhas de transmissão com compensação série. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica): Universidade Federal de São Carlos, São Carlos (SP), 2002.
- 27. DA SILVA, R. L. F. P. Estudos da capacidade de transporte em linhas de transmissão utilizando ferramentas de otimização. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica): Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em:<<u>http://bdtd.bce.unb.br/tedesimplificado/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=4223</u>>.
- 28. AGUIAR, L. B. Um estudo de colapso de tensão em linhas de transmissão de energia utilizando as constantes generalizadas, gráficos tensão x potência e diagramas hiperbólicos. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica): Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011. Disponível em: <<u>http://www.ppgee.eng.ufba.br/teses/3dfe174374e23469f4d593e434dc904d.pdf</u>>
- 29. D'AJUZ, A. (org.). Equipamentos elétricos Especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro, Furnas 1985. 300 p.: il.
- 30. DUTRA, R. A.; SANTOS, L. F.; (2005). Soluções de Aplicação de Sistemas de Proteção de Distância em Linhas com Compensação Série, In VIII STPC - SEMINÁRIO TÉCNICO DE PROTEÇÃO E CONTROLE, Rio de Janeiro, RJ. Vol. Único, p. 01-06.
- 31. KINDERMAN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. v. 1, Edição do Autor, Florianópolis, 2005.
- 32. MARDEGAN, C. Proteção e seletividade Capítulo III Dispositivos de proteção Parte 1, Revista o setor elétrico, Ed. 50, 2010. Disponível em:< <u>http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/640-capitulo-iii-dispositivos-de-protecao-parte-i.html</u> >.
- 33. HEWITSON, L.G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. Pratical Power System Protection. Ed. 1. Netherlands, Elsever, 2004.
- 34. Schweitzer Engineering Laboratories. Disponível em: <a href="http://www2.selinc.com.br/imagens/museu/mus
- 35. Schweitzer Engineering Laboratories. Disponível em: <<u>http://www.selinc.com.br/Produtos/SEL-387L.aspx</u>>

- 36. MAMEDE, F. J.; RIBEIRO, M. D. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- 37. ROBERTS, J.; GUZMAN, A.; SCHWEITZER, E. O. Z = V/I Não faz um relé de distância.
 20th Annual Western Protective Relay Conference, Washington, EUA, October 19 21, 1993. Disponível em: <<u>http://www.selinc.com.br</u>>.
- 38. GONÇALVES, E. M. Metodologias para validação de proteções de linhas de Transmissão. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. Disponível em: <<u>http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-</u> <u>92WFG8/disserta_o_de_mestrado_eduardo_vf.pdf?sequence=1</u>>.
- 39. SIQUEIRA, M. Da C. Desempenho da proteção de distância sob diferentes formas de polarização. 2007. Dissertação (Mestrado Engenharia Elétrica): COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<u>http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2007092001.pdf</u>>.
- 40. SANTOS, L. F. Avaliação de algoritmos numéricos de proteção para linhas com compensação série. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica): Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá (MG), 2006. Disponível em: <<u>http://saturno.unifei.edu.br/bim/0030641.pdf</u>>.
- 41. WARRINGTON, Albert Russell van Cortlandt. **Protective Relays Their Theory and Practice,** Chapman & Hall, 1978.
- 42. TZIOUVARAS, D. A.; ALTUVE, H.; BENMOUYAL, G.; ROBERTS, J. Line differential protection with an enhanced characteristic, SEL: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- 43. MOLAS, E. C.; DA SILVA, K. M.; KUSEL, B. F. **Teoria de Comparadores Aplicada na Avaliação da Atuação da Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão no Plano Alfa**. XIX Congresso Brasileiro de Automática, Set, 2012, Campina Grande – SP, Brasil.

Faltas Sem a compensação											
Nº Cont.	Тіро	R(Ω)	Dist. B1	C. Linha				Dif. Atua.	Est.	Dist. Atua.	Est
falta 1	φ1-T	0Ω	4km	80km				Atua	С	1º zona	С
falta 2	φ1-T	0Ω	40km	80km				Atua	С	1º zona	С
falta 3	φ1-T	0Ω	76km	80km				Atua	С	2º zona	С
falta 4	φ1-T	10Ω	4km	80km				Atua	С	1º zona	С
falta 5	φ1-T	10Ω	40km	80km				Atua	С	1º zona	С
falta 6	φ1-T	10Ω	76km	80km				Atua	С	2º zona	С
falta 7	φ1-T	30Ω	4km	80km				Atua	С	2º zona	
falta 8	φ1-T	30Ω	40km	80km				Atua	С	2º zona	
falta 9	φ1-T	30Ω	76km	80km				Atua	С	Não Atua	1
falta 10	Ext. B.1	0Ω	-	80km				Não Atua	С	Não Atua	С
falta 11	Ext. B.1	10Ω	-	80km				Não Atua	С	Não Atua	С
falta 12	Ext. B.1	30Ω	-	80km				Não Atua	С	Não Atua	С
falta 13	Ext. B.2	0Ω	-	80km				Não Atua	С	2º zona	С
falta 14	Ext. B.2	10Ω	-	80km				Não Atua	С	2º zona	С
falta 15	Ext. B.2	30Ω	-	80km				Não Atua	С	Não Atua	I
falta 16	φ1-T	0Ω	4km	200km				Atua	С	1º zona	С
falta 17	φ1-T	0Ω	40km	200km				Atua	С	1º zona	С
falta 18	φ1-T	0Ω	76km	200km				Atua	С	2º zona	С
falta 19	φ1-T	10Ω	4km	200km				Atua	С	1º zona	С
falta 20	φ1-T	10Ω	40km	200km				Atua	С	1º zona	С
falta 21	φ1-T	10Ω	76km	200km				Atua	С	2º zona	С
falta 22	φ1-T	30Ω	4km	200km				Atua	С	1º zona	С
falta 23	φ1-T	30Ω	40km	200km				Atua	С	2º zona	I
falta 24	φ1-T	30Ω	76km	200km				Atua	С	Não Atua	
falta 25	Ext. B.1	0Ω	-	200km				Não Atua	С	Não Atua	С
falta 26	Ext. B.1	10Ω	-	200km				Não Atua	С	-	
falta 27	Ext. B.1	30Ω	-	200km				Não Atua	С	Não Atua	С
falta 28	Ext. B.2	0Ω	-	200km				Não Atua	С	2º zona	С
falta 29	Ext. B.2	10Ω	-	200km				Não Atua	С	-	
falta 30	Ext. B.2	30Ω	-	200km				Não Atua	С	Não Atua	
falta 31	ф2-Т	0Ω	4km	80km				atua	С	1º zona	С
falta 32	ф2-Т	0Ω	40km	80km				atua	С	1º zona	С
falta 33	ф2-Т	0Ω	76km	80km				atua	С	2º zona	С
falta 34	ф2-Т	10Ω	4km	80km				atua	С	1º zona	С
falta 35	ф2-Т	10Ω	40km	80km				atua	С	1º zona	С
falta 36	ф2-Т	10Ω	76km	80km				atua	С	2º zona	С
falta 37	ф2-Т	30Ω	4km	80km				atua	С		
falta 38	ф2-Т	30Ω	40km	80km				atua	С	Não Atua	1
falta 39	ф2-Т	30Ω	76km	80km				atua	С	Não Atua	I

<u> Anexo I – Resumo de faltas simuladas</u>

Faltas Sem a compensação												
Nº Cont.	Тіро	R(Ω)	Dist. B1	C. Linha					Dif. Atua.	Est.	Dist. Atua.	Est
falta 40	ф3-Т	0Ω	4km	80km					atua	С	1º zona	С
falta 41	ф3-Т	0Ω	40km	80km					atua	С	1º zona	С
falta 42	ф3-Т	0Ω	76km	80km					atua	С	2º zona	С
falta 43	ф3-Т	10Ω	4km	80km					atua	С	1º zona	С
falta 44	ф3-Т	10Ω	40km	80km					atua	С	2º zona	1
falta 45	ф3-Т	10Ω	76km	80km					atua	С	2º zona	С
falta 46	ф3-Т	30Ω	4km	80km					atua	С	Não Atua	I
falta 47	ф3-Т	30Ω	40km	80km					atua	С	Não Atua	I
falta 48	ф3-Т	30Ω	76km	80km					atua	С	Não Atua	
falta 49	Ext. B.1	0Ω	-	80km					Não Atua	С	Não Atua	С
falta 50	Ext. B.1	10Ω	-	80km					Não Atua	С	Não Atua	С
falta 51	Ext. B.1	30Ω	-	80km					Não Atua	С	Não Atua	С
falta 52	Ext. B.2	0Ω	-	80km					Não Atua	С	-	
falta 53	Ext. B.2	10Ω	-	80km					Não Atua	С	-	
falta 54	Ext. B.2	30Ω	-	80km					Não Atua	С	-	
falta 55	ф3-Т	0Ω	4km	200km					Atua	С	1º zona	С
falta 56	ф3-Т	0Ω	40km	200km					Atua	С	1º zona	С
falta 57	ф3-Т	0Ω	76km	200km					Atua	С	2º zona	С
falta 58	ф3-Т	10Ω	4km	200km					Atua	С	1º zona	С
falta 59	ф3-Т	10Ω	40km	200km					Atua	С	1º zona	С
falta 60	ф3-Т	10Ω	76km	200km					Atua	С	2º zona	С
falta 61	ф3-Т	30Ω	4km	200km					Atua	С	2º zona	I
falta 62	ф3-Т	30Ω	40km	200km					Atua	С	2º zona	I
falta 63	ф3-Т	30Ω	76km	200km					Atua	С	-	
falta 64	Ext. B.1	0Ω	-	200km					Não Atua	С	-	
falta 65	Ext. B.1	10Ω	-	200km					Não Atua	С	-	
falta 66	Ext. B.1	30Ω	-	200km					Não Atua	С	-	
falta 67	Ext. B.2	0Ω	-	200km					Não Atua	С	-	
falta 68	Ext. B.2	10Ω	-	200km					Não Atua	С	-	
falta 69	Ext. B.2	30Ω	-	200km					Não Atua	С	-	
				Fa	altas co	m a con	npens	ação				
Nº Cont.	TIPO	R.	Dist. B1	C. Linha	S. MOV	C. MOV	Cap.	Sat. TC1-TC2	Dif. Atua.	Est.	Dist. Atua.	Est.
Falta 70	φ1-T	0Ω	4km	80km	х		Início		Atua	С	Não Atua	I
Falta 71	φ1-T	0Ω	40km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 72	φ1-T	0Ω	76km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	- I
Falta 76	φ1-T	10Ω	4km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 77	φ1-T	10Ω	40km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 78	φ1-T	10Ω	76km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	I
Falta 82	φ1-T	30Ω	4km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 83	φ1-T	30Ω	40km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 84	φ1-T	30Ω	76km	80km	х		Início		Atua	С	2º zona	С
Falta 88	Ext. B.1	0Ω	-	80km	x		Início		Não Atua	С	Não Atua	С

Faltas com a compensação												
Nº Cont.	TIPO	R.	Dist. B1	C. Linha	S. MOV	C. MOV	Cap.	Sat. TC1-TC2	Dif. Atua.	Est.	Dist. Atua.	Est.
Falta 90	Ext. B.2	0Ω	-	80km	х		Início		Não Atua	С	1º zona	-
Falta 92	ф2-Т	0Ω	4km	80km	х		Início		Atua	С	Não Atua	I
Falta 93	ф2-Т	0Ω	40km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 94	ф2-Т	0Ω	76km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	-
Falta 98	ф2-Т	30Ω	4km	80km	х		Início		Atua	С		
Falta 100	ф2-Т	30Ω	76km	80km	x		Início		Atua	С	2º zona	С
Falta 101	ф3-Т	0Ω	4km	80km	x		Início		Atua	С	Não Atua	I
Falta 102	ф3-Т	0Ω	40km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 103	ф3-Т	0Ω	76km	80km	х		Início		Atua	С	1º zona	-
Falta 107	ф3-Т	30Ω	4km	80km	х		Início		Atua	С	2º zona	1
Falta 108	ф3-Т	30Ω	40km	80km	х		Início		Atua	С	2º zona	1
Falta 109	ф3-Т	30Ω	76km	80km	х		Início		Atua	С	Não Atua	1
Falta 121	φ1-T	0Ω	4km	80km	х		Início	х	Atua	С	1º zona	С
Falta 122	φ1-T	0Ω	40km	80km	х		Início	х	Atua	С	1º zona	С
Falta 123	φ1-T	0Ω	76km	80km	х		Início	х	Atua	С	2º zona	С
Falta 73	φ1-T	0Ω	4km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 74	φ1-T	0Ω	40km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 75	φ1-T	0Ω	76km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	I
Falta 79	φ1-T	10Ω	4km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 80	φ1-T	10Ω	40km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 81	φ1-T	10Ω	76km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	1
Falta 85	φ1-T	30Ω	4km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 86	φ1-T	30Ω	40km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 87	φ1-T	30Ω	76km	80km		x	Início		Atua	С	2º zona	С
Falta 89	Ext. B.1	30Ω	-	80km		x	Início		Não Atua	С	Não Atua	С
Falta 91	Ext. B.2	30Ω	-	80km		x	Início		Não Atua	С	2º zona	С
Falta 95	ф2-Т	10Ω	4km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 96	ф2-Т	10Ω	40km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 97	ф2-Т	10Ω	76km	80km		x	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 99	ф2-Т	30Ω	40km	80km		х	Início		Atua	С	2º zona	- 1
Falta 104	ф3-Т	0Ω	4km	80km		х	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 105	ф3-Т	0Ω	40km	80km		х	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 106	ф3-Т	0Ω	76km	80km		х	Início		Atua	С	1º zona	I
Falta 110	ф3-Т	30Ω	4km	80km		х	Início		Atua	С	2º zona	- 1
Falta 111	ф3-Т	30Ω	40km	80km		х	Início		Atua	С	2º zona	- 1
Falta 112	ф3-Т	30Ω	76km	80km		х	Início		Atua	С	Não Atua	I
Falta 113	Ext. B.1	0Ω	-	80km		х	Início		Não Atua	С	Não Atua	С
Falta 114	Ext. B.1	30Ω	-	80km		х	Início		Não Atua	С	Não Atua	С
Falta 115	Ext. B.2	0Ω	-	80km		х	Início		Não Atua	С	-	
Falta 116	Ext. B.2	30Ω	-	80km		х	Início		Não Atua	С	-	
Falta 117	ф3-Т	0Ω	4km	200km		х	Início		Atua	С	1º zona	С
Falta 118	ф3-Т	0Ω	76km	200km		x	Início		Atua	С	2º zona	С

Faltas com a compensação												
Nº Cont.	TIPO	R.	Dist. B1	C. Linha	S. MOV	C. MOV	Cap.	Sat. TC1-TC2	Dif. Atua.	Est.	Dist. Atua.	Est.
Falta 119	ф3-Т	30Ω	4km	200km		х	Início		Atua	С	2º zona	-
Falta 120	ф3-Т	30Ω	76km	200km		x	Início		Atua	С	Não Atua	I
Falta 124	ф3-Т	0Ω	4km	80km		х	Início	хх	Atua	С	-	
Falta 125	ф3-Т	0Ω	40km	80km		х	Início	xx	Atua	С	-	
Falta 126	ф3-Т	0Ω	76km	80km		х	Início	хх	Atua	С	-	
Falta 127	ф3-Т	0Ω	4km	80km		х	Início	х	Atua	С	1º zona	С
Falta 128	ф3-Т	0Ω	40km	80km		х	Início	х	Atua	С	1º zona	С
Falta 129	ф3-Т	0Ω	76km	80km		x	Início	х	Atua	С	2º zona	С
Falta 130	φ1-T	0Ω	4km	80km	х		Meio		Atua	С	1º zona	С
Falta 131	φ1-T	0Ω	76km	80km	x		Meio		Atua	С	1º zona	-
Falta 135	φ1-T	30Ω	4km	80km	x		Meio		Atua	С	1º zona	С
Falta 136	φ1-T	30Ω	76km	80km	х		Meio		Atua	С	2º zona	С
Falta 139	Ext. B.1	0Ω	-	80km	х		Meio		Atua	С	-	
Falta 144	ф2-Т	30Ω	4km	80km	х		Meio		Atua	С	1º zona	С
Falta 145	ф2-Т	30Ω	40km	80km	Х		Meio		Atua	С	-	
Falta 146	ф2-Т	30Ω	76km	80km	Х		Meio		Atua	С		
Falta 159	φ1-T	0Ω	4km	80km	х		Meio	х	Atua	С	-	
Falta 160	φ1-T	0Ω	76km	80km	х		Meio	х	Atua	С	-	
Falta 132	φ1-T	0Ω	4km	80km		x	Meio		Atua	С	1º zona	С
Falta 133	φ1-T	0Ω	40km	80km		x	Meio		Atua	С	-	
Falta 134	φ1-T	0Ω	76km	80km		х	Meio		Atua	С	1º zona	I
Falta 137	φ1-T	30Ω	4km	80km		х	Meio		Atua	С	1º zona	С
Falta 138	φ1-T	30Ω	76km	80km		х	Meio		Atua	С	Não Atua	I
Falta 140	Ext. B.1	30Ω	-	80km		х	Meio		Atua	С	-	
Falta 141	ф2-Т	0Ω	4km	80km		х	Meio		Atua	С	1º zona	С
Falta 142	ф2-Т	0Ω	40km	80km		х	Meio		Atua	С	-	
Falta 143	ф2-Т	0Ω	76km	80km		х	Meio		Atua	С	2º zona	С
Falta 147	ф3-Т	0Ω	4km	80km		х	Meio		Atua	С	1º zona	С
Falta 148	ф3-Т	0Ω	76km	80km		x	Meio		Atua	С	1º zona	I
Falta 149	ф3-Т	30Ω	4km	80km		х	Meio		Atua	С	Não Atua	I
Falta 150	ф3-Т	30Ω	76km	80km		х	Meio		Atua	С	Não Atua	-
Falta 151	Ext. B.1	0Ω	-	200km		х	Meio		Não Atua	С	Não Atua	С
Falta 152	Ext. B.1	30Ω	-	200km		х	Meio		Não Atua	С	Não Atua	С
Falta 153	Ext. B.2	0Ω	-	200km		х	Meio		Não Atua	С	1º zona	- 1
Falta 154	Ext. B.2	30Ω	-	200km		х	Meio		Não Atua	С	2º zona	С
Falta 155	ф3-Т	0Ω	4km	200km		х	Meio		Atua	С	1º zona	С
Falta 156	ф3-Т	0Ω	76km	200km		х	Meio		Atua	С	1º zona	I
Falta 157	ф3-Т	30Ω	4km	200km		х	Meio		Atua	С	1º zona	С
Falta 158	ф3-Т	30Ω	76km	200km		х	Meio		Atua	С	2º zona	С
Falta 161	ф3-Т	0Ω	4km	80km		х	Meio	xx	Atua	С	-	
Falta 162	ф3-Т	0Ω	76km	80km		х	Meio	ХХ	Atua	С	-	
Falta 163	ф3-Т	0Ω	4km	80km		x	Meio	х	Atua	С	1º zona	С

Faltas com a compensação												
Nº Cont.	TIPO	R.	Dist. B1	C. Linha	S. MOV	C. MOV	Cap.	Sat. TC1-TC2	Dif. Atua.	Est.	Dist. Atua.	Est.
Falta 164	ф3-Т	0Ω	76km	80km		х	Meio	х	Atua	С	2º zona	С
Falta 165	φ1-T	0Ω	4km	80km		х	Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 166	φ1-T	0Ω	40km	80km		х	Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 167	φ1-T	0Ω	76km	80km		х	Final		Atua	С	1º zona	I
Falta 168	φ1-T	30Ω	4km	80km	х		Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 169	φ1-T	30Ω	40km	80km	х		Final		Atua	С	2º zona	I
Falta 170	φ1-T	30Ω	76km	80km	х		Final		Atua	С	Não Atua	I
Falta 174	Ext. B.1	0Ω	-	80km	x		Final		Não Atua	С	Não Atua	С
Falta 176	Ext. B.2	0Ω	-	80km	x		Final		Não Atua	С	-	
Falta 178	ф2-Т	0Ω	4km	80km	x		Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 179	ф2-Т	0Ω	76km	80km	x		Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 180	ф2-Т	30Ω	4km	80km	x		Final		Atua	С		
Falta 181	ф2-Т	30Ω	76km	80km	x		Final		Atua	С	Não Atua	- I
Falta 182	ф3-Т	0Ω	4km	80km	x		Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 183	ф3-Т	0Ω	40km	80km	x		Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 184	ф3-Т	0Ω	76km	80km	x		Final		Atua	С	1º zona	I
Falta 188	ф3-Т	30Ω	4km	80km	x		Final		Atua	С	Não Atua	I
Falta 189	ф3-Т	30Ω	40km	80km	x		Final		Atua	С	Não Atua	- I
Falta 190	ф3-Т	30Ω	76km	80km	x		Final		Atua	С	Não Atua	- I
Falta 171	φ1-T	30Ω	4km	80km		х	Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 172	φ1-T	30Ω	40km	80km		x	Final		Atua	С	2º zona	I
Falta 173	φ1-T	30Ω	76km	80km		x	Final		Atua	С	Não Atua	1
Falta 175	Ext. B.1	30Ω	-	80km		х	Final		Não Atua	С	Não Atua	С
Falta 177	Ext. B.2	30Ω	-	80km		х	Final		Não Atua	С	Não Atua	1
Falta 185	ф3-Т	0Ω	4km	80km		х	Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 186	ф3-Т	0Ω	40km	80km		х	Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 187	ф3-Т	0Ω	76km	80km		х	Final		Atua	С	1º zona	I
Falta 191	ф3-Т	30Ω	4km	80km		х	Final		Atua	С	Não Atua	I
Falta 192	ф3-Т	30Ω	40km	80km		х	Final		Atua	С	Não Atua	I
Falta 193	ф3-Т	30Ω	76km	80km		х	Final		Atua	С	Não Atua	I
Falta 194	Ext. B.1	0Ω	-	80km		х	Final		Não Atua	С	Não Atua	С
Falta 195	Ext. B.1	30Ω	-	80km		х	Final		Não Atua	С	Não Atua	С
Falta 196	ф3-Т	0Ω	4km	200km		х	Final		Atua	С	1º zona	С
Falta 197	ф3-Т	0Ω	76km	200km		х	Final		Atua	С	1º zona	I
Falta 198	ф3-Т	30Ω	4km	200km		х	Final		Atua	С	2º zona	1
Falta 199	ф3-Т	30Ω	76km	200km		x	Final		Atua	С	2º zona	С
Falta 200	EXT. B1	0Ω	-	80km	x		Final	Х	Atua	- I	-	
Falta 201	EXT. B2	0Ω	-	80km	x		Final	х	Atua	1	-	