



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPC/32
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA-GPC

O USO DA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM SITUAÇÕES ATÍPICAS – LINHAS DE CIRCUITO DUPLO COM UM ÚNICO “BAY” DE CHEGADA EM AMBOS OS TERMINAIS

**Mariana Carneiro Fernandes(*)
COPEL DISTRIBUIÇÃO**

**João Ricardo da Mata Soares de Souza
COPEL DISTRIBUIÇÃO**

RESUMO

Durante a execução de estudos de relés de proteção, por vezes depara-se com topologias não-convencionais, e em alguns casos, a metodologia de ajuste normalmente adotada não provê uma cobertura eficaz levando a procura por soluções diferentes.

Este artigo apresenta o estudo de proteção de uma nova linha de transmissão de 138 kV da COPEL que possui uma configuração atípica onde foram construídos dois circuitos com apenas um “bay” em cada subestação. Neste caso, a impedância vista pela proteção nos terminais deixa de ser linear e passa a ter um comportamento que pode provocar subalcances e sobrealcances dos elementos de distância.

PALAVRAS-CHAVE

Linha de transmissão, proteção de distância, circuito duplo

1.0 - INTRODUÇÃO

De acordo com a literatura, os relés de distância realizam uma comparação entre as tensões e as correntes medidas no terminal de uma linha de transmissão. Esta comparação é expressa como uma impedância, que, no caso da ocorrência de um curto-circuito, pode ser considerada como uma medida elétrica da distância elétrica entre o terminal onde o relé está instalado e ponto de falta [1]. Assim, pode-se dizer que o princípio de operação dos relés de distância está baseado na proporcionalidade que há entre a distância até o ponto de falta e a impedância calculada pelo relé através das suas medições de tensão e corrente.

Entretanto, durante a execução das atividades de ajuste de relés de proteção, por vezes nos deparamos com configurações que fogem das topologias convencionais. Este artigo apresenta o estudo de proteção feito para uma nova linha de transmissão de 138 kV da COPEL que possui uma configuração atípica visto que ela é constituída por dois circuitos com apenas um “bay” em cada subestação. Neste tipo de configuração, a proporcionalidade que há entre a impedância calculada pelo relé e a distância de falta não é direta. Em outras palavras, a relação que há entre a impedância vista pelos relés de proteção instalados nos terminais e a distância da falta deixa de ser linear e passa a ter um comportamento que pode provocar subalcances e sobrealcances dos elementos de zona 1 e zona 2.

Na seção 2 serão apresentados os problemas que podem ocorrer ao se aplicar a técnica de proteção de distância escalonada convencional diretamente em linhas com este tipo de configuração. Em seguida, na seção 3, será mostrado como é possível amenizar a não-linearidade da impedância vista pela proteção de distância utilizando

(*) R. PE Agostinho, n° 2600 - CEP 80.710-000 Curitiba, PR – Brasil
Tel: (+55 41) 3331-3774 – Email: mariana.fernandes@copel.com

jumpers ao longo da linha de transmissão para minimizar os problemas relatados no item 2.0 e, com isto, poder aplicar a técnica de proteção de distância escalonada convencional. Finalmente, no item 4 serão apresentadas as conclusões finais.

2.0 - COMPORTAMENTO NÃO-LINEAR DA IMPEDÂNCIA APARENTE

A nova de linha de transmissão cujo estudo de proteção é objeto deste trabalho pertence ao sistema da COPEL Distribuição, possui uma tensão de operação de 138kV, interliga os estados de São Paulo e Paraná e possui uma configuração atípica visto que ela é constituída por dois circuitos com apenas um “bay” em cada subestação. De forma mais detalhada, a linha parte da subestação “A” como circuito simples e após 1,8 km ela se divide em dois circuitos por 72,1 km e volta a ser um circuito simples já no pórtico da subestação “B”. Os relés de proteção estão instalados em cada terminal na saída da linha, onde o circuito ainda é simples. A figura 1 ilustra a configuração da linha e a localização dos relés de proteção.

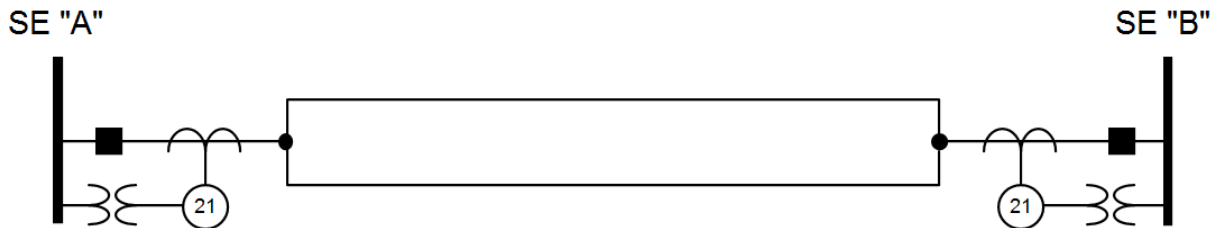


FIGURA 1 – Configuração da LT entre as Subestações “A” e “B”

Esta configuração já havia sido utilizada no passado pela COPEL em outra linha de transmissão e os problemas mencionados neste trabalho já havia sido levantados naquela ocasião. O estudo elaborado naquela oportunidade [2] serviu como ponto de partida para este trabalho.

Pode-se verificar que, quando se utiliza este tipo de configuração, qualquer curto-circuito que afete somente um dos circuitos será alimentado por uma injeção de corrente (efeito “infeed”) oriunda do outro circuito. Este efeito “infeed” irá influenciar a impedância aparente vista pelos relés de distância instalados nos terminais da linha de transmissão protegida. A figura 2 apresenta as correntes que irão fluir ao longo de cada trecho da linha de transmissão apresentada na figura 1 e ilustra este efeito “infeed”.

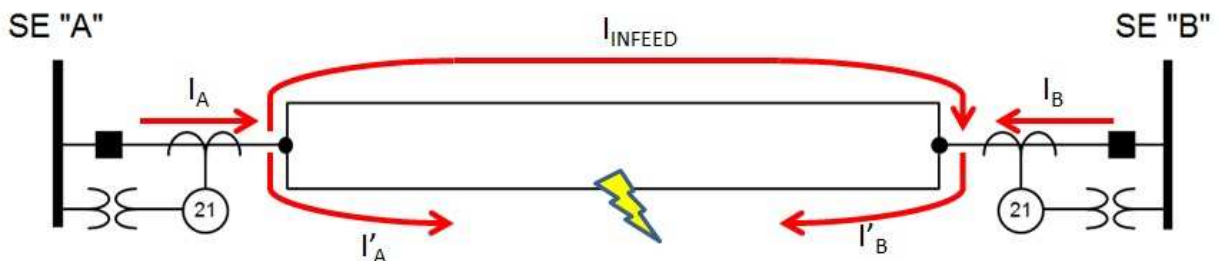


FIGURA 2 – Efeito “infeed” que ocorre durante um curto-circuito na linha de transmissão apresentada na figura 1

Por esta razão, a relação que há entre a impedância de sequência positiva calculada pelo relé e a distância até a falta tem uma característica não-linear, o que dificulta os estudos de ajustes dos elementos de zona 1 (instantâneo) e zona 2 (temporizado). Através da figura 3 é possível observar como o módulo da impedância vista pelos relés localizados em cada terminal da linha de transmissão em questão se comporta quando se aplicam curtos-circuitos trifásico ao longo da linha de transmissão.

Esta não-linearidade da impedância aparente apresentada na figura 3 pode levar o elemento instantâneo (zona 1) a subalcançar caso ele seja ajustado de maneira convencional (entre 80% e 90% da impedância de sequência positiva), deixando regiões da linha de transmissão sem proteção instantânea. Problemas semelhantes podem ocorrer com o elemento temporizado (zona 2) que, dependendo do critério a ser adotado no seu ajuste, poderá subalcançar ou sobrealcançar a linha protegida. Um subalcance do elemento de zona 2 pode fazer com que o relé não seja capaz de proteger 100% da linha. Por outro lado, um sobrealcance deste elemento pode provocar a descoordenação deste elemento com aqueles dos circuitos adjacentes.

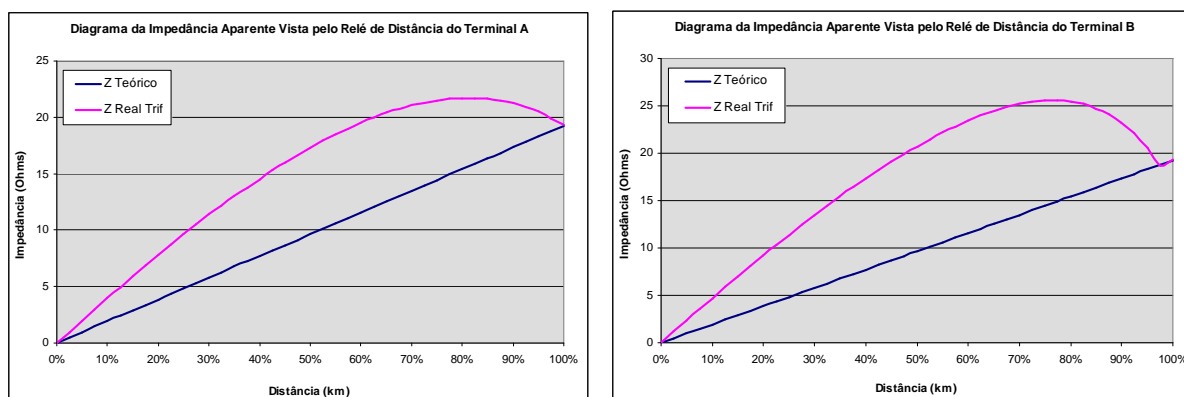


FIGURA 3 – Impedância Teórica e Real Vista Pelos Relés nos Terminais das Subestações “A” e “B”

2.1 Aplicação de ajustes típicos

Para se ter uma ideia do efeito causado por esta não-linearidade da impedância aparente, considera-se que a proteção de distância da linha de transmissão em questão foi ajustada conforme filosofia padrão. Neste caso, o elemento de distância de zona 1 é ajustado em 85% da impedância de sequência positiva da linha de transmissão protegida enquanto que o elemento de zona 2 é ajustado em 130% da impedância de sequência positiva desta linha, prática comum entre os profissionais da área de proteção de sistemas elétricos de potência. A tabela 1 abaixo mostra os valores de ajustes para zonas 1 e 2.

Tabela 1 – Valores de Impedância Ajustados para Zonas 1 e 2 Considerando como Referência nos Ajustes a Impedância Equivalente Teórica da Linha

Impedância	% Z_{LT}	Ajuste
Total da Linha (Z_{LT})	100%	19,26 Ω
Zona 1 (Z_1)	85%	16,37 Ω
Zona 2 (Z_2)	130%	25,04 Ω

A figura 4 ilustra o alcance das unidades de zona 1 e zona 2 nos gráficos a figura 2 ajustadas conforme a tabela 1.

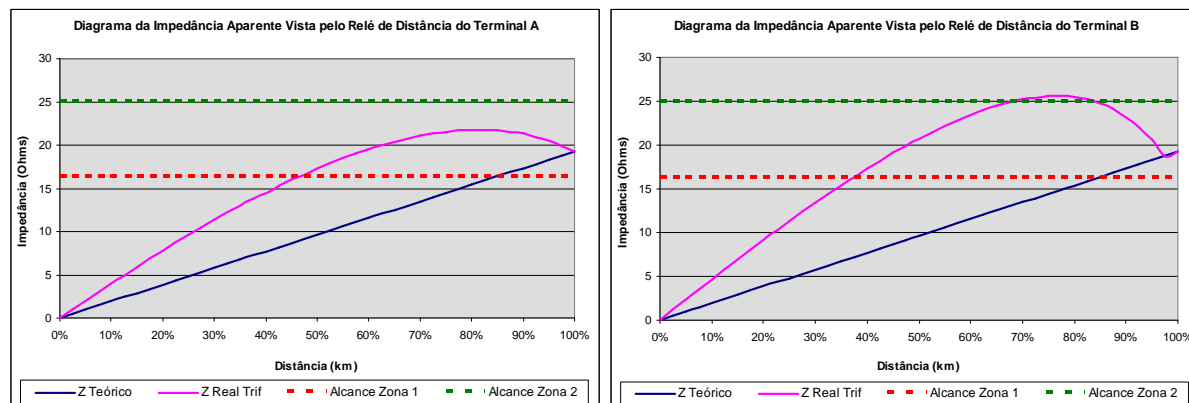
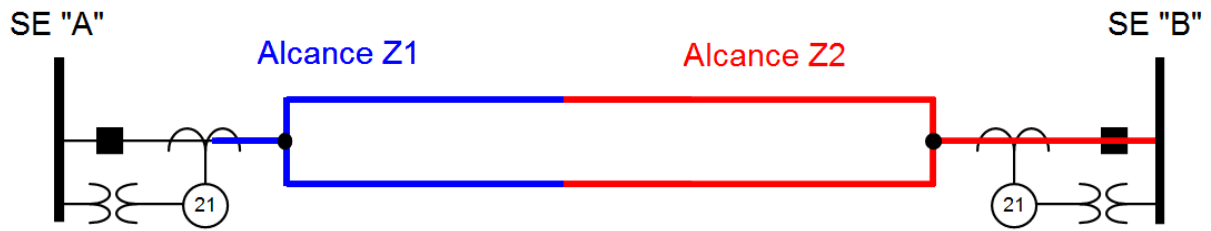


FIGURA 4 – Alcance real obtido pelos elementos de zona 1 e zona 2 de ambas as extremidades da linha de transmissão utilizando-se os ajustes da tabela 1

Comparando os ajustes da Tabela 1 com os gráficos de impedância aparente da Figura 3, nota-se que ao aplicar um ajuste de 85% da impedância equivalente teórica da linha de transmissão em questão para Zona 1, o alcance real obtido para este elemento seria de cerca de 45% e 35% para os terminais “A” e “B”, respectivamente. Assim, pode-se concluir que, nestas condições, nenhum trecho da linha de transmissão contará com uma proteção instantânea, pois elementos de zona 1 de ambos os terminais não se sobreporão em nenhum ponto, conforme ilustra a figura 5.

No caso do ajuste da Zona 2 em 130% da impedância equivalente da linha ocorre o mesmo efeito de subalcance. Para o terminal “A”, o alcance da Zona 2, apesar de ultrapassar 100% da linha de transmissão, fica apenas 15% acima do maior valor de impedância aparente vista pelo terminal “A”. Já para o terminal “B”, a região entre 67,5% e 85% da linha ficaria desprotegida. A Tabela 2 mostra os alcances reais obtidos pelos elementos de zona 1 e 2.

Alcances dos Elementos de Zonas 1 e 2 do Terminal A



Alcances dos Elementos de Zonas 1 e 2 do Terminal B

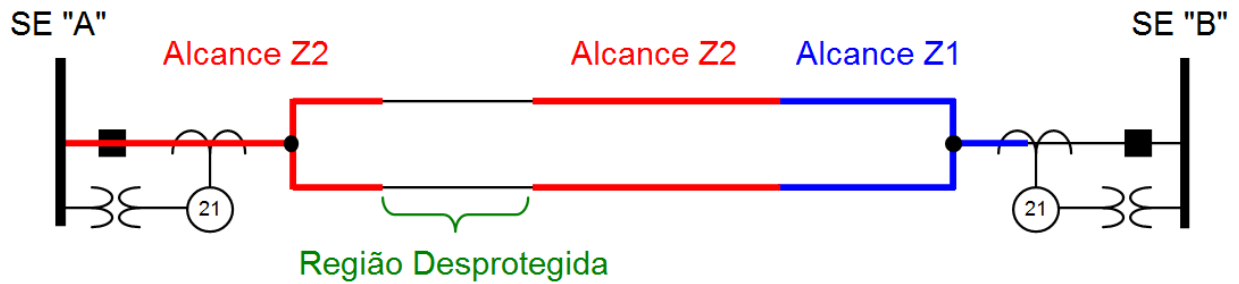


FIGURA 5 – Alcance real obtido pelos elementos de zona 1 e zona 2 de ambas as extremidades da linha de transmissão

Tabela 2 – Alcance Real dos Elementos de Zonas 1 e 2 Considerando como Referência nos Ajustes a Impedância Equivalente Teórica da Linha

Alcance	Alcance Teórico (% Z_{LT})	Alcance Real	
		Terminal "A"	Terminal "B"
Zona 1 (Z_1)	0% – 85%	0% – 45%	0% – 35%
Zona 2 (Z_2)	0% – 130%	0% – 100%	0% – 67,5% 85% – 100%

Portanto, este subalcance da Zona 2 é inadmissível uma vez que faz com que existam regiões da linha de transmissão que estão desprotegidas, ou seja, que não possuem cobertura pelas zonas 1 e 2.

Uma outra possibilidade para o ajuste destes elementos de zona 1 e 2 seria aplicar o percentual sobre o maior valor da impedância aparente vista pelos terminais ($Z_{ap.máx}$), conforme apresentado na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Valores de Impedância Ajustados para Zonas 1 e 2 Considerando como Referência nos Ajustes o Maior Valor da Impedância Aparente Vista por Cada Terminal

Impedância	% $Z_{ap.máx}$	Ajuste Terminal "A"	Ajuste Terminal "B"
Máximo ($Z_{ap.máx}$)	100%	21,70 Ω	25,60 Ω
Zona 1 (Z_1)	85%	18,44 Ω	21,76 Ω
Zona 2 (Z_2)	130%	28,21 Ω	33,28 Ω

A figura 6 ilustra o alcance das unidades de zona 1 nos gráficos a figura 2 ajustadas conforme a tabela 3.

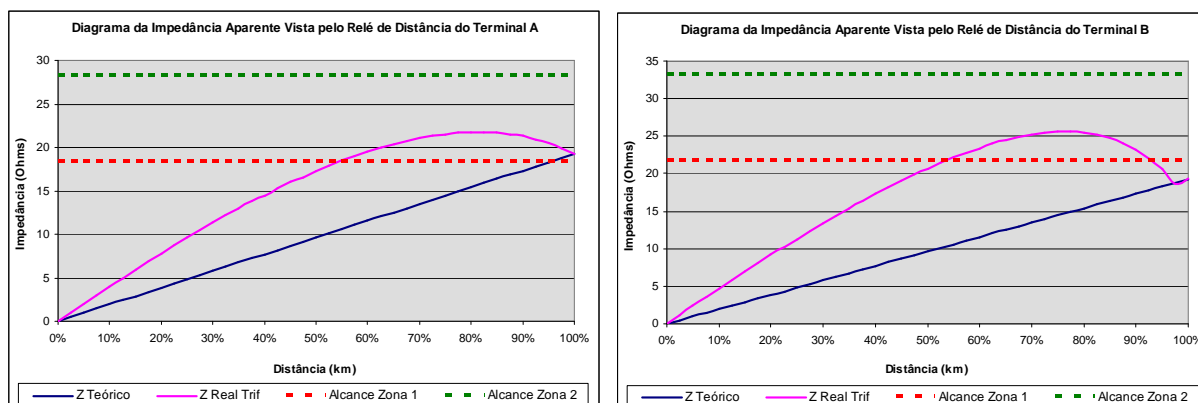


FIGURA 6 – Alcance real obtido pelos elementos de zona 1 e zona 2 de ambas as extremidades da linha de transmissão utilizando-se os ajustes da tabela 3

Para os ajustes apresentados na Tabela 3, nota-se um aumento no alcance real do elemento de zona 1 para 52,5% para ambos os terminais. Porém, para o terminal “B”, o trecho compreendido entre 95% e 100% da linha também ficaria sensível ao elemento de zona 1, o que provocaria descoordenações, uma vez que o elemento de zona 1 poderia ser sensibilizado e abrir instantaneamente para curtos além de sua barra adjacente.

Já para os elementos de zona 2, é possível proteger 100% da linha de transmissão utilizando os ajustes mostrados na Tabela 3. Porém, estes ajustes para zona 2 correspondem à 146,5% e 173% da impedância equivalente da linha para os terminais “A” e “B”, respectivamente. Este sobrealcance deve ser cuidadosamente analisado para evitar descoordenações com os circuitos adjacentes. Os alcances reais obtidos para os elementos de zona 1 e 2 podem ser vistos na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Alcance Real dos Elementos de Zonas 1 e 2 Considerando como Referência nos Ajustes o Maior Valor da Impedância Aparente Vista por Cada Terminal

Alcance	Terminal “A”		Terminal “B”	
	Teórico (% Z_{LT})	Real	Teórico (% Z_{LT})	Real
Zona 1 (Z_1)	0% – 95,5%	0% – 52,5%	0% – 113%	0% – 52,5% 95% – 100%
Zona 2 (Z_2)	0% – 146,5%	0% – 100%	0% – 173%	0% – 100%

O uso de esquemas de teleproteção poderia ser utilizado com intuito de melhorar a sensibilidade dos elementos de distância para curtos ao longo da linha, porém esta alternativa não será implementada na linha de transmissão em questão neste primeiro momento, o que dificulta ainda mais a realização dos estudos de ajuste da proteção.

3.0 - INSTALAÇÃO DE “JUMPERS” AO LONGO DA LINHA

Com o intuito de minimizar os efeitos de subalcance e sobrealcance dos elementos de distância de zona 1 e zona 2 apresentados na seção 2, foi utilizada uma técnica anteriormente aplicada em uma outra linha de transmissão de 138 kV do sistema da COPEL que possui configuração parecida [2]. Neste caso, foi feita a conexão dos dois circuitos por meio de “jumpers” instalados em diversos pontos ao longo da linha de transmissão protegida. Isso faz com que a característica não-linear da impedância aparente se aproxime da linear teórica, permitindo que as filosofias de ajustes atualmente aplicados em linhas de transmissão tradicionais pudessem ser utilizadas neste tipo de configuração.

Com o intuito de utilizar o menor número possível de “jumpers”, diversas simulações computacionais foram realizadas para determinar a localização e quantidade necessária de “jumpers” de forma que fosse possível a utilização de ajustes típicos de zona 1 e zona 2. Para a linha de transmissão em questão foi necessário a instalação de 6 “jumpers”. A Figura 7 a seguir apresenta a configuração final da linha de transmissão.

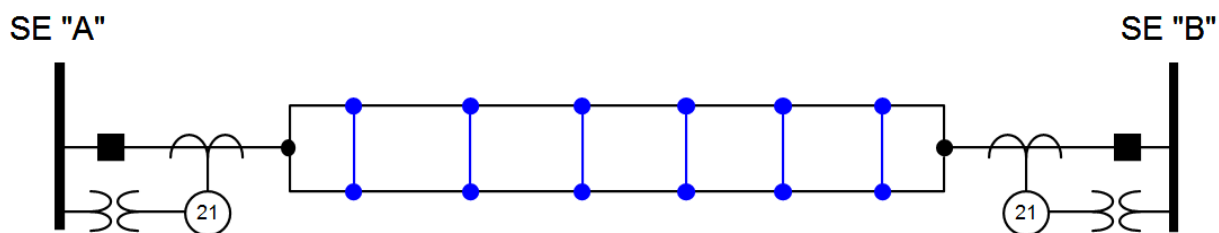


FIGURA 7 – Implantação de “Jumpers” entre os circuitos da Linha de Transmissão entre as Subestações “A” e “B”

Com a instalação destes “jumpers” ao longo da linha de transmissão, o comportamento da impedância aparente vista pelos relés de proteção nos terminais “A” e “B” se aproxima com a característica linear teórica. A Figura 8 a seguir apresenta o comportamento da impedância para curtos-circuitos trifásicos ao longo da linha para esta nova configuração.

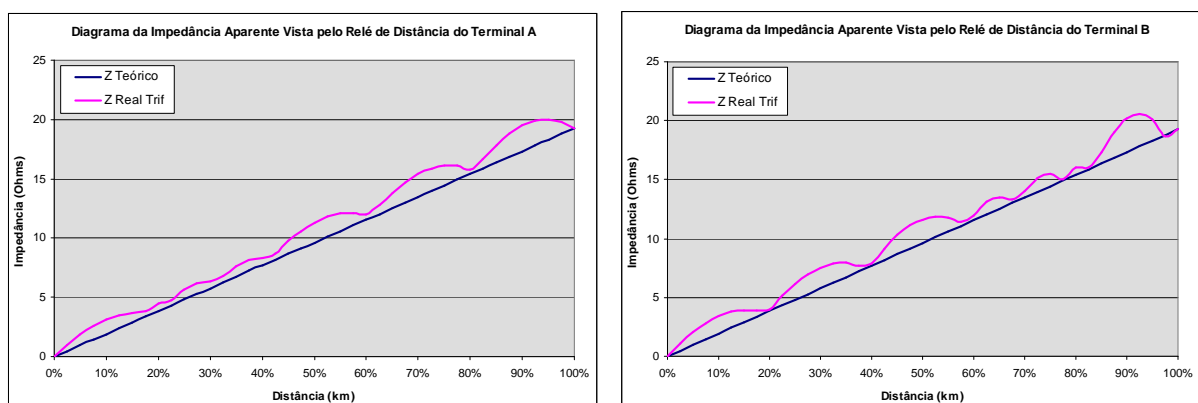


FIGURA 8 – Impedância Teórica e Real Vista Pelos Relés nos Terminais das Subestações “A” e “B” considerando a Instalação dos “Jumpers”

3.1 Aplicação de ajustes típicos para esta nova configuração da linha

Aplicando-se os ajustes típicos de zona 1 e zona 2 para esta nova configuração da linha (após a instalação dos “jumpers”), tem-se os valores de alcances reais mostrados na Tabela 5.

Desta forma, com a instalação destes “jumpers” foi possível obter uma cobertura real da linha de 80% no terminal “A” e 82,5% no terminal “B” para o elemento instantâneo (zona 1) ajustado em 85%. No caso do elemento temporizado (zona 2), o ajuste de 130% da linha protegida correspondeu a 100% de alcance para ambos os terminais, sendo que para o terminal “A” o alcance ficou a 125% do maior valor de impedância aparente vista pelo terminal “A” e para o terminal “B” o alcance ficou a 121,5% do maior valor de impedância aparente vista pelo terminal “B”. Percebe-se que o subalcançe das zonas 1 e 2 já é menor com relação ao caso de configuração das linhas sem a instalação dos “jumpers”.

Tabela 5 – Alcance Real dos Elementos de Zonas 1 e 2 Considerando como Referência nos Ajustes a Impedância Equivalente Teórica da Linha – Com a Utilização dos “Jumpers”

Alcance	Alcance Teórico (% Z_{LT})	Alcance Real	
		Terminal “A”	Terminal “B”
Zona 1 (Z_1)	0% – 85%	0% – 80%	0% – 82,5%
Zona 2 (Z_2)	0% – 130%	0% – 100%	0% – 100%

Outra possibilidade seria aplicar os ajustes de zona 1 e 2 utilizando como referência o maior valor da impedância aparente vista pelos terminais ($Z_{ap.máx}$), conforme apresentado na Tabela 6 a seguir,

Para os ajustes apresentados na Tabela 6, nota-se que não há uma melhora considerável nos alcances do zona 1, visto que o alcance real do elemento de zona 1 aumentou de 80% para 82,5% para o terminal “A” e de 82,5% para 85% para o terminal “B”. Isto se deve ao fato de, com a instalação dos “jumpers”, o valor da impedância da linha teórica ($19,30\Omega$) ficou mais próxima do maior valor de impedância vista pelos terminais ($20,00\Omega$ e $20,60\Omega$, para os terminais “A” e “B”, respectivamente).

Tabela 6 – Valores de Impedância Ajustados para Zonas 1 e 2 Considerando como Referência nos Ajustes o Maior Valor da Impedância Aparente Vista por Cada Terminal – Com a Utilização dos “Jumpers”

Impedância	% $Z_{ap.máx}$	Ajuste Terminal “A”	Ajuste Terminal “B”
Máximo ($Z_{ap.máx}$)	100%	20,00 Ω	20,60 Ω
Zona 1 (Z_1)	85%	17,00 Ω	17,51 Ω
Zona 2 (Z_2)	130%	26,00 Ω	26,78 Ω

Já para os elementos de zona 2, é possível proteger 100% da linha de transmissão utilizando os ajustes mostrados na Tabela 6, sendo que estes ajustes correspondem à 135% e 139% da impedância equivalente da linha para os terminais “A” e “B”, respectivamente. Este sobrealcance é bem menor do que o verificado no caso da não instalação dos “jumpers” (146,5% e 173%, para os terminais “A” e “B”, respectivamente).

Os alcances reais obtidos para os elementos de zona 1 e 2 podem ser vistos na Tabela 7. Portanto, através dos resultados mostrados nas Tabelas 6 e 7, percebe-se que a instalação dos “jumpers” ao longo da linha proporcionou uma melhora considerável nos subalcances e sobrealcances dos elementos de zona 1 e zona 2 aplicados nos terminais das subestações “A” e “B”. Apesar dos elementos de zona 2 terem ficado acima do alcance de 130%, os valores obtidos já são considerados satisfatórios e não causam descoordenação com nenhum circuito adjacente.

Tabela 7 – Alcance Real dos Elementos de Zonas 1 e 2 Considerando como Referência nos Ajustes o Maior Valor da Impedância Aparente Vista por Cada Terminal – Com a Utilização dos “Jumpers”

Alcance	Terminal “A”		Terminal “B”	
	Teórico (% Z_{LT})	Real	Teórico (% Z_{LT})	Real
Zona 1 (Z_1)	0% – 88%	0% – 82,5%	0% – 91%	0% – 85%
Zona 2 (Z_2)	0% – 135%	0% – 100%	0% – 139%	0% – 100%

4.0 - CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos foi possível observar a importância da instalação dos “jumpers” ao longo da linha. Tal procedimento proporcionou uma redução considerável nos subalcances e sobrealcances dos elementos de distância, possibilitando que esta linha fosse totalmente protegida utilizando relés de distância e técnicas tradicionais.

É importante ressaltar também a importância da metodologia aplicada para definição dos percentuais das zonas de proteção: se serão realizadas através da impedância teórica ou através do valor máximo da impedância aparente vista pelos terminais. Ao adotar a impedância teórica como referência há o risco dos elementos de distância subalcançarem. O contrário ocorre ao utilizar o valor máximo da impedância aparente vista pelos terminais como referência onde serão esperados sobrealcances dos elementos de distância.

Como o elemento de zona 1 é instantâneo, é necessário que sua atuação ocorra para um defeito interno da linha, caso contrário, descoordenações indesejadas poderão ocorrer. Neste caso, prefere-se trabalhar com um pequeno subalcance do que com o risco de um sobrealcance e possíveis atuações incorretas. Portanto, para o elemento de zona 1 adota-se o ajuste em ambos os terminais em 85% do valor da impedância teórica da linha com o intuito de evitar qualquer sobrealcance deste elemento, que poderia causar descoordenações.

Já para o elemento de zona 2, por ser temporizado e ter como principal função proteger toda a linha de transmissão, é importante que seja garantido este alcance de 100% da linha. Portanto, prefere-se trabalhar com um pequeno sobrealcance, desde que não descoordine com linhas adjacentes, do que com o risco deste elemento não estar alcançando totalmente a linha e deixá-la com trechos sem proteção. Desta forma, para o elemento de zona 2 adota-se o ajuste em ambos os terminais em 130% do valor máximo da impedância aparente vista pelos terminais.

Na Figura 9 a seguir são mostrados os ajustes adotados para a linha de transmissão em questão.

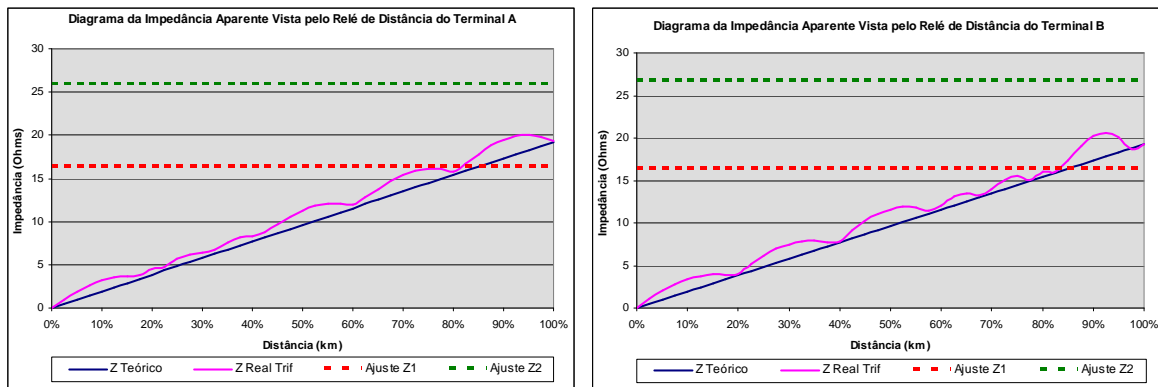


FIGURA 9 – Impedância Teórica e Real Vista Pelos Relés nos Terminais das Subestações “A” e “B” Considerando a Instalação dos “Jumpers” e os Ajustes dos Elementos de Zona 1 e 2 Aplicados

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MASON, C. R.; The Art & Science of Protective Relaying; Disponível no site <http://www.gedigitalenergy.com/multilin/notes/artsci/index.htm>; GE Multilin
- (2) PUPPI, L. V. S.; Análise do Esquema de Proteção de Fase da LT Rosana; Estudo VPSI 006/89; COPEL; 1989

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Mariana Carneiro dos Santos Fernandes é engenheira eletricista natural de Criciúma – SC. Concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2003 e obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2006. Trabalhou na Tractebel Energia S.A. como engenheira eletricista no período de 2005 a 2007 e atuou nas áreas de medição, proteção e análise de ocorrência. No período de 2007 a 2009 trabalhou no Lactec (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento) como engenheira eletricista atuando na área de desenvolvimento do software de monitoramento de energia da Siemens – USA. Em 2009 entrou na COPEL (Companhia Paranaense de Energia) como engenheira eletricista atuando na área de engenharia de manutenção de redes de distribuição. Desde 2011, trabalha como engenheira de proteção do sistema elétrico na COPEL (Companhia Paranaense de Energia).

João Ricardo da Mata Soares de Souza é engenheiro eletricista natural de Belo Horizonte – MG. Concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2005 e obteve o grau de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2012. Trabalha desde 2005 como engenheiro de proteção do sistema elétrico na COPEL (Companhia Paranaense de Energia) desde 2005.