



# APLICAÇÃO DE DOIS ESQUEMAS DE PROTEÇÃO CONJUGADOS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO CURTAS COM CARGAS CONECTADAS EM DERIVAÇÃO

**Tema:** Sistemas de Controle, Automação e Proteção

**Autores:** Alexandre Sales Braz; Wallace Augusto Reis

**Co-Autores:** Sérgio dos Anjos Rosa

**Empresa:** CEMIG Distribuição S.A

---

## Resumo

Com a evolução dos sistemas elétricos de potência e a entrada em operação de novas subestações, que muitas vezes seccionam linhas já existentes, novas linhas de distribuição são criadas e com comprimentos cada vez menores. Essas novas linhas que surgem do seccionamento de linhas já existentes, por muitas vezes já possuem outras subestações conectadas a elas internamente, no chamado “tape seco”. Linhas curtas muitas vezes exigem esquemas de teleproteção para garantir a possibilidade de eliminação rápida de faltas sem risco de descoordenações com os terminais das linhas que partem da barra remota. Na Cemig Distribuição estão padronizados dois esquemas de teleproteção: Transferência de disparo direto por sobrealcance permissivo (POTT) e diferencial de linha (87L). Em muitos casos, como a linha a ser protegida é muito curta, o esquema de teleproteção indicado é o diferencial de linha, mas na presença de carga interna se faz necessário a elevação do *pick-up* dessa proteção com consequente perda de sensibilidade. O trabalho que se apresenta aqui é uma alternativa para continuar garantindo sensibilidade para faltas com impedância elevada em linhas curtas com carga interna que utilizam esquemas de diferenciais de linha como proteção principal. Isso é feito com base em esquema de teleproteção baseado na comparação direcional de funções de sobrecorrente direcionais de sequência zero (67N), que costumam compor os já citados esquemas de teleproteção tipo POTT.

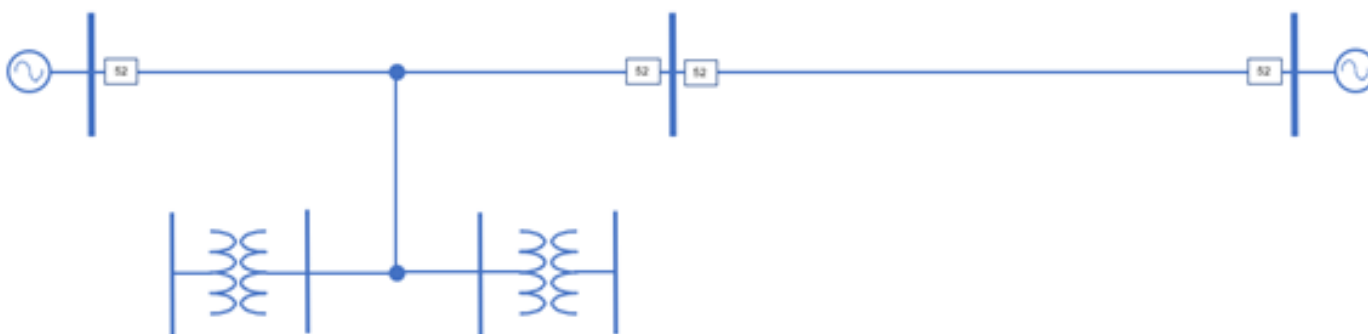
## 1. Introdução

No passado era comum a conexão de subestações de propriedade da própria concessionária ou subestações de clientes em “tape seco”, também chamada conexão em derivação, ou simplesmente tape interno a uma linha de distribuição. Essas subestações normalmente possuem trafo(s) abaixador(es) com o lado de AT em conexão delta e lado de MT em estrela aterrada, com ou sem resistor de atenuação. Esse tipo de conexão elimina a possibilidade de corrente de sequência zero na linha em questão na condição de carga e também não cria um caminho alternativo para correntes de sequência zero em caso de faltas à terra na própria linha ou em suas proximidades.



*Figura 1 - Linha de distribuição com carga interna em derivação ou tape.*

Atualmente tem sido comum situações onde linhas, que já eram curtas, sendo seccionadas em trechos ainda menores para a inserção de uma nova subestação nessa mesma linha, mas com essa nova subestação contando com disjuntores e relés de proteção, criando uma nova linha ainda mais curta, na qual já existe outra subestação conectada em derivação.



*Figura 2 - Linha seccionada, criando uma linha muito curta com carga interna.*

O padrão de proteção atualmente empregado pela Cemig Distribuição para linhas de distribuição de alta tensão consta de dois relés com função de proteção principal de distância (21) ou diferencial de linha (87L). A equipe de planejamento de alta tensão da Cemig Distribuição utiliza um critério baseado no SIR (*Source Impedance Ratio*) para definir se uma linha é eletricamente curta e avaliar a necessidade de aplicação de esquema de teleproteção. O SIR é calculado dividindo a impedância equivalente do sistema elétrico atrás da linha em questão pela impedância dessa própria linha.

$$SIR = \frac{Z_S}{Z_L}$$

Onde:

$$\{Z_S = \text{Impedância do equivalente do SEP } Z_L \\ = \text{Impedância da linha avaliada}$$

$SIR < 0,5$	Linha longa
$0,5 \leq SIR \leq 4,0$	Linha média
$SIR > 4,0$	Linha curta

O SIR está relacionado ao “comprimento elétrico” das linhas e está intimamente relacionado à proteção para essa mesma linha, já que linhas longas, médias e curtas podem exigir esquemas de proteção diferentes.

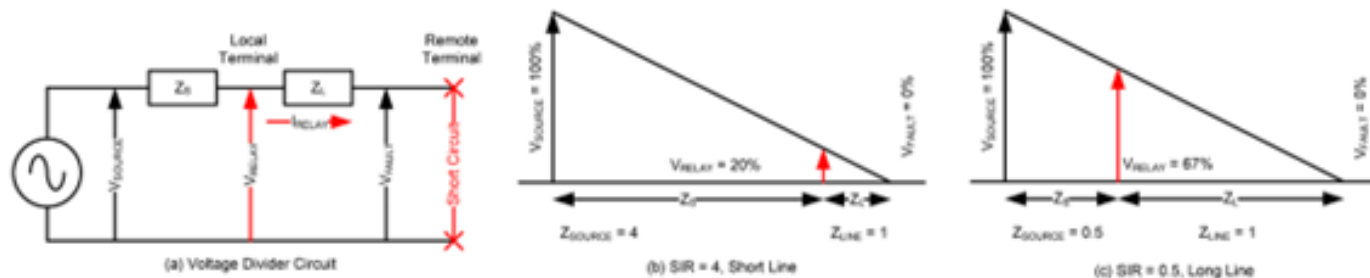


Figura 3 - Efeitos elétricos do SIR.

A Figura 3 mostra como o SIR influencia na tensão medida pelo relé de proteção na presença de uma falta à jusante. Em linhas com valores altos de SIR a tensão medida pelo relé é bem mais baixa que em linhas com valores mais baixos de SIR. Para se aplicar funções de proteção que não dependam de comunicação com o relé do lado oposto (funções gradativas) como proteção principal da linha é preciso que se observe uma variação significativa da corrente e da tensão medida durante a falta, de forma que o relé possa identificar com segurança o ponto onde encontra-se o defeito e tomar a decisão correta de atuação. Para linhas eletricamente curtas não são indicadas funções de proteção unitárias, isso é, que atuem para um trecho específico da linha sem temporização intencional, como são as funções instantâneas de sobrecorrente e zona 1 de distância.

O critério do SIR orienta a equipe de planejamento de alta tensão da Cemig Distribuição na indicação de utilização ou não de esquema de teleproteção para uma determinada linha, o qual pode ser do tipo POTT (*Permissive Overreaching Transfer Trip*), que é baseado na comparação direcional de funções de distância e sobrecorrente direcional residual, ou esquema diferencial de linha (87L), que compara correntes em cada terminal, calculando a diferença entre elas. Linhas consideradas curtas pelo critério do SIR e que tenham menos de 10 quitros têm esquema de teleproteção definido como diferencial de linha. Linhas subterrâneas também são protegidas com esquemas 87L. Para outras linhas consideradas curtas pelo critério do SIR, a equipe de planejamento de alta tensão simula uma falta bifásica pura com resistência de falta de 25 Ohms primários (valor típico observado em faltas provocadas por queimadas sob a linha) em cada uma das pontas dessa linha, de forma a verificar se a impedância medida por relés de distância em cada terminal é acomodada numa característica de distância de sobrealcance, típica de esquemas POTT. Se a impedância medida em cada terminal pode ser acomodada na característica de distância de sobrealcance, o esquema

POTT pode ser aplicado. Se para qualquer um dos terminais isso não for possível, o esquema diferencial de linha é o escolhido.

Esquemas diferenciais de linha oferecem proteção mais robusta às linhas e são ajustados de forma mais simples e rápida, além de possibilitarem testes também mais rápidos e simples, mas exigem relés idênticos em cada terminal, já que a função 87L opera com software proprietário do fabricante do IED (*Intelligent Electronic Device*). Esquemas diferenciais de linha também são afetados pela assimetria na velocidade de trânsito das mensagens no meio de comunicação e para evitar problemas a Cemig Distribuição sempre utiliza fibra ótica dedicada para a comunicação no esquema diferencial de linha, enquanto esquemas POTT permitem aplicação com esquemas de comunicação multiplexados, já que pequenas assimetrias no canal de comunicação não afetam seu desempenho.

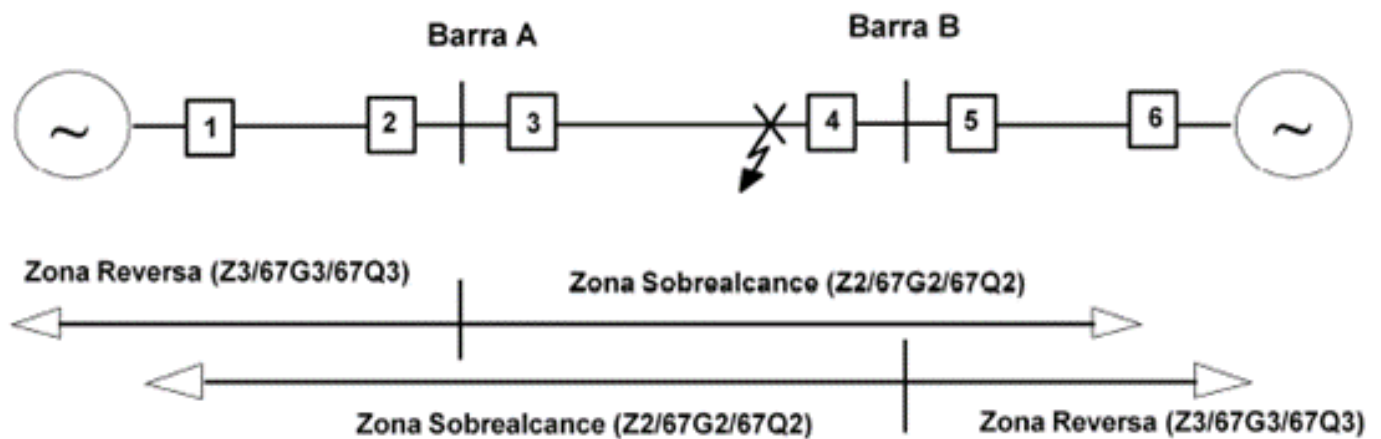


Figura 4 - Esquema POTT básico de relé SEL-421.

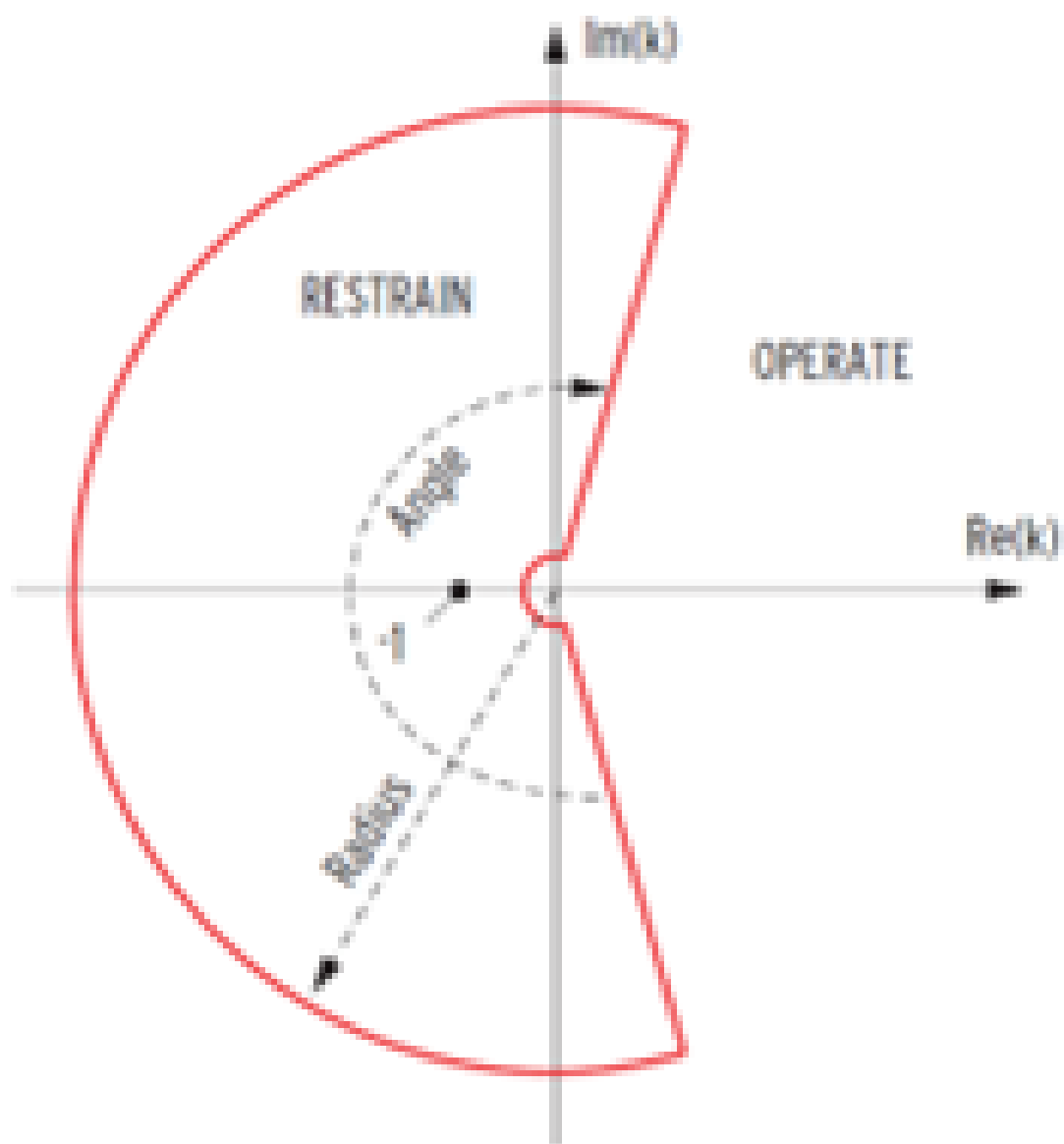


Figura 5 -Característica 87L do relé SEL-411L.

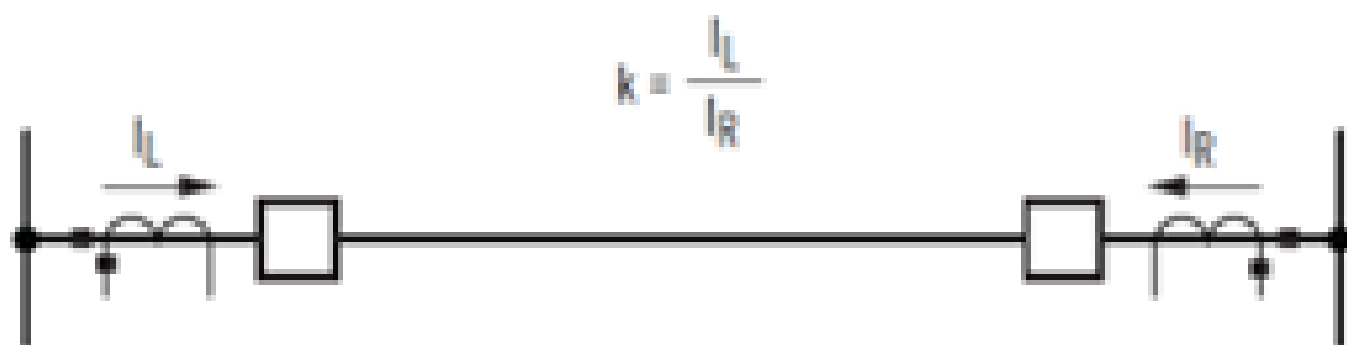


Figura 6 - Linha protegida pelo relé diferencial de linha (87L) SEL-411L.

## 2. Desenvolvimento

### 2.1 - O PROBLEMA

Segundo os critérios adotados pela equipe de planejamento de alta tensão da Cemig Distribuição, a nova linha entre as subestações Betim 2 e Betim 6 se enquadrava no esquema de teleproteção com relés diferenciais de linha, mas havia um problema para a aplicação da função 87L, que eram os três clientes já existentes e que permaneceriam conectados em tape seco na LD 1 Betim 2 – Betim 6 138 kV.

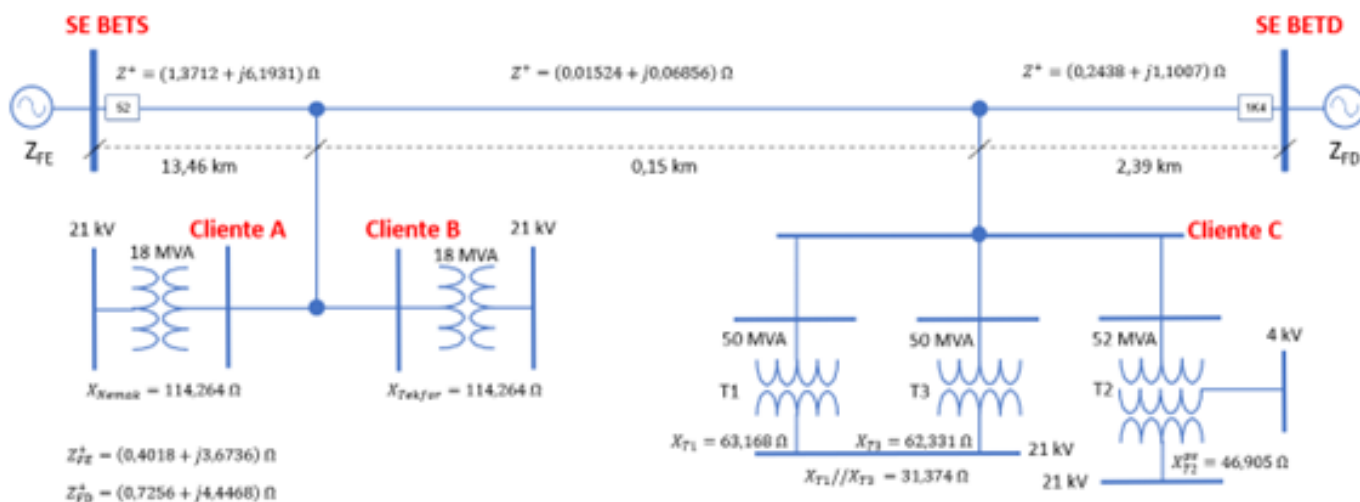


Figura 7 - Linha a ser protegida.

A carga instalada dentro dessa linha também é de 188 MVA, o que representa uma corrente de aproximadamente 790 A. Isso quer dizer que a corrente que entra por um dos terminais da linha não é a mesma que sai pelo outro terminal, já que existe uma carga conectada internamente, a qual consome uma corrente considerável. Portanto, para a aplicação da função 87L seria necessário responder a algumas questões:

- I. Qual é o menor valor possível para o ajuste de pick-up da função 87L?
- II. A zona 1 da função de distância pode ser sensibilizada pela corrente de *inrush* dos trafos dos clientes conectados em tape na linha?
- III. Alguma zona de distância pode ser sensibilizada em caso de falta na planta interna dos clientes conectados em tape na linha?
- IV. O que é possível fazer para aumentar a sensibilidade para faltas à terra com alta impedância dentro da linha?

Essas perguntas foram respondidas depois de uma análise baseada na experiência dos profissionais envolvidos e com suporte nas referências citadas ao final desse trabalho. Também serão apresentadas as considerações e cálculos aplicados para a definição da melhor opção de proteção para essa linha. Ali a corrente de curto-circuito é elevada, exigindo uma rápida eliminação de faltas.

### 2.2 - A SOLUÇÃO

O livro *Numerical Differential Protection – Principles and Applications*, do engenheiro Gerhard Ziegler [1], que é uma das principais referências sobre proteção de sistemas elétricos de potência, traz no capítulo 9 uma análise cujo título é *Differential protection for feeders with tee-offs (tapped lines)*, a qual foi a principal base de apoio para a análise do problema e definição das respostas. De modo a reforçar o entendimento e

dar ainda mais suporte às decisões tomadas, foram também utilizadas as orientações apresentadas pelo engenheiro Cláudio Mardegan na revista O Setor Elétrico, onde ele apresenta um método para a estimação da corrente de *inrush* na energização de mais de um transformador [2].

Sendo assim, seguem as respostas às questões levantadas:

#### 2.2.1 PERGUNTA I:

Qual é o menor valor possível para o ajuste de *pick-up* da função 87L?

#### RESPOSTA:

Através de simulações de curto-circuito utilizando o *software OneLiner®* foi possível identificar que a maior corrente de curto-circuito interna à linha protegida para a qual não se espera a atuação da função 87L é o curto-circuito trifásico na barra de 21 kV do cliente C.

$$I_{CC3\phi}^{m\acute{a}x} = 2318 A$$

A referência [1] sugere que se ajuste o *pick-up* da função 87L com valor 130% maior que o maior curto-circuito trifásico na barra de 21 kV do cliente C, logo:

$$I_{pickup}^{87L} = 1,3 \times I_{CC3\phi}^{m\acute{a}x} = 1,3 \times 2318 = 3013 A$$

Portanto, o ajuste de *pick-up* da função 87L deve ser maior que o maior curto-circuito em planta interna de qualquer um dos cliente, para que não haja sensibilização da função diferencial de linha nessa situação, já que ela tem tempo de atuação muito rápido e consequentemente não permite coordenação com funções de proteção do próprio cliente.

#### 2.2.2 PERGUNTA II:

A zona 1 da função de distância pode ser sensibilizada pela corrente de *inrush* dos trafos dos clientes conectados em tape na linha?

#### RESPOSTA:

A zona 1 da função de distância também tem atuação normalmente sem qualquer temporização adicional e pode vir a atuar na condição de *inrush* de energização de qualquer um dos trafos conectados dentro da linha protegida. Em alguns relés é possível utilizar funções de bloqueio de atuação no *inrush*, com técnicas normalmente baseadas na relação entre a corrente de segundo harmônico e a corrente fundamental. Essa funcionalidade pode ser utilizada para bloquear a atuação da zona 1. Caso essa funcionalidade não esteja disponível, é necessário estimar a maior corrente de *inrush* possível na energização de qualquer um dos trafos internos à linha protegida.

### 2.2.2.1 Método sugerido pela referência [1]:

Pelo método [1], a impedância medida pelo relé de distância durante o *inrush* é dada pela seguinte equação:

$$Z_{Inrush}^{[1]} = \frac{\left(\frac{V_{nom}}{\sqrt{3}}\right)}{\sum_{i=1}^n I_{Inrush[1]}}$$

Essa equação divide a tensão nominal por fase pela esperada corrente de *inrush* e essa corrente de *inrush* deve ser calculada da seguinte forma:

$$\sum_{i=1}^n I_{Inrush[1]} = 5 \times \frac{\sum_{i=1}^n S_{trafos}}{\sqrt{3} \times V_{nom}}$$

A referência [1] considera como máxima corrente de *inrush* o valor da corrente nominal da carga instalada na linha, multiplicada por cinco.

Assim:

$$\sum_{i=1}^n I_{Inrush[1]} = 5 \times \frac{188 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3} = 5 \times 786,54 = 3932,68 \text{ A}$$

De posse desse valor é possível calcular a impedância de *inrush*:

$$Z_{Inrush}^{[1]} = \frac{\left(\frac{138 \times 10^3}{\sqrt{3}}\right)}{3932,68} = 20,260 \Omega$$

### 2.2.2.2 Método sugerido pela referência [2]:

Segundo a referência [2] a impedância durante o *inrush* é dada pela seguinte equação:

$$Z_{Total}^{[2]} = Z_S + Z_{Inrush}^{[2]}$$



Essa equação define como impedância total durante o *inrush* a soma da impedância do equivalente atrás de cada fonte, somada à impedância de *inrush* segundo a referência [2]. Dessa forma, tem-se dois valores de impedância de *inrush*, um para cada terminal da linha.

A impedância equivalente de cada terminal da linha é dada por:

$$Z_S = \frac{\left(\frac{V_{nom}}{\sqrt{3}}\right)}{I_{CC_{3\phi}}}$$

A impedância de *inrush*, de acordo com a referência [2] é:

$$Z_{Inrush}^{[2]} = \frac{\left(\frac{V_{nom}}{\sqrt{3}}\right)}{\sum_{\square} I_{Inrush[2]}}$$

A corrente de *inrush*, segundo a referência [2] é:

$$\sum_{\square} I_{Inrush[2]} = 8 \times \sum_{\square} I_{nom}^{trafos} = 8 \times \frac{188 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 138 \times 10^3} = 6292,28 \text{ A}$$

Com esse valor é possível calcular a impedância de *inrush* segundo a referência [2]:

$$Z_{Inrush}^{[2]} = \frac{\left(\frac{138 \times 10^3}{\sqrt{3}}\right)}{6292,28} = 12,662 \Omega$$

Simulações de curto-circuito no software *OneLiner*® já informam a impedância do equivalente da fonte atrás de cada um dos terminais da linha, assim a impedância total de *inrush* segundo a referência [2] para o terminal de Betim 6 é:

$$Z_{Total}^{[2]} = Z_S^{BETS} + Z_{Inrush}^{[2]} = 3,886 + 12,662 = 16,549 \Omega$$

E a impedância total de *inrush* segundo a referência [2] para o terminal de Betim 2 é:

$$Z_{Total}^{[2]} = Z_S^{BETD} + Z_{Inrush}^{[2]} = 4,722 + 12,662 = 17,384 \, \Omega$$

Com base nesses valores é possível definir a corrente de *inrush* no terminal de Betim 6 com base na referência [2] como:

$$I_{Inrush\_real}^{BETS} = \frac{\left(\frac{138 \times 10^3}{\sqrt{3}}\right)}{16,549} = 4814,45 \, A$$

E a corrente de *inrush* para o terminal de Betim 2 com base na referência [2] é:

$$I_{Inrush\_real}^{BETD} = \frac{\left(\frac{138 \times 10^3}{\sqrt{3}}\right)}{17,384} = 4583,20 \, A$$

Como os valores calculados para os dois terminais são muito semelhantes, será considerado o maior deles. Comparando os valores obtidos pelos dois métodos:

MÉTODOS	$Z_{Inrush}$	$I_{Inrush}$
[1] – SIEMENS	20,260 $\Omega$	3932,68 A
[2] – O SETOR ELÉTRICO	16,549 $\Omega$	4814,45 A

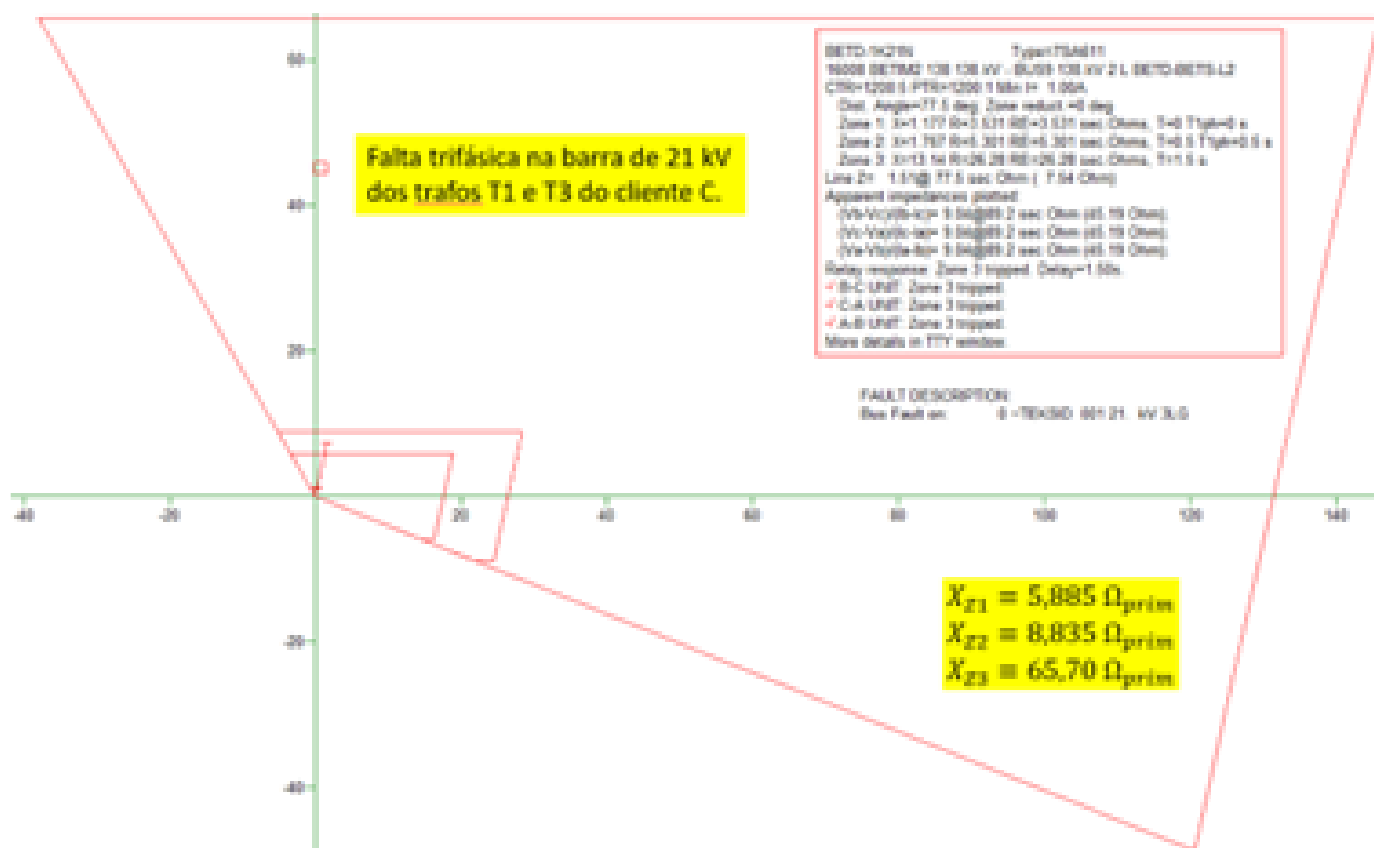


Figura 8 - Característica de distância dos relés da SE Betim 2.

Conforme pode ser observado na figura 8, os valores calculados para a impedância de *inrush*, pelos dois métodos citados, adentra apenas a zona 3, que opera de forma temporizada em 1,5 segundos. Logo não haverá risco de operação da proteção em condição de *inrush*.

Na figura 8 também é possível observar o ponto da impedância vista pelo relé de distância do terminal da SE Betim 2 para a falta trifásica na barra de 21 kV do cliente

### 2.2.3 PERGUNTA III:

Alguma zona de distância pode ser sensibilizada em caso de falta na planta interna dos clientes conectados em tape na linha?

#### RESPOSTA:

Conforme pode ser observado na figura 8, a zona 3 dos relés do terminal da SE Betim 2 é sensibilizada para falta trifásica na barra de 21 kV do cliente C e é necessário verificar o tempo de atuação das proteções do cliente C para essa mesma falta, mas provavelmente não haverá problema. Além disso, durante o *inrush* de energização da linha é possível que a zona 3 seja sensibilizada também, mas não há risco de *trip* nesse caso.

### 2.2.4 PERGUNTA IV:

O que é possível fazer para aumentar a sensibilidade para faltas à terra com alta impedância dentro da linha?

## **RESPOSTA:**

No caso da linha em questão, seus relés de proteção têm a função diferencial de linha como função de proteção principal. Funções de distância, sobrecorrente de terra e de sequência negativa também são aplicadas para prover proteção à linha protegida e às demais linhas que partem da barra remota como retaguarda remota. A função diferencial de linha disponível é apenas a diferencial segregada por fase. Alguns relés disponibilizam também função diferencial de linha de sequência zero e até de sequência negativa. Como o nível de curto-circuito na região é alto, faltas bifásicas ou trifásicas com impedância mais elevada são detectadas pela função 87L de fase, mesmo com pick-up elevado para atender a questão número 1. O problema aparece no caso de faltas à terra com resistência de falta elevada. Espera-se que faltas à terra dentro da linha com até 120 Ohms de resistência sensibilizem a proteção e como há teleproteção habilitada, espera-se também que essa eliminação seja rápida, o que não é possível com o ajuste elevado de pick-up da função 87L. Se o relé disponibilizasse funções diferenciais de linha de sequência zero ou sequência negativa isso seria contornado, resolvido, mas como não havia essa opção, foi necessário utilizar outra solução. Como o relé permite habilitar o esquema POTT em paralelo com o esquema diferencial de linha, optou-se por essa solução. Apenas o esquema de comparação direcional baseado em funções direcionais de sequência zero já ofereceriam a cobertura necessária para faltas à terra com alta resistência de falta, mas decidiu-se por aplicar o esquema POTT em sua integralidade, também com a comparação direcional baseada em funções de distância.

## **3. Conclusão**

A solução adotada para esse caso foi padronizada para aplicação em qualquer outro caso similar, já que não exige gastos extras e a infraestrutura disponibilizada para o esquema diferencial de linha já permite habilitar também o esquema POTT.

Os ajustes nessa solução ficam um pouco mais complexos, mas nada que inviabilize. Os testes em bancada e em campo também ficam um pouco mais complexos, já que para essa configuração é necessário testar condições específicas que afetam o esquema POTT, mas esse problema também é razoavelmente simples de contornar.

A equipe de projetos elétricos já padronizou essa solução e atualizou sua base de dados para implementar essa condição de forma adequada, com sinalizações locais e para o sistema supervisório.

As equipes de campo estão sendo treinadas para trabalhar com essa solução, de forma a poder testar em bancada em campo sem contratemplos.

Espera-se que problemas criados pelo seccionamento de linhas com carga interna sejam evitados, sempre que possível, mas caso não haja outra solução, a aplicação desses dois esquemas de teleproteção em paralelo propicia proteção às linhas com tempos de eliminação de faltas com considerável rapidez.

## **4. Referências bibliográficas**

- [1] ZIEGLER, G. Numerical Differential Protection – Principles and Applications. Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2005.
- [2] MARDEGAN, C. Proteção dos transformadores – Parte I. O Setor Elétrico. São Paulo, p. 26-39, set., 2010.

[3] KAZSTENNY, B. et al. Application of Current Differential Protection to Tapped Transmission Lines. 54th Annual Conference for Protective Relay Engineers. College Station, 2001.