

# Proteção de geradores e barramentos

Proteção do Sistema Elétrico de Potência

# Introdução

- Geradores e barramentos representam uma classe especial de equipamentos do sistema elétrico, pois são notoriamente reconhecidos como equipamentos menos susceptíveis a falha
- Contudo, caso ocorram, elas podem ser altamente destrutíveis, cuja consequência direta é o impacto severo na estabilidade do sistema, assim como no suprimento de energia aos consumidores finais
- Um exemplo de proteção: contra perda de sincronismo de geradores baseado no monitoramento do valor e da trajetória das impedâncias vistas pelo relé durante oscilações instáveis do gerador

# Relé de subtensão (27)

- Subtensão é definida como um decremento no valor de pico e, por consequência, no valor eficaz do sinal de tensão
- Subtensão pode ser obtida quando a tensão eficaz nos terminais de um gerador trifásico cai abaixo de uma tensão limiar pré estabelecida

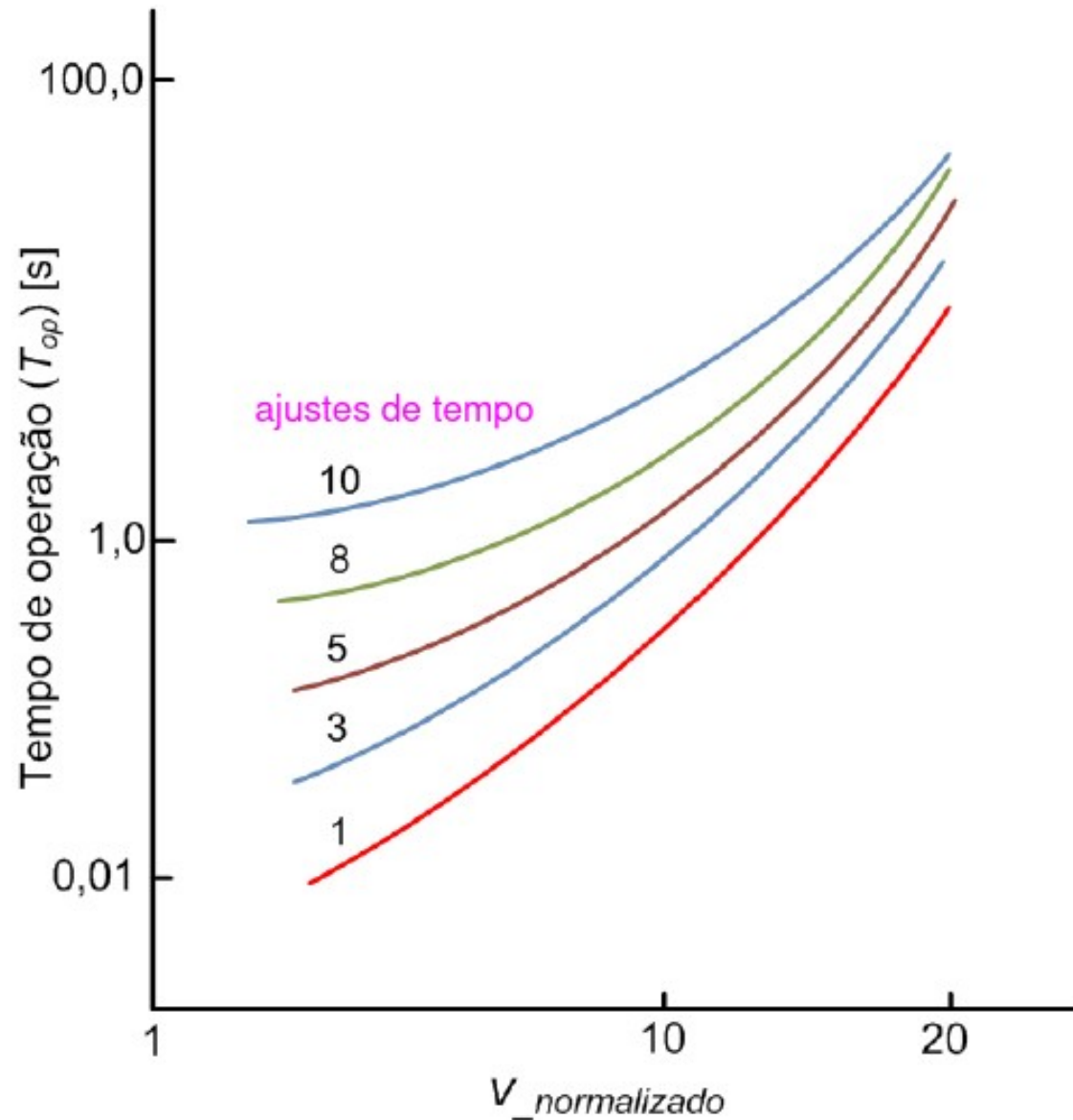
# O que causa uma subtensão

- Geradores conectados em paralelo a um dado barramento que alimentam uma carga:
  - Se eventualmente um dos geradores deixar de operar, os outros geradores tentarão suprir a carga
  - Cada um desses geradores experimentará um aumento súbito de corrente provocando uma redução na tensão nos seus terminais e, por consequência, na tensão do barramento
- Conexão instantânea de elevados blocos de carga ao barramento de um gerador
  - A súbita conexão de blocos de carga provocará uma redução na tensão do gerador que tentará compensar esse efeito com a elevação da corrente enviada à carga

- O aumento excessivo da intensidade da corrente tende a comprometer os enrolamentos do gerador, assim, se nenhuma atitude for tomada, ele pode ser danificado permanentemente
- Todo gerador deve dispor de um relé de proteção contra subtensão (27)
- O princípio de operação do relé de subtensão é bem simples, pois ele opera apenas quando a tensão estimada nos terminais do gerador fica abaixo do valor limiar parametrizado durante o seu ajuste

# Ajuste do relé de subtenção

Figura 2.19 | Curvas típicas do relé de subtenção



Curva tempo  
tensão com  
inclinação  
positiva

Quanto  
menor a  
tensão, mais  
rápido atua

# Relés de sobretensão (59)

- Sobretensão é definida como um incremento no valor de pico, e por consequência no valor eficaz, do sinal de tensão
- Pode ser obtida quando a tensão eficaz nos terminais de um gerador trifásico aumenta acima de uma tensão limiar preestabelecida

# Causas de sobretensão em geradores

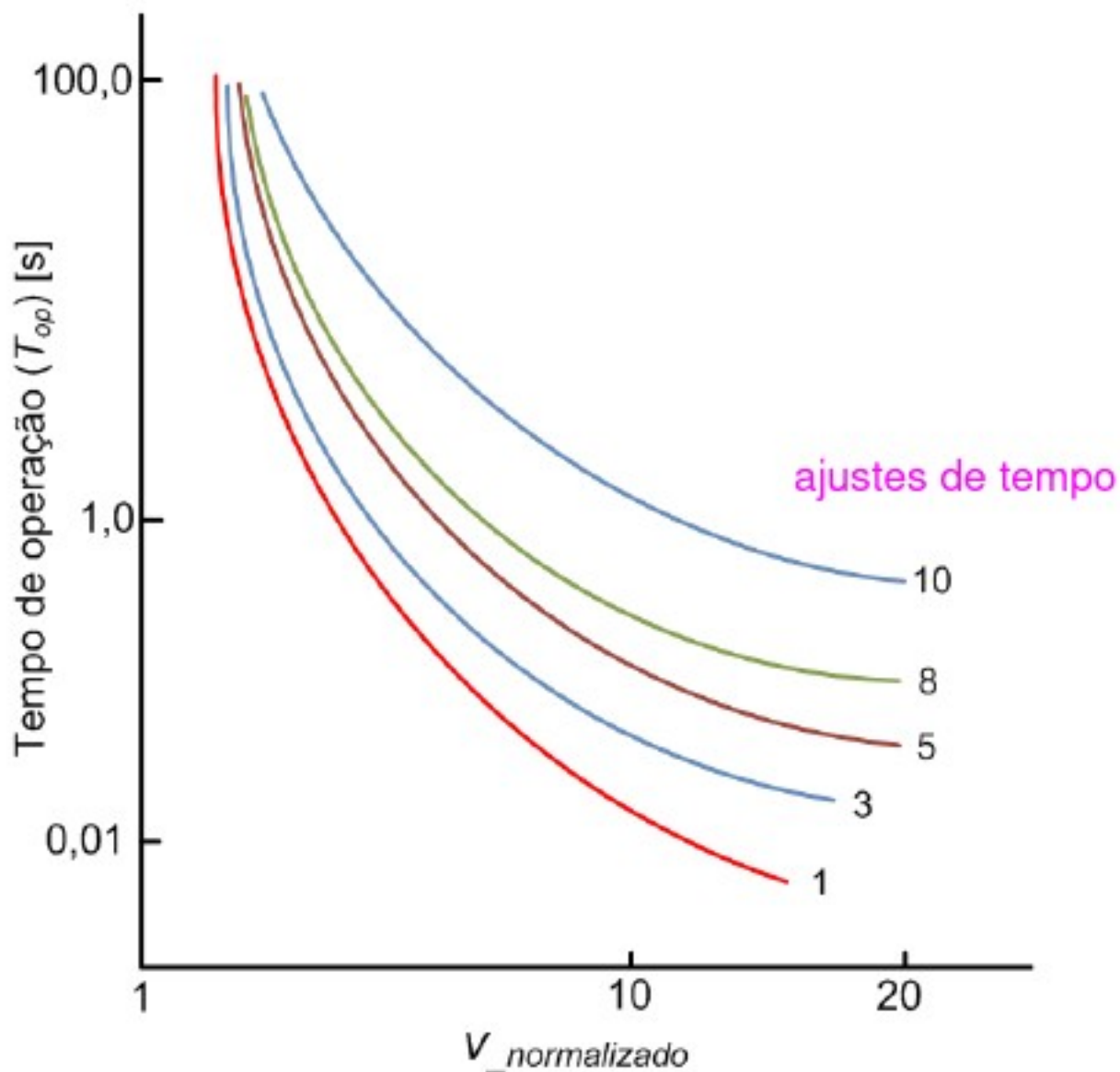
- Geradores conectados em paralelo a um dado barramento que alimentam uma carga, sendo um deles mantido em reserva girante, ou seja, em reserva operativa
  - Se, eventualmente, esse gerador for despachado sem a devida necessidade, cada um dos geradores experimentará um aumento súbito da tensão, cuja consequência é a redução na corrente fornecida à carga
- Desconexão súbita de elevados blocos de carga no barramento de um dado gerador
  - A súbita desconexão de blocos de carga irá provocar um aumento da tensão do gerador que tentará compensar esse efeito com a diminuição da corrente enviada à carga



- O princípio de operação do relé de sobretensão também é bastante simples, pois ele opera quando a tensão estimada nos terminais do gerador excede um valor limiar parametrizado durante o seu ajuste
- O ajuste dos relés de sobretensão é baseado na curva tempo tensão, contudo, a inclinação é negativa
- O que já foi visto sobre relés de sobrecorrente pode ser usado no caso dos relés de sub e sobretensão

# Ajuste do relé de sobretensão

Figura 2.20 | Curvas típicas do relé de sobretensão



Quanto maior for a sobretensão, mais rápido o relé deve operar

# Exemplo

- Relé de subtensão para proteger um gerador
- Tensão nominal de 13,8 kV
- Relé ajustado para operar com 3,5% de subtensão ( $V_{LIMIAR}$ )
- Alavanca de tempo (AT) igual a 0,15
- A curva tempo-tensão do fabricante é dada pela equação:

$$T_{OP} = \frac{AT}{1 - \frac{V_E}{V_{LIMIAR}}}$$

- Determine o tempo de operação ( $T_{OP}$ ) do relé, em ciclos, se a tensão nos terminais do gerador sofrer 20% de subtensão ( $V_E$ )

# Solução

relé ajustado em 3,5% de subtensão

$$V_{LIMIAR} = 13,8kV - (0,035 \times 13,8kV) = 13,317kV. \quad (2.12)$$

A tensão  $V_E$  de subtensão é

gerador sofre 20% de queda de tensão

$$V_E = 13,8kV - (0,2 \times 13,8kV) = 11,040kV. \quad (2.13)$$

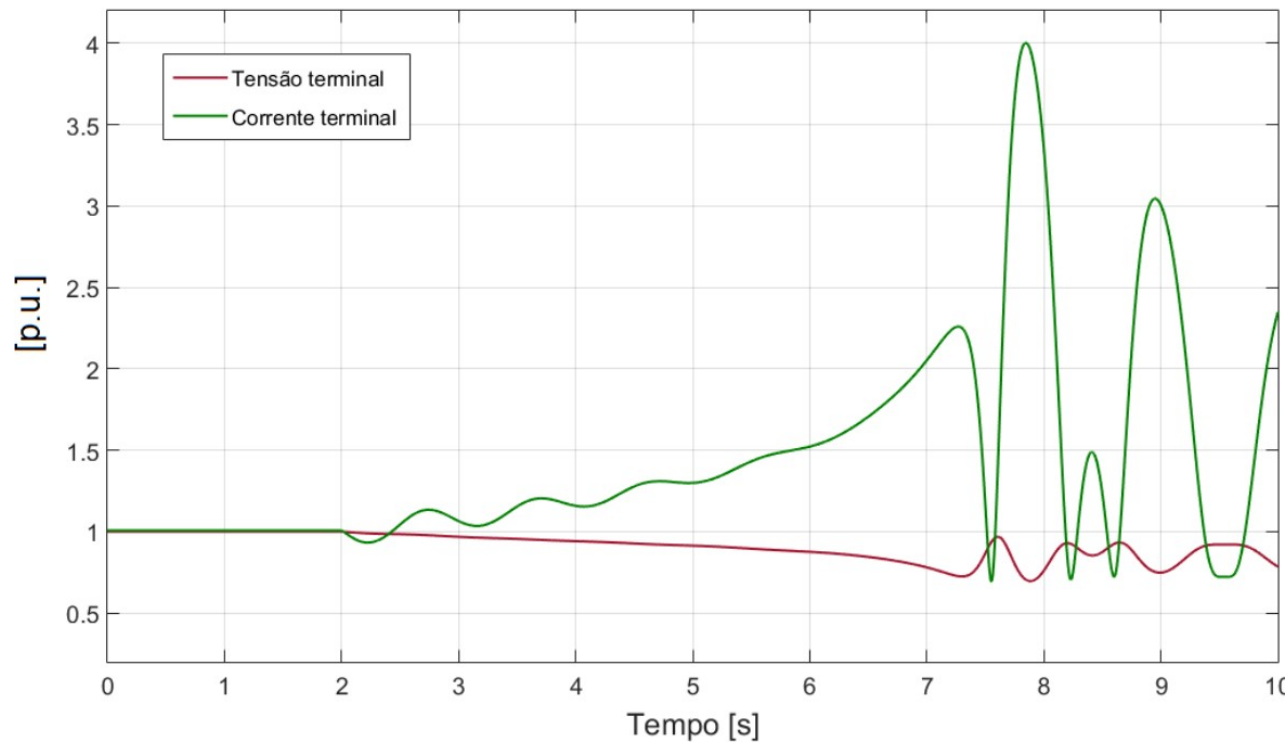
Com base na Equação (2.11), o tempo de operação ( $T_{OP}$ ) do relé, em segundos e em ciclos é expresso por

alavanca de tempo

$$T_{OP} = \frac{0,15}{1 - \frac{11,040kV}{13,317kV}} = 0,8772s = \boxed{52,6} \text{ ciclos} \quad (2.14)$$

$\times 60$

# Perda de sincronismo do gerador



Tensão e corrente terminais na perda de sincronismo

- Ocorre quando algum defeito provoca a perda do acoplamento magnético entre os enrolamentos de armadura e de campo, ou seja, quando a velocidade de rotação do gerador difere da velocidade nominal durante um determinado tempo

Fonte: SANTOS, CG. Simulação da proteção contra perda de sincronismo no solidThinking Embed. 2018.

# Proteção perda de sincronismo (78)

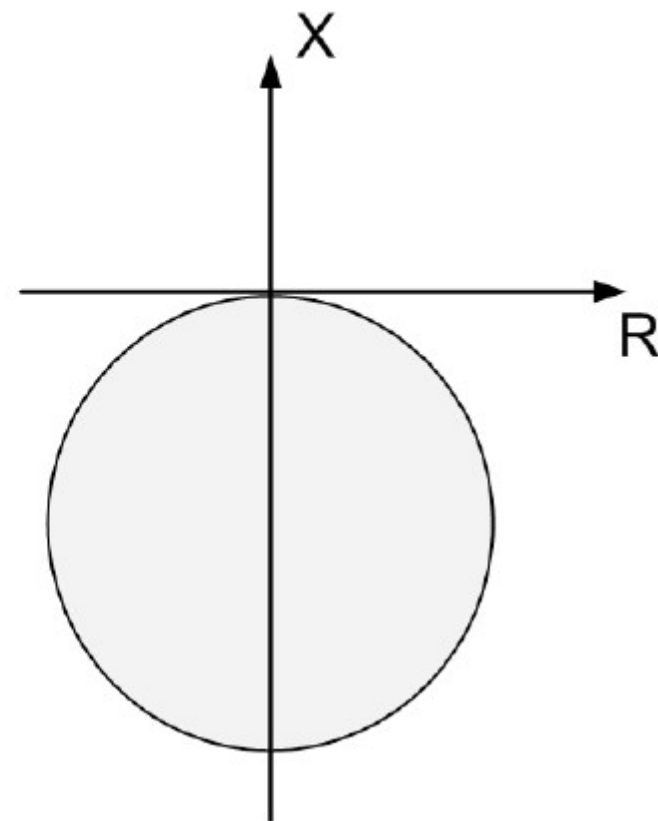
- A proteção contra a perda de sincronismo de um gerador baseia-se no princípio da **proteção de distância**, de modo a verificar a ocorrência de instabilidade transitória
- A proteção de distância utiliza a correlação entre fasores de tensão e corrente para o cálculo de uma impedância que **pode ou não** estar associada à ocorrência de uma falta
- Fasores de tensão e corrente são computados nos terminais do gerador de modo a determinar uma impedância representativa do sistema elétrico

- De acordo com o valor obtido do ângulo da impedância entre os fasores de tensão e corrente, é possível determinar condições de instabilidade transitória do gerador que caracterizam sua perda de sincronismo
- Na prática, a proteção de geradores contra perda de sincronismo baseia-se nos esquemas:
  - $M_{ho}$  (deslocado)
  - Blinder simples
  - Blinder duplo

# Mho

Figura 2.21 | Plano complexo R-X do esquema *Mho* deslocado

- Esse esquema representa a forma mais simples de se efetuar a proteção contra perda de sincronismo de um gerador
- Em essência, ele interpreta os fasores de tensão e corrente nos terminais do gerador e define o ângulo da impedância a partir do qual a proteção atuará



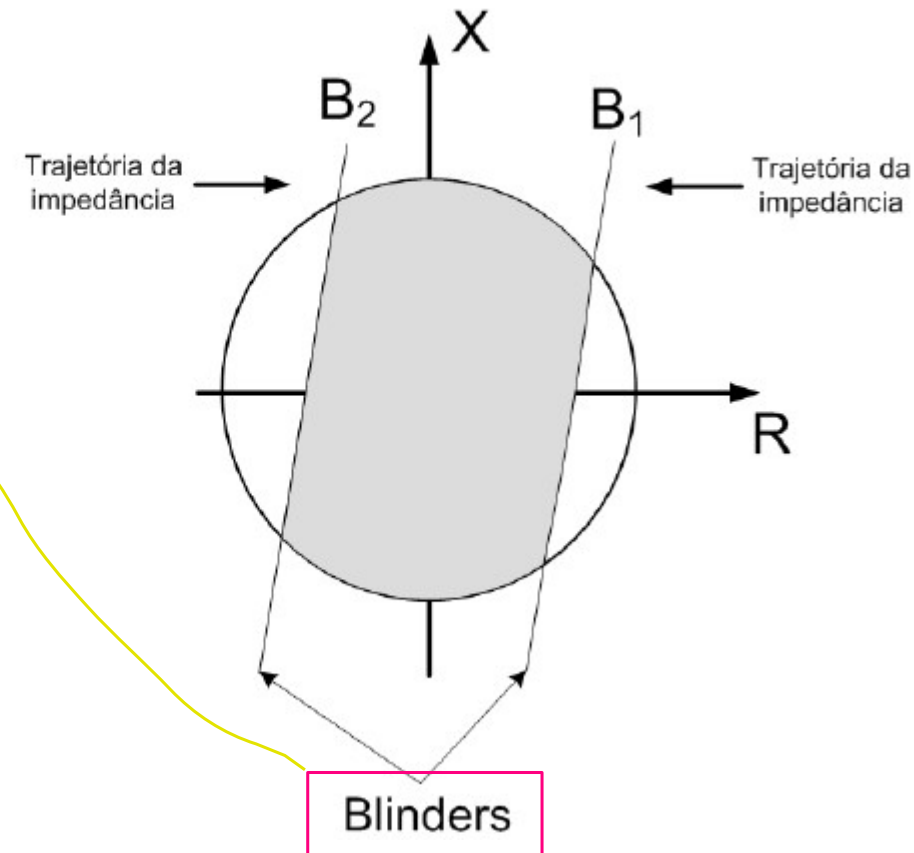
Cinza: delimitação da região de operação do esquema Mho (deslocado) no plano complexo R-X.



# Blinder simples

Figura 2.22 | Plano complexo R-X do esquema *Blinder* simples

- Utiliza-se a região do relé tipo impedância em conjunto com dois elementos lineares (*blinders*) para detecção da perda de sincronismo do gerador
- Os *blinders* são utilizados para **distinguir** entre faltas no sistema elétrico, como entre curto-circuito e as oscilações instáveis do gerador



Delimitação da região de operação do esquema Blinder simples no plano complexo R-X

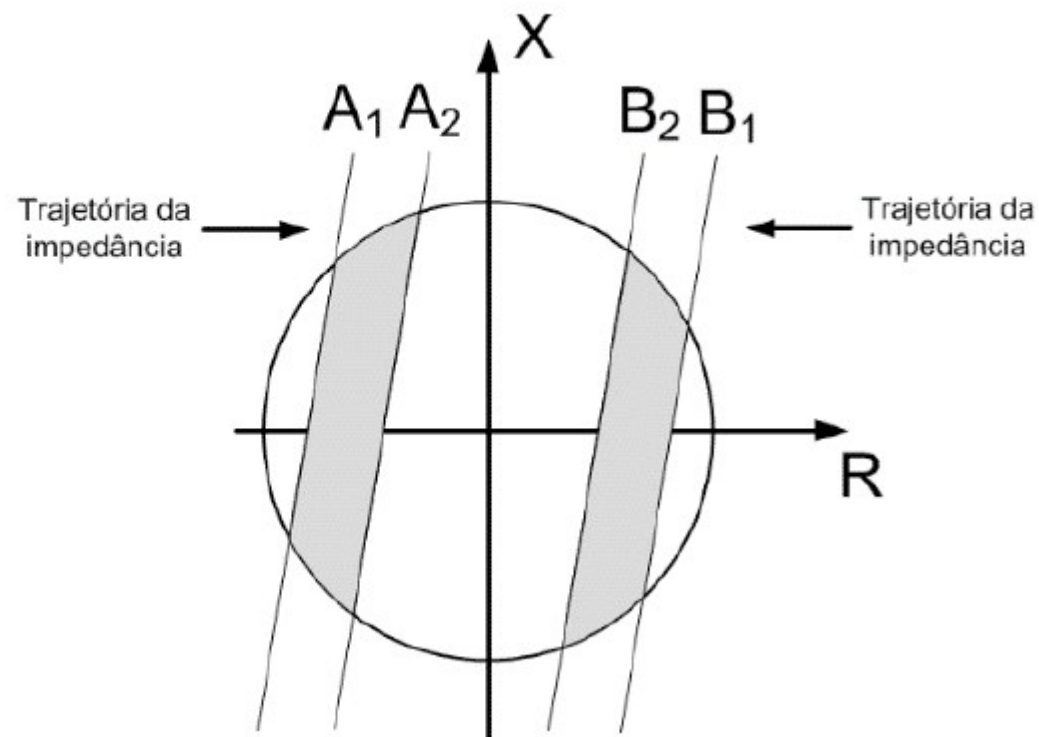
# Blinder simples

- A característica que distingue entre uma falta e uma oscilação do gerador é o tempo gasto pela trajetória da impedância para passar pelos dois *blindings*
- Por exemplo, antes da ocorrência de uma falta no sistema elétrico, a impedância computada pelo relé está localizada fora dos limites da região circular, contudo, no momento da ocorrência da falta, a impedância entra quase que instantaneamente na região circular
- Para o caso de uma oscilação instável do gerador, o comportamento da impedância calculada pelo relé varia no tempo, pois, devido ao efeito de inércia do gerador, a trajetória da impedância demanda um dado intervalo de tempo para entrar nos limites da região circular, passar por ambos os *blindings*, e sair na face oposta ao círculo

# Blinder duplo

Figura 2.23 | Plano complexo R-X do esquema *Blinder* duplo

- Esse esquema consegue avaliar a **perda de sincronismo** de geradores com base no **tempo em que a impedância passa entre os *blindars*** externos e internos do plano complexo R-X ( $B_1$  e  $B_2$  quando a trajetória da impedância é da direita para a esquerda ou de  $A_1$  para  $A_2$  quando a trajetória da impedância é da esquerda para a direita)



- Caso esse tempo seja **superior a um intervalo pré-definido**, pode-se inferir a ocorrência da perda de sincronismo do gerador

# Aplicação da proteção diferencial

(vide slide 38)

- A proteção diferencial é baseada na avaliação da diferença entre as correntes secundárias oriundas dos TCs alocados nos condutores fase e neutro do gerador
- Isso é possível pelo fato de que, em regime permanente, as correntes primárias dos dois TCs são idênticas
- Assim, relés diferenciais aplicados a geradores apresentam uma operação extremamente sensível e segura
- Essa análise pode ser expandida para geradores trifásicos sem grandes dificuldades

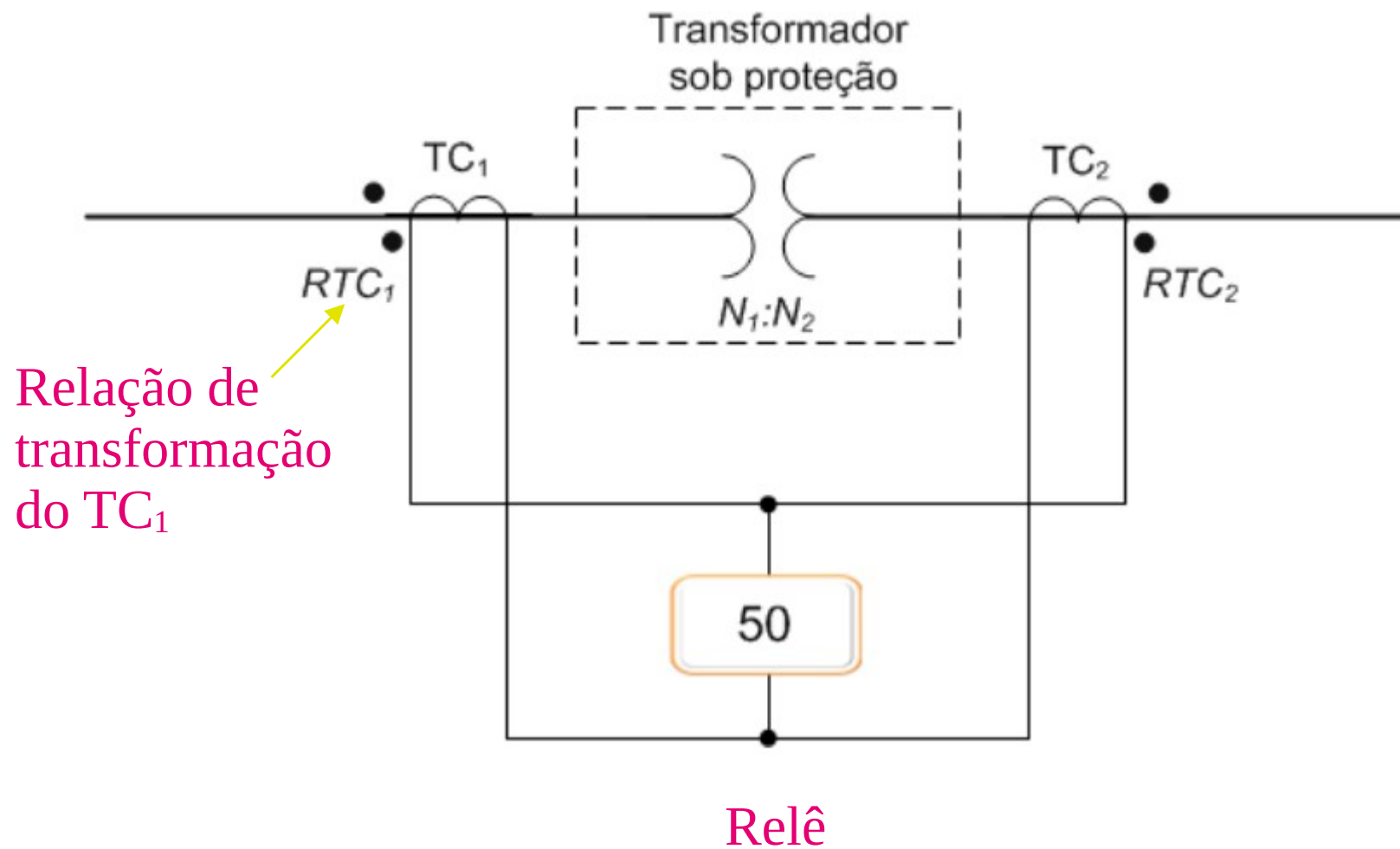
# Barramento

- Elemento do sistema elétrico responsável pelo entroncamento (convergência conectiva) entre os demais equipamentos do sistema elétrico, tais como
  - LTs, transformadores, geradores, cargas
- Em um sistema elétrico podemos ter várias configurações de barramentos que dependem da topologia do sistema a ser obedecida, dentre as principais citam-se
  - Barramento simples, duplo, em anel, e de transferência

# Barramento

- A **proteção do barramento** também é de vital importância e ela é sistematicamente aplicada com o intuito de limitar ao máximo o impacto que um barramento sob falta tende a provocar na operação do sistema elétrico
- Devido ao fato do barramento ser considerado como um ponto de conexão, a lei das correntes de Kirchhoff pode ser levada em consideração na elaboração de esquemas de proteção para esses elementos
- A proteção diferencial foi vista também em U2S1

# Proteção diferencial



# Proteção usando Unidades de Medição Fasorial Sincronizada (PMUs)<sup>24</sup>

- No processamento digital de sinal o tempo é um pré-requisito obrigatório para garantir a sincronização da medição fasorial, especialmente para realizar a análise direta do ângulo de fase
- Com o advento do Sistema de Posicionamento Global (GPS), que possui uma poderosa capacidade de disseminar informações precisas de tempo, a tecnologia de medição fasorial teve sua gênese
- A Unidade de Medição Fasorial Sincronizada (PMU - Phasor Measurement Unit) é o principal equipamento de um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS)



- O equipamento realiza a aquisição de medições em diversos pontos de um sistema elétrico geograficamente distante e processa os dados amostrados dos sinais de modo a sincronizá-los com um pulso de relógio denominado PPS (Pulse Per Second) fornecido pelo sistema GPS
- A precisão do sistema GPS em disseminar informações de tempo é tão elevada que o atraso temporal do pulso PPS em qualquer ponto da superfície terrestre é da ordem de  $\pm 1 \mu\text{s}$

- Com isso, torna-se possível obter medições fasoriais sincronizadas, das grandezas de tensão e corrente relacionadas ao barramento no qual a PMU foi instalada
- A PMU, dependendo logicamente da quantidade de canais de instrumentação disponíveis, é capaz de medir a magnitude e o ângulo de fase da tensão, assim como a magnitude e o ângulo de fase de todas as correntes que incidem e deixam o barramento
- A aplicação da PMU no sistema elétrico possibilitou medir a defasagem angular em tempo real entre barramentos de subestações localizadas em pontos geográficos distantes

- A defasagem angular resultante entre barramentos de subestações é importante na análise da operação do sistema elétrico, pois indica se o sistema está operando em condição normal ou não
- É possível elaborar diversos esquemas de proteção com base na magnitude-ângulo de fase-tempo
- A aplicação de PMUs possibilita inferir o momento exato em que a falta ocorreu, assim como sua duração com base no tempo UTC, a localização da falta, a identificação do tipo de falta, e o tempo de atuação do esquema de proteção

# Exemplo

- Impedâncias vistas por um relé de distância baseado no esquema *blinder* simples:

Tabela 2.4 | Impedâncias ( $\Omega$ ) do evento 1 para cada instante de tempo  $t$

t1	$4,57 + j7,52$
t2	$5,44 + j8,90$
t3	$6,50 + j8,70$
t4	$7,60 + j9,86$
t5	$2,50 - j2,00$
t6	$1,10 - j2,55$
t7	$-1,15 - j2,80$
t8	$-2,65 - j2,23$
t9	$-2,55 + j0,23$
t10	$-2,45 + j1,83$

Tabela 2.5 | Impedâncias ( $\Omega$ ) do evento 2 para cada instante de tempo  $t$

t1	$4,55 + j7,55$
t2	$4,50 + j6,15$
t3	$4,00 + j6,35$
t4	$4,15 + j5,15$
t5	$3,50 + j4,00$
t6	$2,50 + j2,00$
t7	$0,75 + j1,20$
t8	$-1,00 - j0,25$
t9	$-2,40 - j0,85$
t10	$-3,50 - j0,50$

# Exemplo

- A região delimitada no plano complexo R-X é composta por um círculo centrado na origem com raio igual a  $4 \Omega$  e dois *blindings* verticais que interceptam o eixo real em  $\pm 2 \Omega$

(slide a seguir)

- Pergunta: qual(is) tabela(s) reflete(m) uma a perda de sincronismo do gerador?

# Solução

Figura 2.24 | Plano R-X assumindo a Tabela 2.4

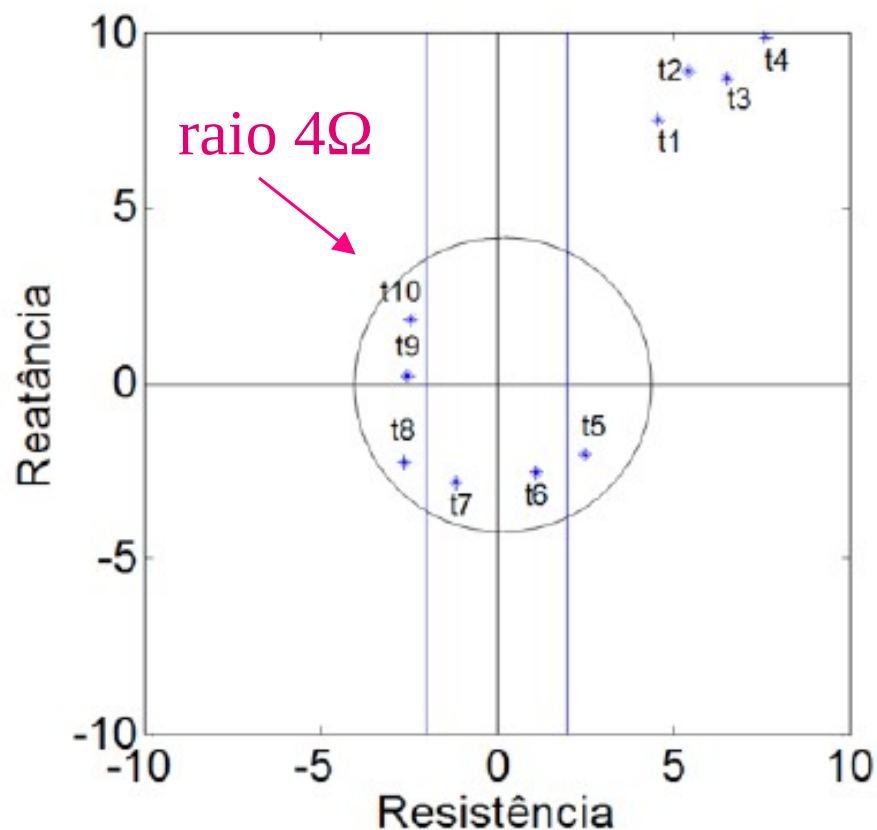
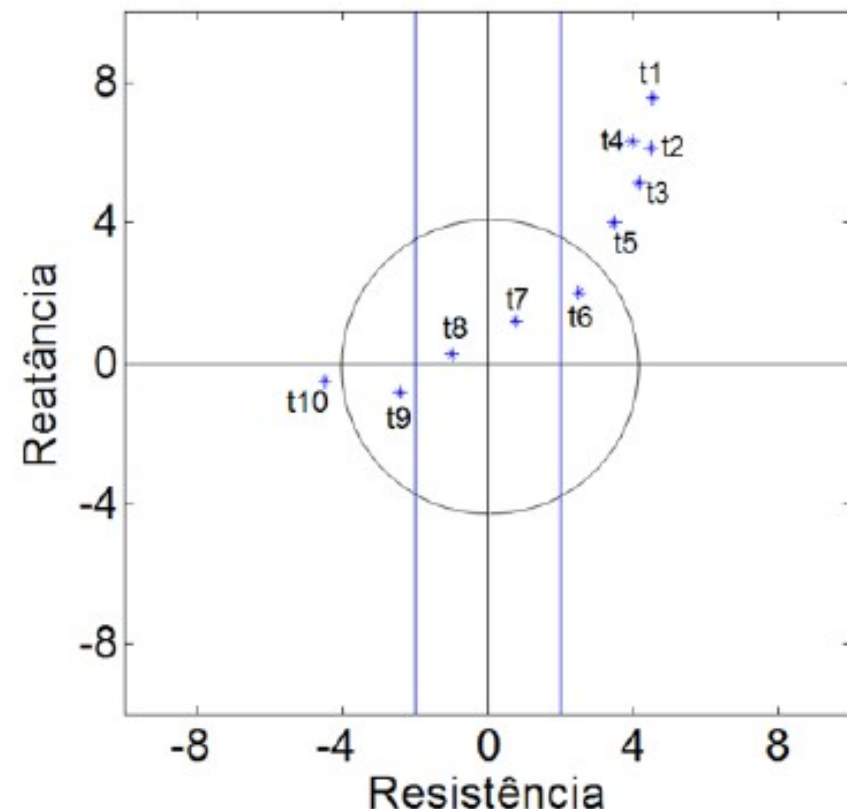


Figura 2.25 | Plano R-X assumindo a Tabela 2.5



Região delimitada no plano complexo R-X referente ao esquema Blinder simples, assim como os valores das impedâncias tomadas nos seus respectivos instantes de tempo

# Análise da tab. 2.4 (fig. 2.24)

(vide slide anterior)

- Podemos constatar que as quatro primeiras impedâncias estão fora da região delimitada pelo círculo, indicando que durante o tempo  $t_1$  a  $t_4$  não há qualquer alteração na operação do sistema vista no barramento do gerador
- No instante de tempo  $t_5$ , o valor da impedância recai diretamente dentro do círculo e se mantém até o instante  $t_{10}$
- Nesse caso podemos afirmar que os dados da Tabela 2.4 não estão associados à perda de sincronismo do gerador, mas sim, com uma falta no sistema elétrico no qual o gerador está conectado

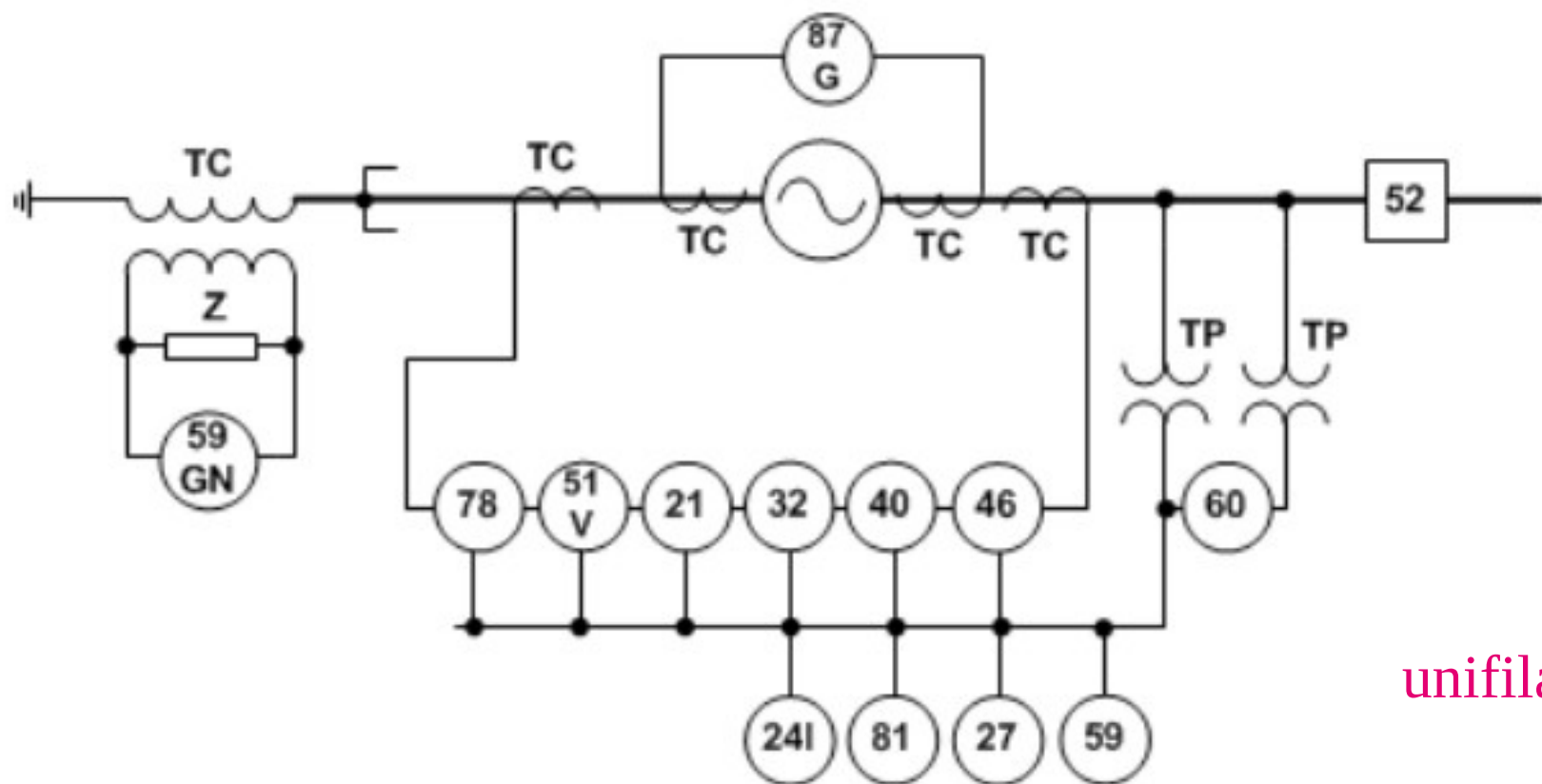
# Análise da tab. 2.5 (fig. 2.25)

- Há uma evolução dinâmica das impedâncias vistas pelo relé a partir do instante de tempo  $t_5$
- É ocasionada pelo efeito de inércia do gerador, assim, a trajetória da impedância demanda um dado intervalo de tempo para entrar nos limites da região circular, passar por ambos os *blindings* e sair na face oposta ao círculo
- Portanto, os dados referentes à Tabela 2.5 estão associados com a perda de sincronismo do gerador



# Proteções adicionais aplicadas a geradores

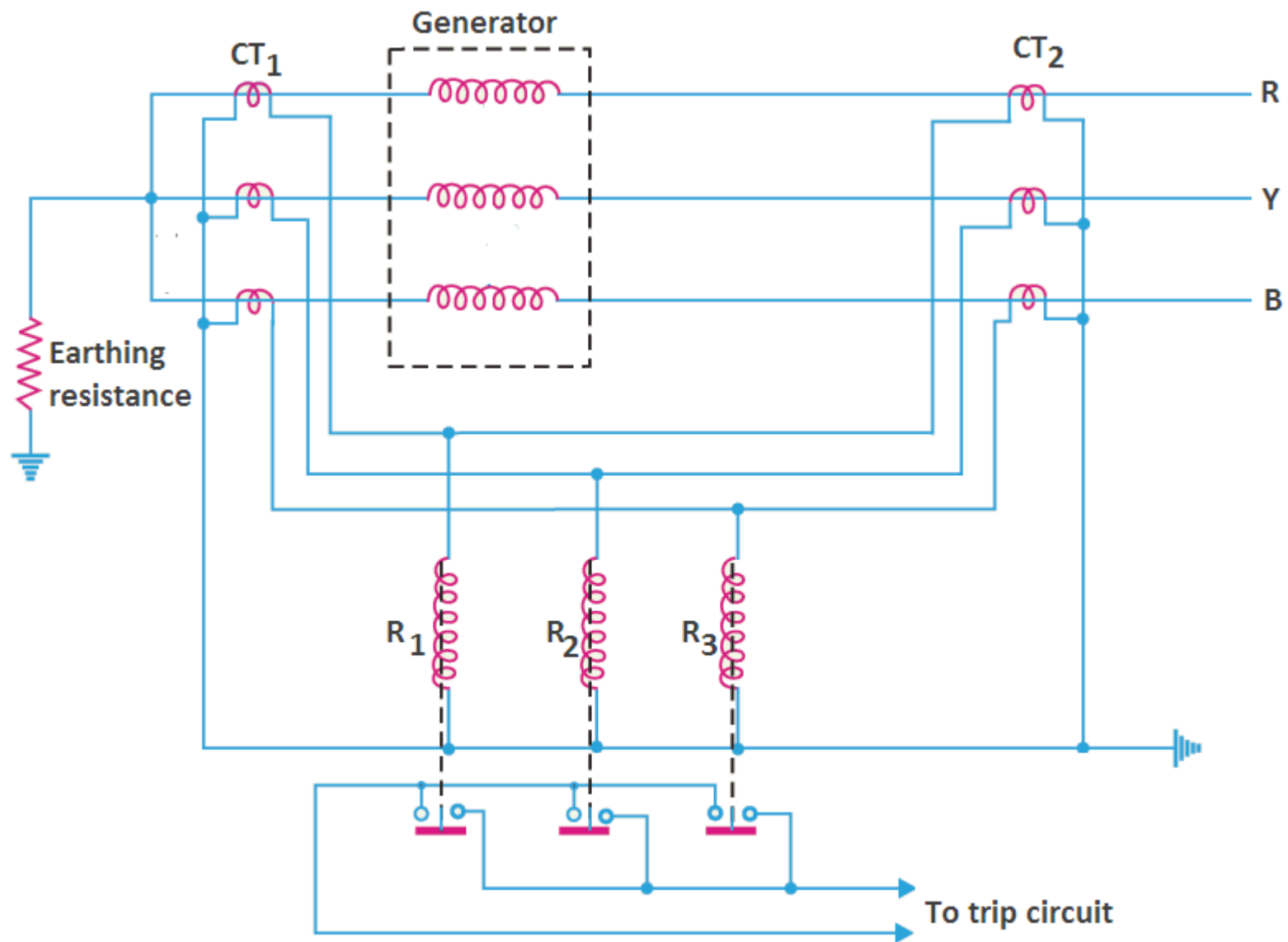
Figura 2.26 | Esquema típico de proteção de geradores da empresa contratante



unifilar

A norma internacional ANSI / IEC 61850 dispõe a função executada por cada relé de proteção <http://selinc.com/pt/products/tables/ansi>

# Exemplo multifilar



Differential protection of generator

# Tabela ANSI

exemplo de  
tabela com  
informações  
de relês

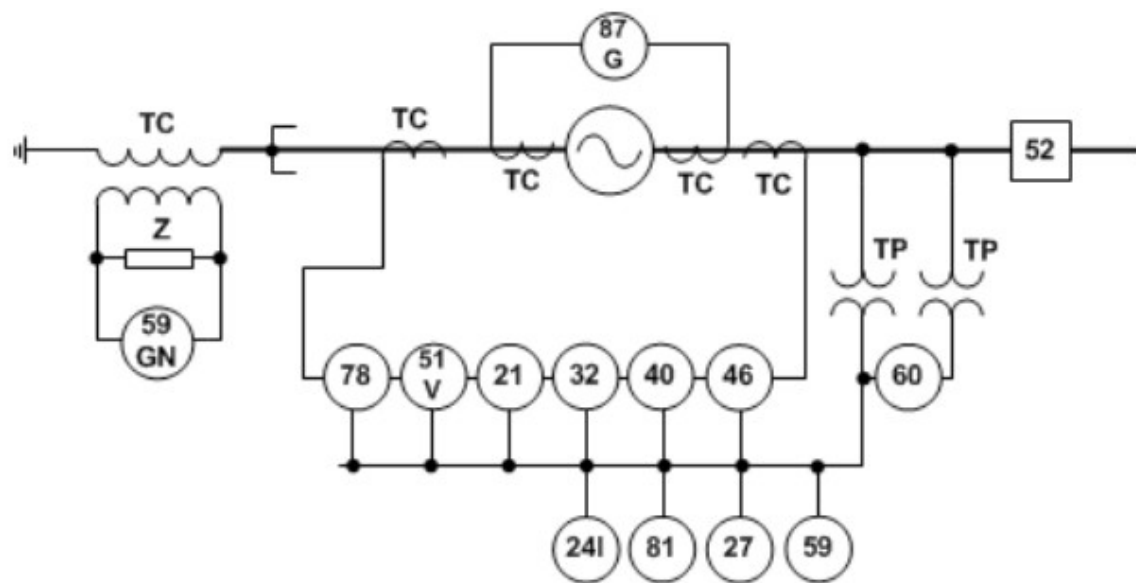
Calendário 2022 da Universidade SEL já está disponível. Programa-se!

Nr	Denominação
1	Elemento Principal
2	Relé de partida ou fechamento temporizado
3	Relé de verificação ou interbloqueio
4	Contator principal
5	Dispositivo de interrupção
6	Disjuntor de partida
7	Relé de taxa de variação
8	Dispositivo de desligamento da energia de controle
9	Dispositivo de reversão

# Proteções adicionais

Estes relés necessitam apenas de sinais oriundos de TPs

- Proteção contra sub e sobretensão por meio dos relés 27 e 59
- Proteção contra sub ou sobre frequência pelo relé 81
- Proteção contra sobre-excitação (Volts/Hertz) usando o relé 24l
- Proteção de balanço de tensão por meio do relé 60

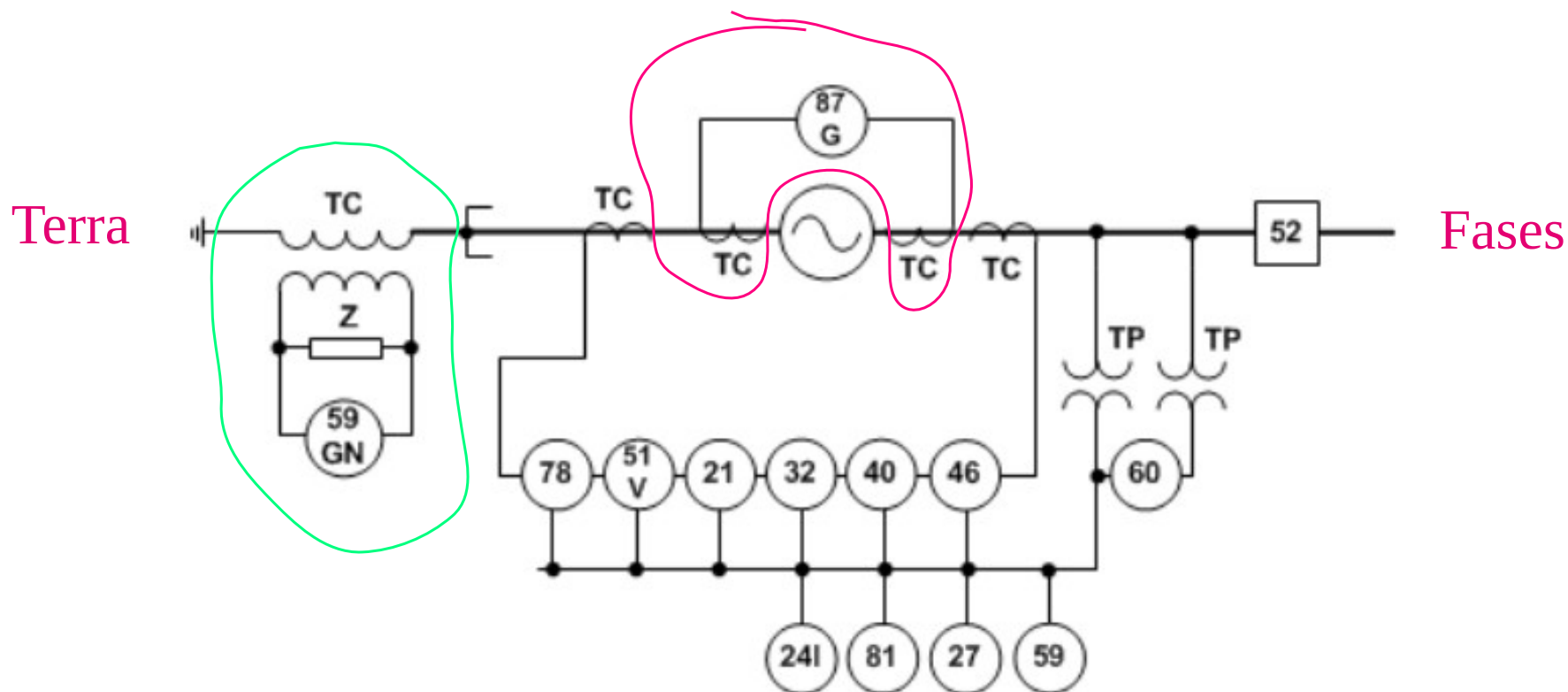


# Proteções adicionais

Estes relés necessitam dos sinais oriundos de TPs e TCs

- Proteção contra desbalanceamento de corrente usando o relé 46
- Proteção contra perda de excitação ou perda de campo com base no relé 40
- Proteção contra inversão de fluxo através do relé direcional de potência 32
- Proteção contra perda de sincronismo através do relé 78
- Existem duas proteções de retaguarda
  - relé 51V (temporizado) que executa a proteção contra sobrecorrentes com restrição de tensão
  - relé de distância 21

# Proteções adicionais



- O gerador dispõe de proteção diferencial por meio do relé 87G e proteção contra sobretensões usando o relé 59GN, que podem ser provocadas por curtos-circuitos entre o estator da máquina e o condutor neutro fortemente aterrado