

# Desafios e soluções para a regulação de tensão em redes com alta penetração de geração distribuída – ID 4195

**Autor:** *Rafael Fernando Mariano*

**Empresa:** *Beckwith Electric (Hubbell Utility Solutions)*

Realization:

instituto  
**abradee**



Host Company:

**CEMIG**



XXV Seminário  
Nacional de  
Distribuição de  
Energia Elétrica

**SENDI**  
**2025**  
BELO HORIZONTE

# Introdução

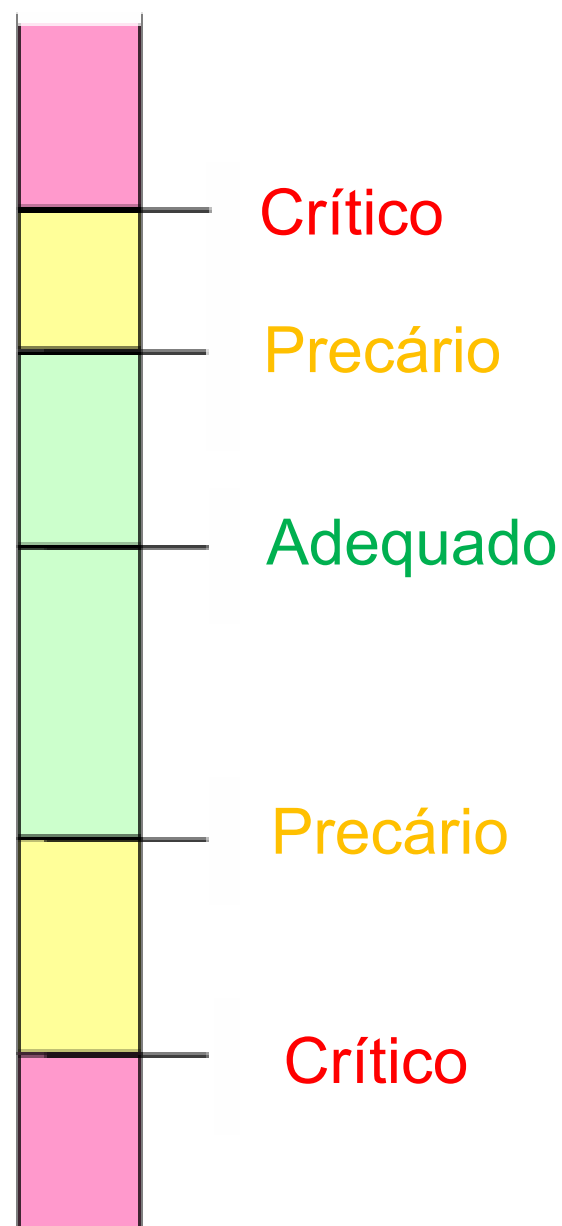
- Até 28 de abril de 2025, mais de 3,4 milhões de unidades de geradores distribuídos estavam conectados ao sistema de energia de distribuição, fornecendo uma capacidade instalada de quase 39 GW. Esses dados mostram um crescimento exponencial, visto que em 2020 eram pouco mais de 253 mil geradores distribuídos e cerca de 3.23 GW de potência instalada. (Fonte: ANEEL)
- O crescimento da geração distribuída (G.D.), traz diversos desafios para operação do sistema de distribuição de energia, no que se refere a qualidade de energia elétrica, destacam-se:
  - Subtensão
  - Sobretenção
  - Desbalanço de tensão
  - Flutuação de tensão
  - Impacto no fator de potência
  - Distorção harmônica
  - Operações excessivas de banco de reguladores de tensão e capacitores
  - Regulação de tensão imprópria para condição de fluxo reverso
  - Regulação imprópria para reconfiguração da rede

**Riscos de mais unidades consumidoras (U.C.) terem transgressões de tensão, e sujeitas a receberem compensação financeira da distribuidora.**

**A violação de tensão tem se tornado o evento mais comum com a alta penetração de geração distribuída.**

**Em 2024 teve-se 1.560.092 compensação financeira por transgressão de tensão, totalizando R\$ 239.925.868,60. No período de 2020 teve-se 1.260.735 compensações com um total de R\$115.415.831,44. (Fonte: ANEEL)**

**\*IPCA acumulado no período de 29,82% (Fonte: Banco Central)**



Classificação da tensão de atendimento  
Fonte: Adaptado do PRODIST Módulo 8

Realization:

instituto  
**abradee**

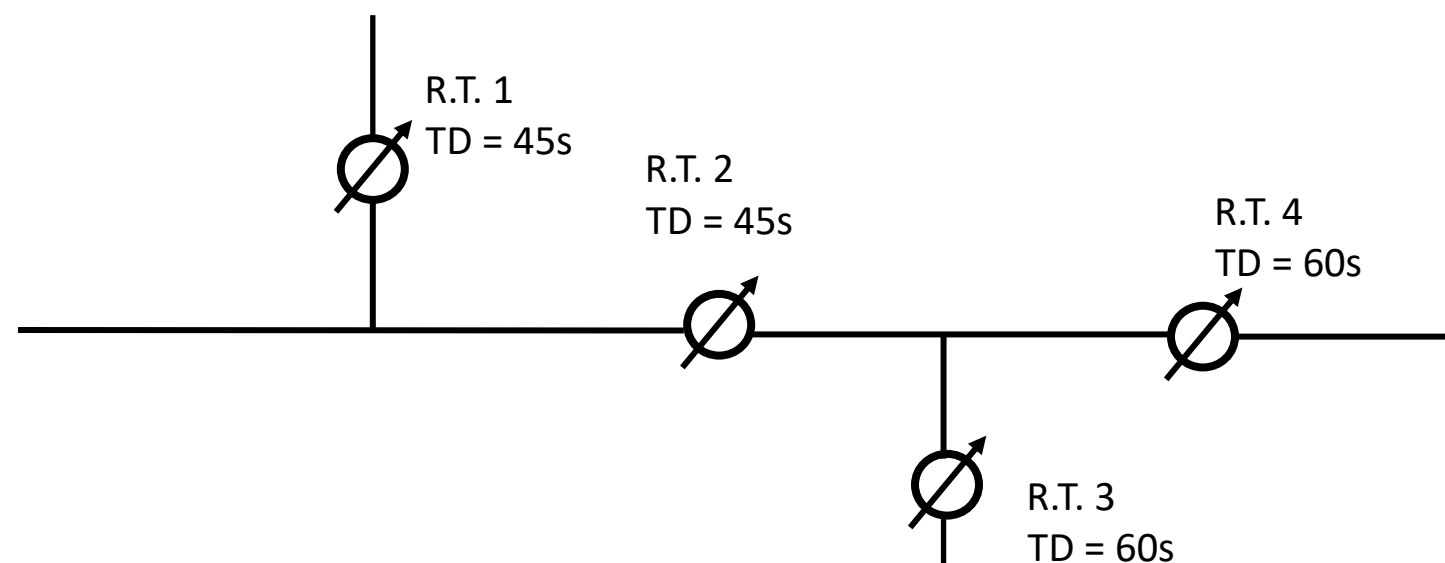
HostCompany:

**CEMIG**



# Regulação de Tensão

## Reguladores em cascata na rede de distribuição

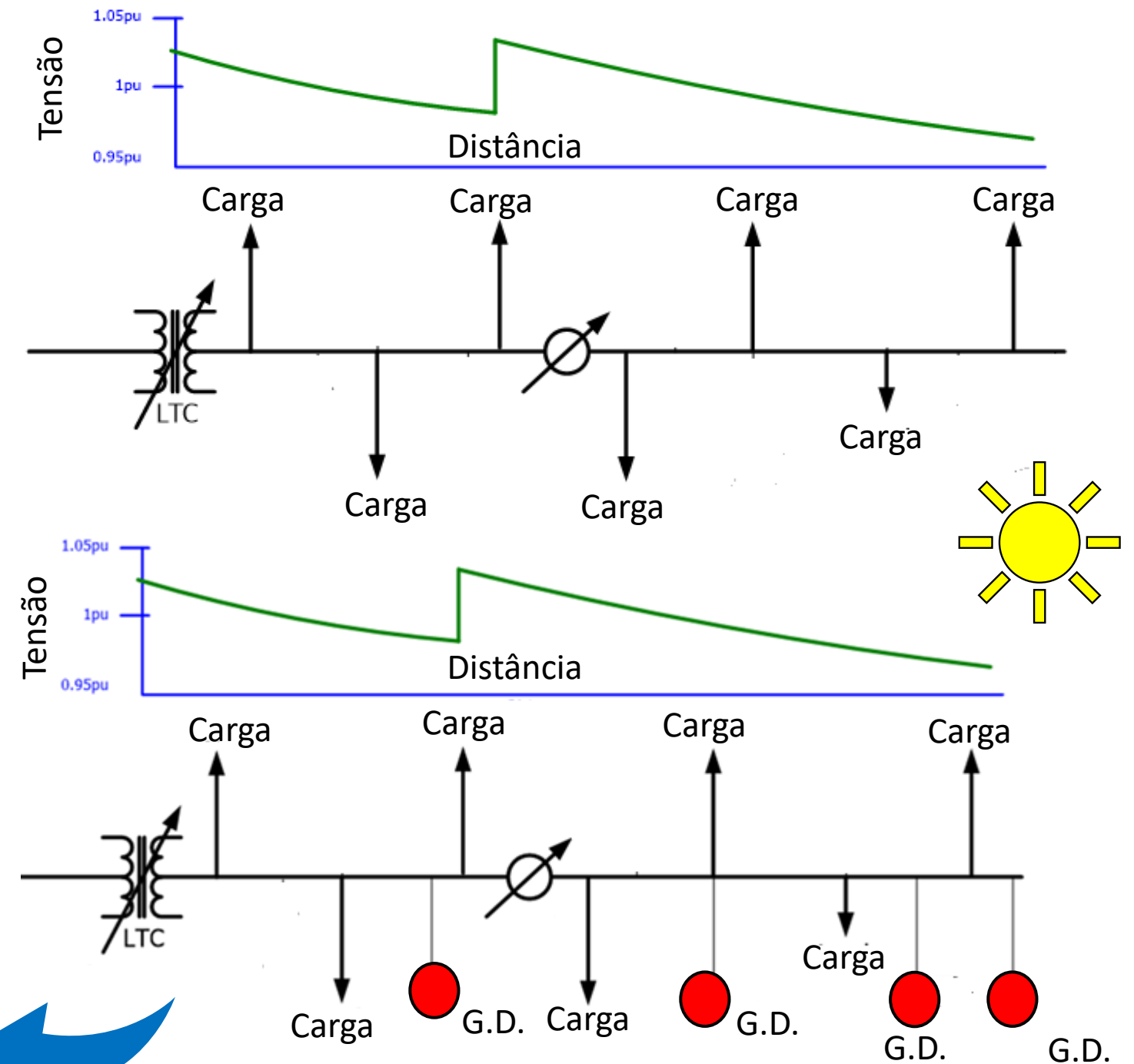


\*Recomenda-se um intervalo de 15s entre os reguladores em série

**A regulação de tensão com alta penetração de g.d. sofre efeitos de sombreamento nos painéis solares, passagens temporárias de nuvens, variação de geração devido condições climáticas, efeito do fluxo reverso e entre outros.**

**A dinâmica de regulação por tempo definido traz uma inércia elevada na resposta de regulação, permitindo transgressões no sistema de distribuição de energia e operações tardias dos reguladores de tensão automático no sistema de distribuição**

\*Nota: Mais de 99% da potência instalada de G.D. são do tipo de geração solar fotovoltaica. (Fonte: ANEEL)



Realization:

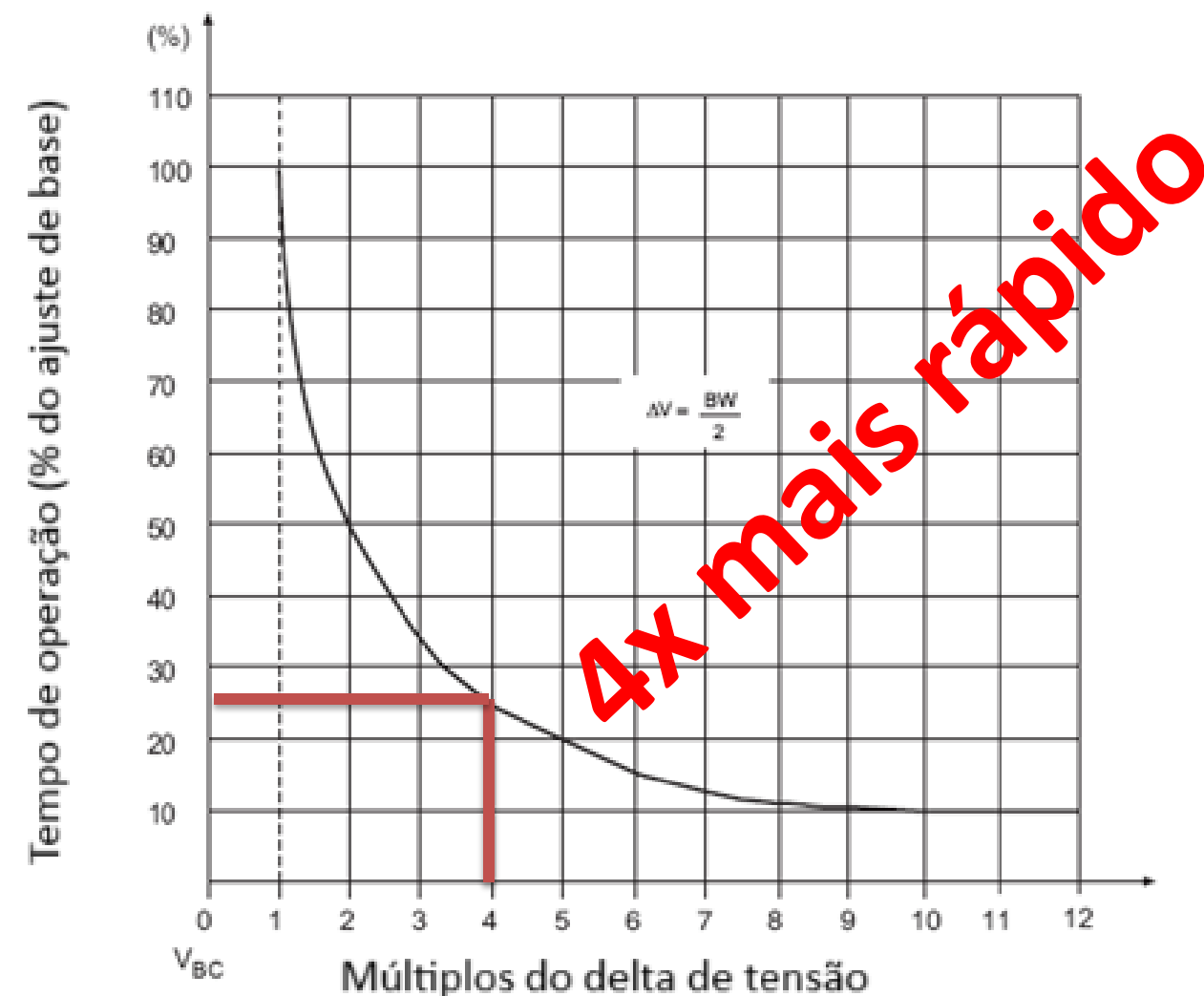
instituto  
**abradee**

HostCompany:

**CEMIG**

# Resposta por tempo inverso

$$\text{Múltiplo do delta de tensão} = (|Tensão Medida - Tensão Base|) / \left(\frac{L \cdot Banda}{2}\right)$$



Similar ao conceito de curva de proteção de curto circuito. Quanto maior a queda de tensão mais rápido é a resposta de atuação. Importante compreender que tempo inverso difere do recurso de atuação por tensão de emergência, essa função se mantém presente e se assimila ao recurso de função instantânea.

## Supondo os seguintes parâmetros:

- Tensão base do regulador ajustado em 122Vca
- Largura de banda de 3Vca
- Tempo definido de 45s

Um sombreamento ocorre e afeta boa parte da geração distribuída alocada no alimentador, ocasionando um afundamento de tensão de 6Vca na base secundária, ou seja, a tensão no controle está em **116Vca**.

## Método convencional:

- Regulação inicia após 45s

## Tempo inverso

- Tem-se um delta múltiplo de 4
- Regulação inicia com 25% do tempo base definido, portanto em 11,25s
- Tempo de resposta 4x mais rápido que o método de tempo definido convencional

Realization:

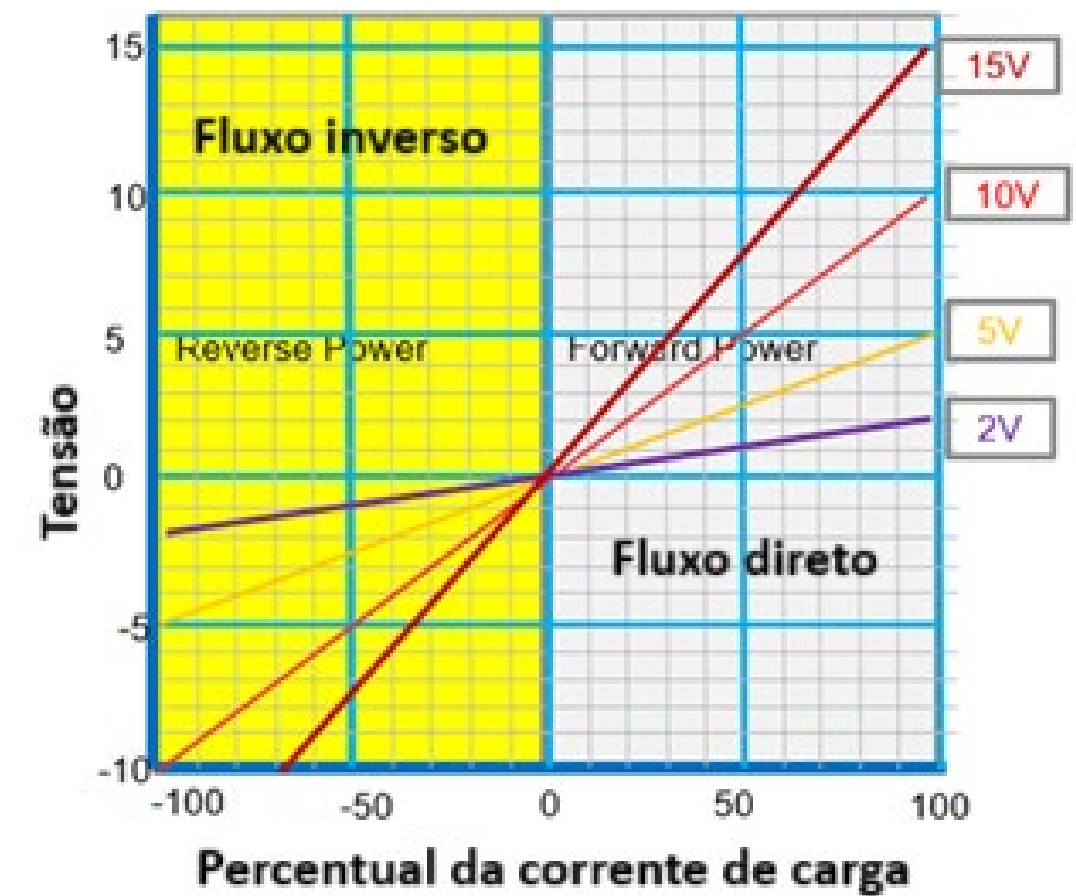
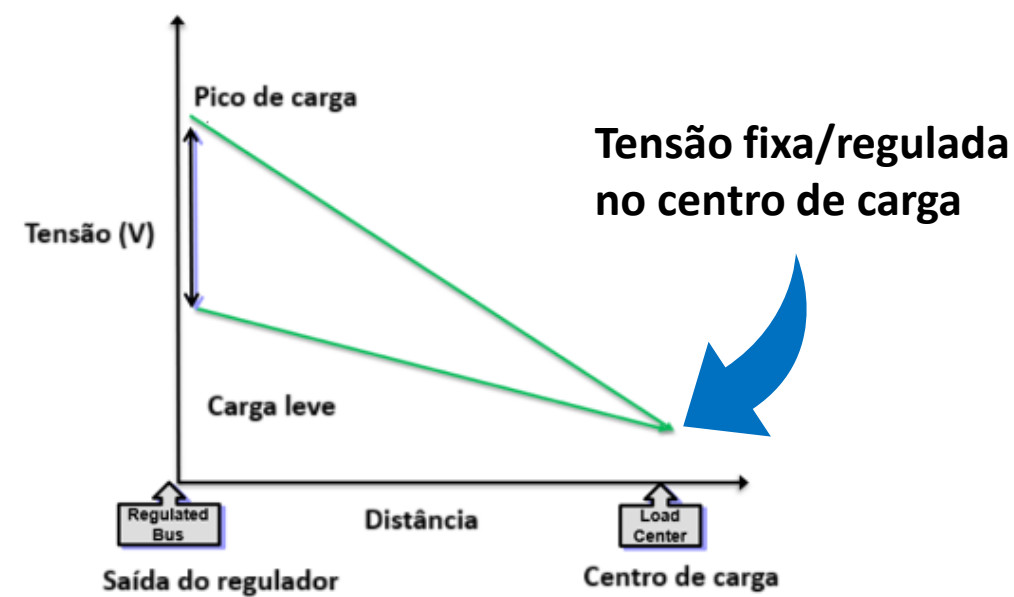
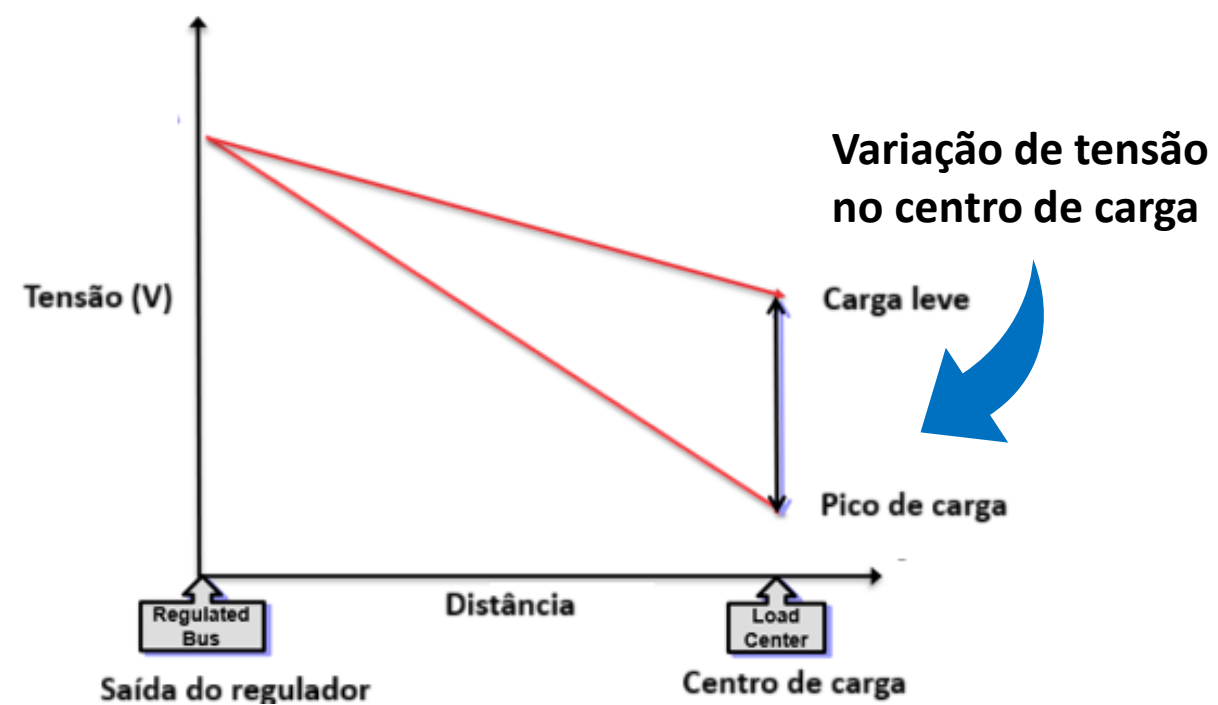
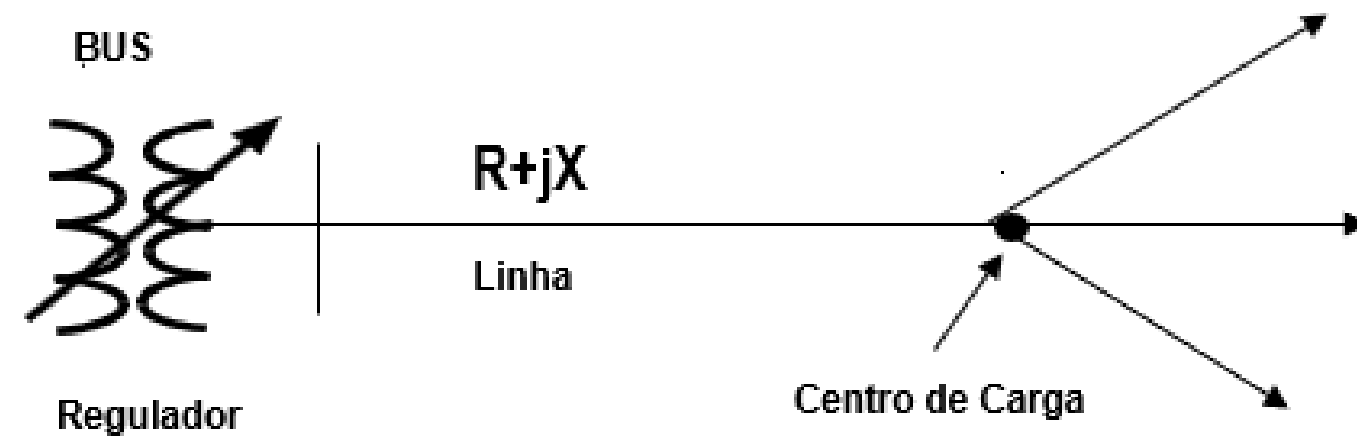
instituto  
**abradee**



HostCompany:

**CEMIG**

# Compensação de tensão



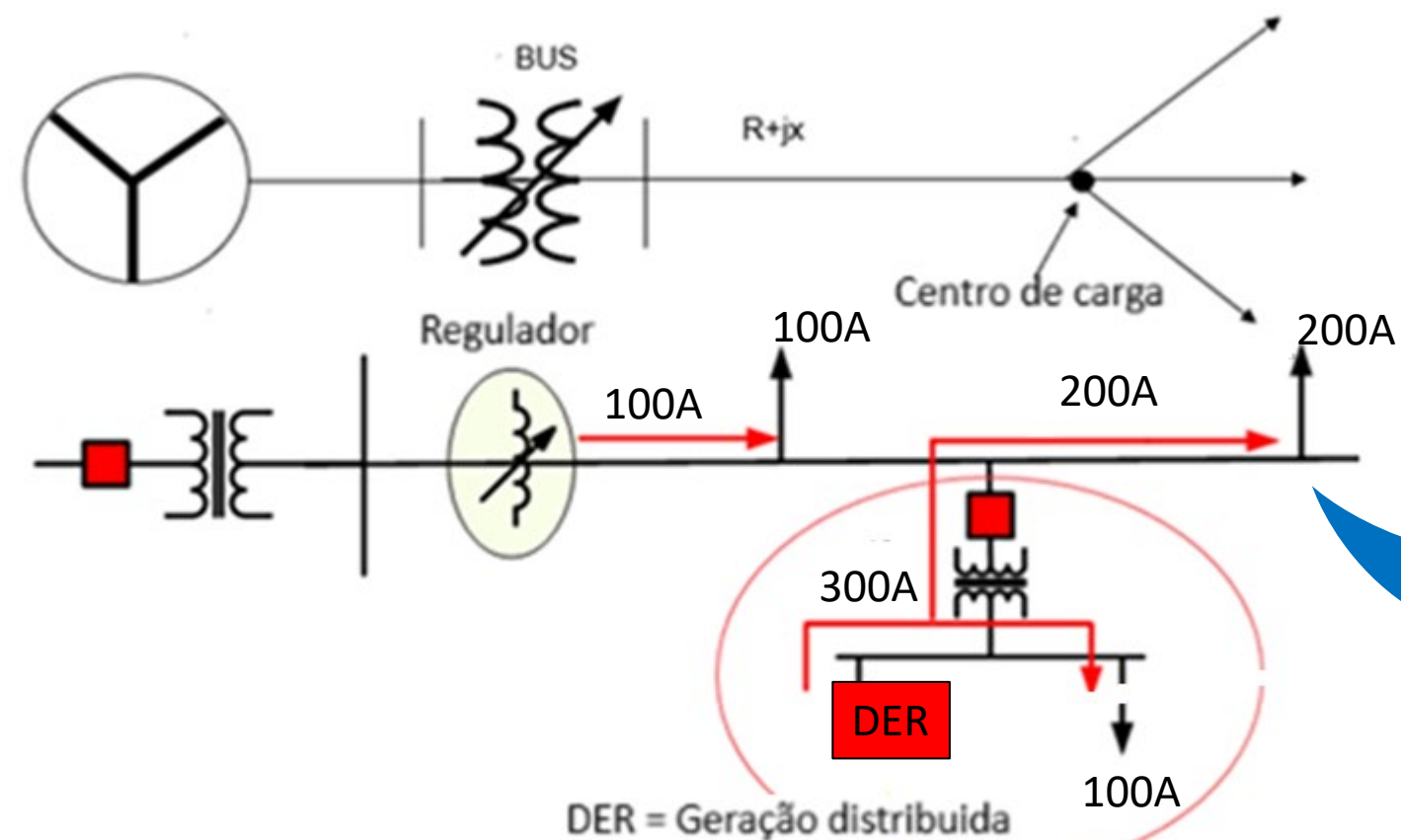
Realization:

HostCompany:

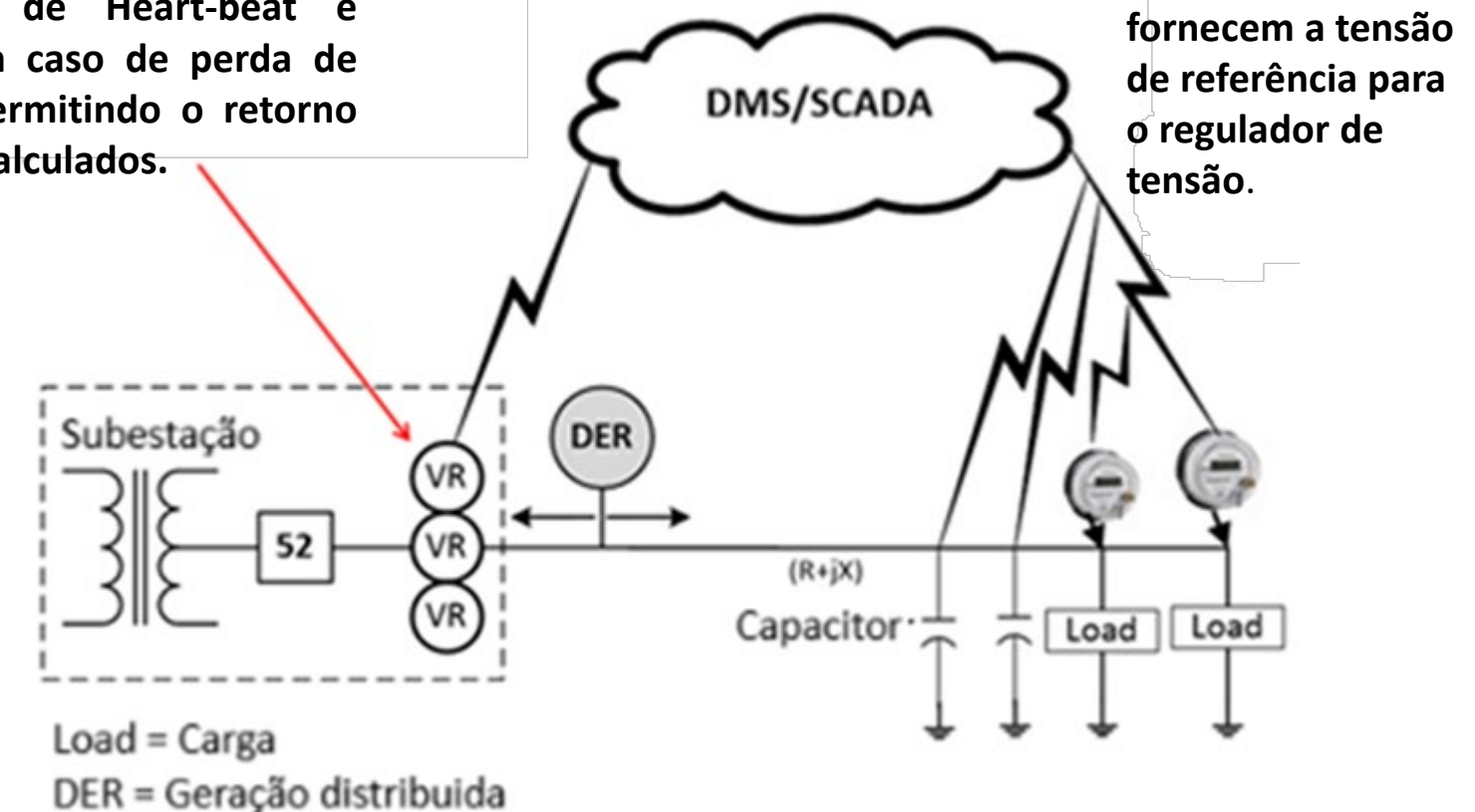


# Compensação remota

## Compensação de queda de tensão remota por DNP3



Monitoramento de Heart-beat é fundamental em caso de perda de comunicação, permitindo o retorno para os ajustes calculados.



AMR, Religadores, banco de cap., sensores, chaves, seccionizadores fornecem a tensão de referência para o regulador de tensão.



O conceito de *heart-beat*, trata-se de um monitoramento do canal de comunicação entre o controle e o DMS/SCADA, caso seja detectado a perda de comunicação o ajuste de compensação assume um valor pré-definido pelo usuário

Realization:

instituto  
abradee

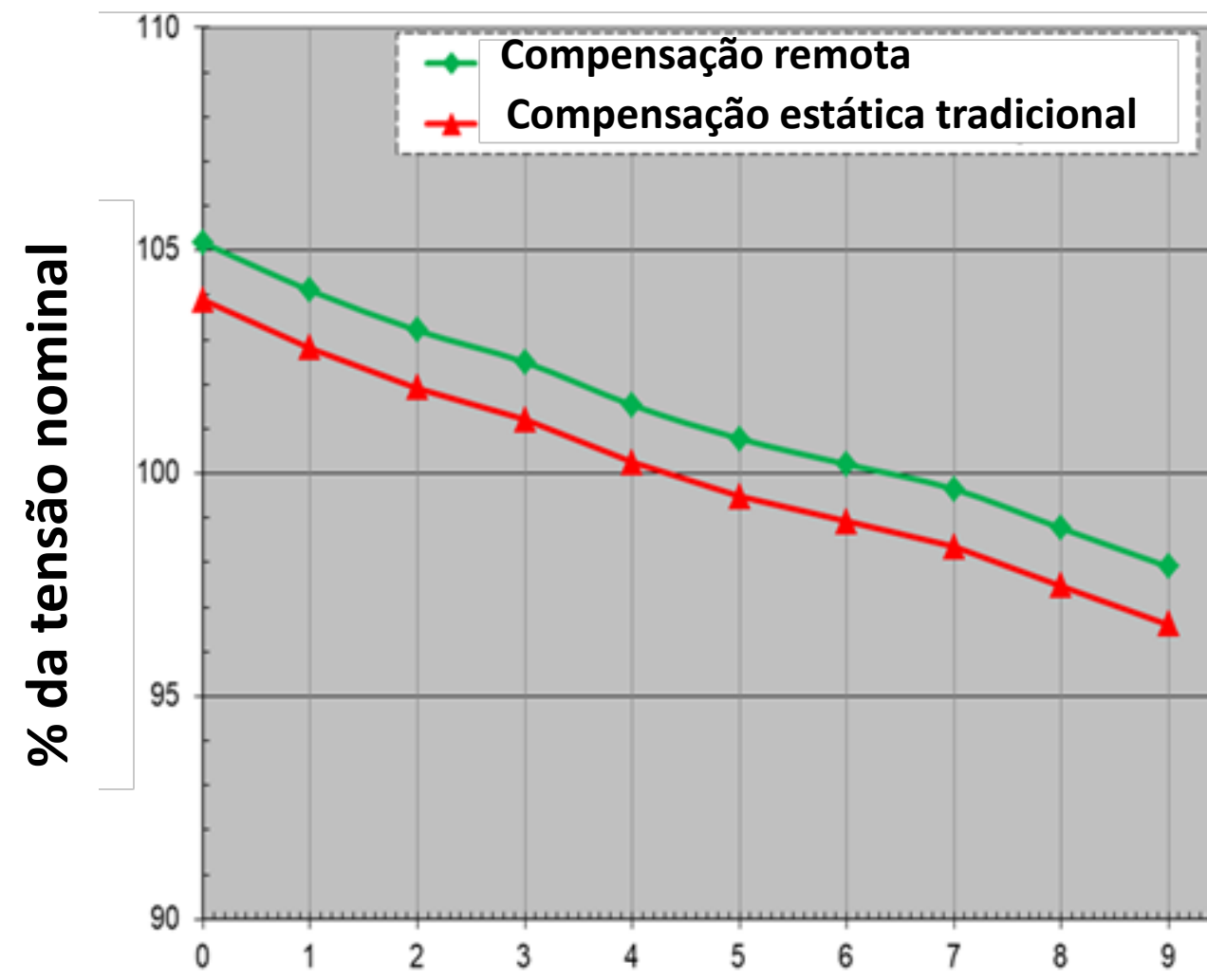


HostCompany:

CEMIG

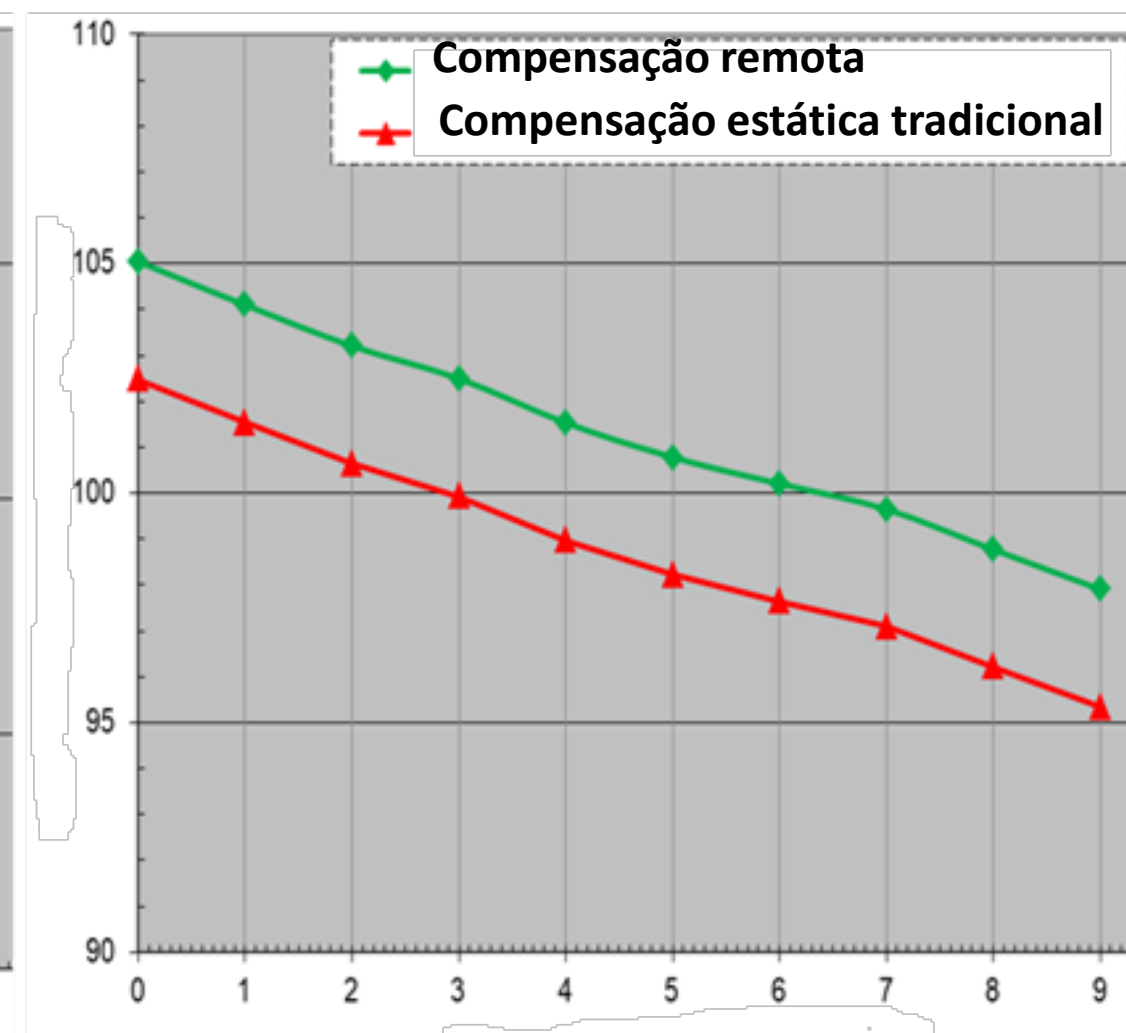
# Compensação remota

## Simulação G.D. próximo a subestação



Pontos de distância da rede de energia

Simulação com 0% de penetração de G.D.



Pontos de distância da rede de energia

Simulação com 20% de penetração de G.D.

Realization:

instituto  
abradee

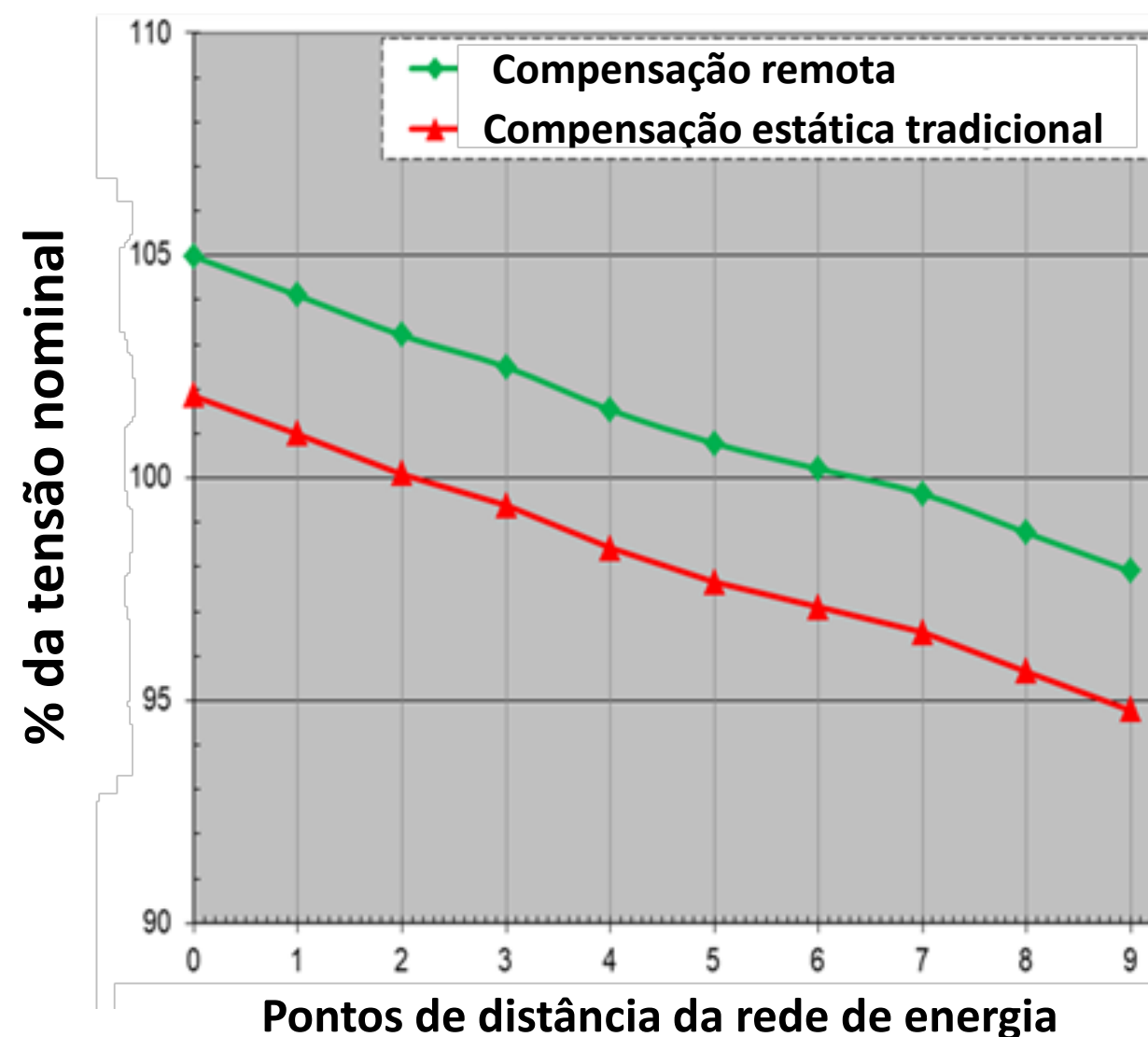


HostCompany:

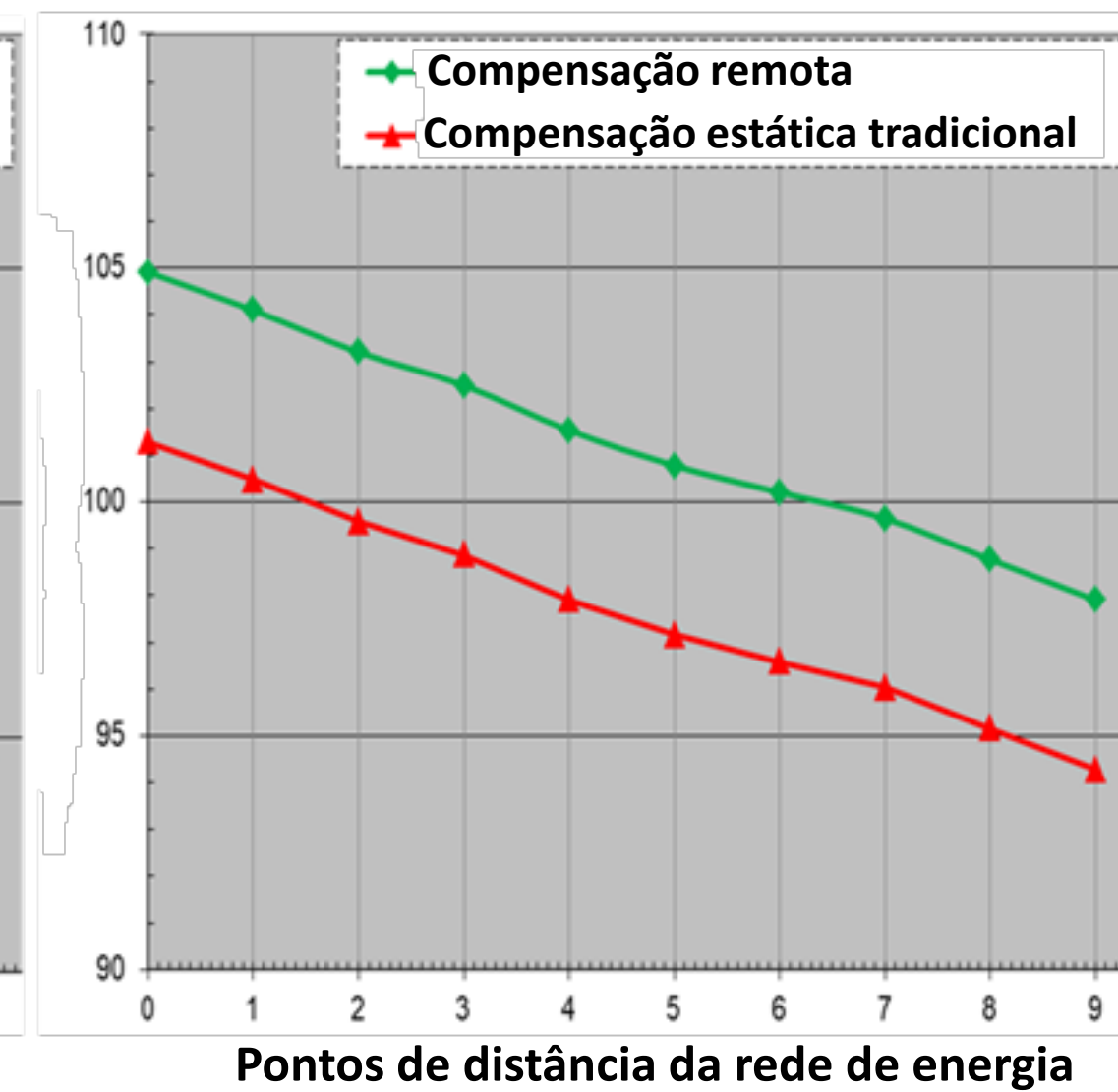
CEMIG

# Compensação remota

## Simulação G.D. próximo a subestação



Simulação com 30% de penetração de G.D.



Simulação com 40% de penetração de G.D.

Realization:

instituto  
abradee



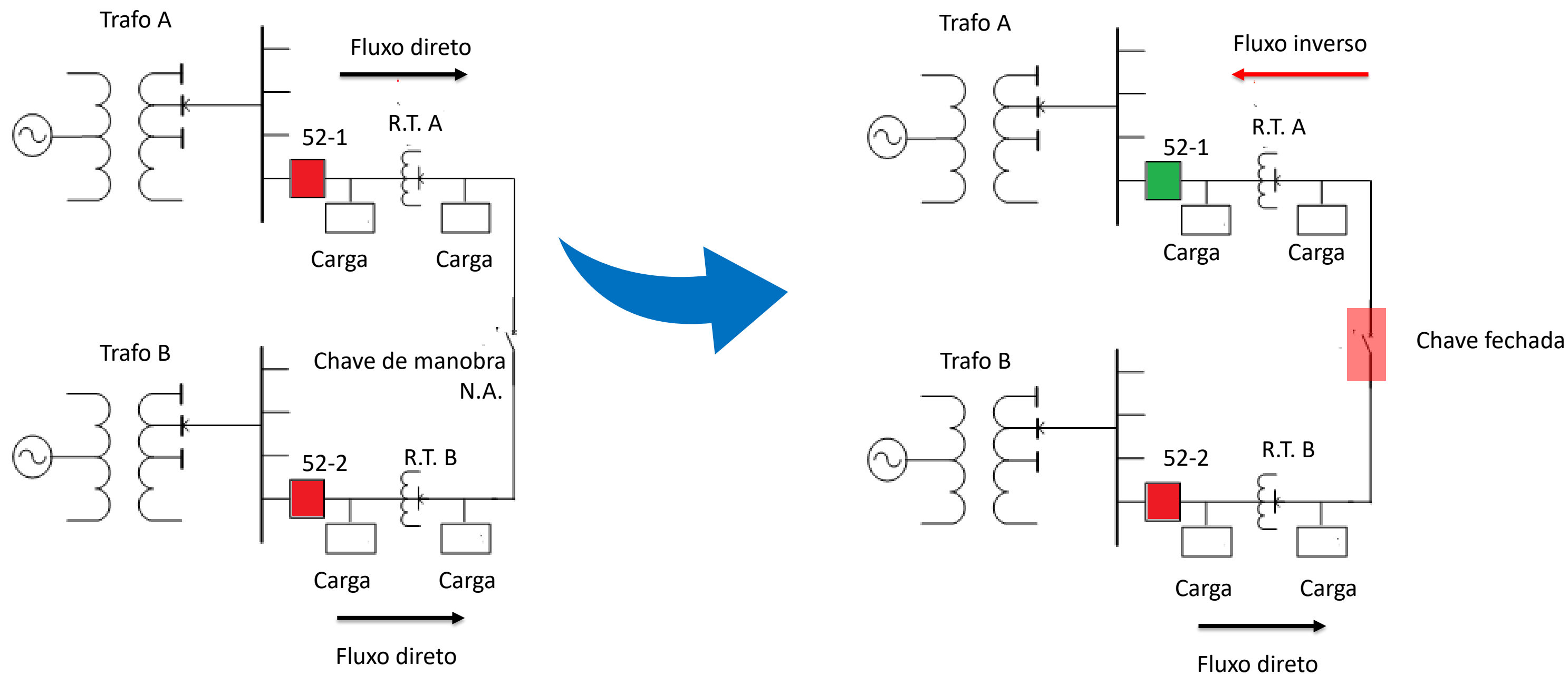
HostCompany:

CEMIG



# Inversão de fluxo

## Inversão de fluxo devido a manobra na rede de energia



No modo regulação de fluxo inverso por manobra de rede, o controle irá inverter a referência de regulação, calculando a tensão para a regulação da carga. Um novo ajuste é utilizado para tensão dereferência e compensação de queda de tensão.

Realization:

instituto  
**abradee**

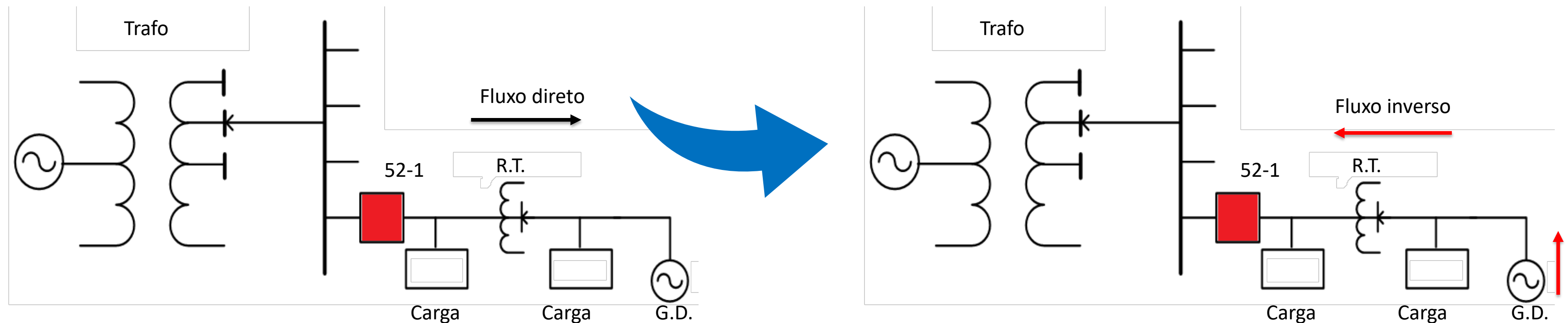


HostCompany:

**CEMIG**

# Inversão de fluxo

## Inversão de fluxo devido a geração distribuída



No modo de regulação de fluxo inverso geração distribuída, o controle irá manter a referência de regulação como fluxo direto, entretanto permitindo novos ajustes de parâmetros para compensação de queda de tensão para o fluxo reverso.

Realization:

instituto  
**abradee**

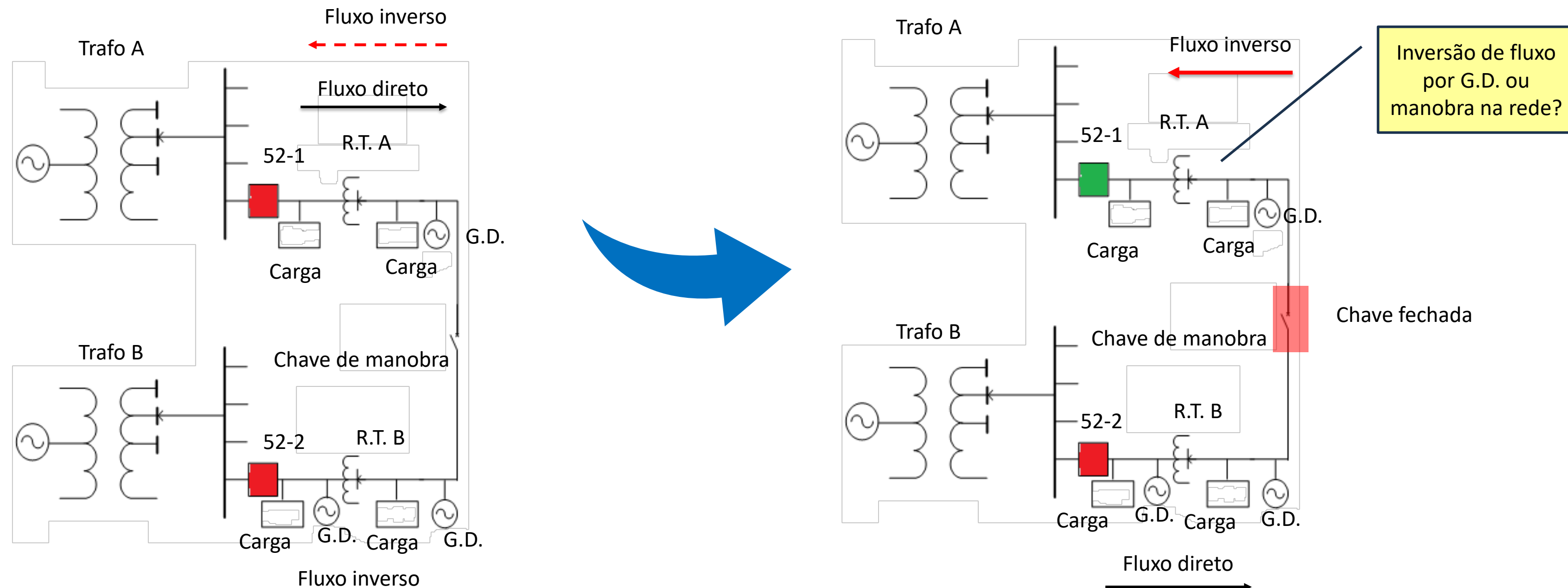


HostCompany:

**CEMIG**

# Inversão de fluxo

## Inversão de fluxo devido a manobra e ou geração distribuída



No modo auto determinação o controle detecta a razão da inversão do fluxo e automaticamente determina o modo de operação, evitando que o regulador leve a regulação a extremos, viole níveis de tensão, e execute comutações excessivas.

Realization:

instituto  
**abradee**

HostCompany:

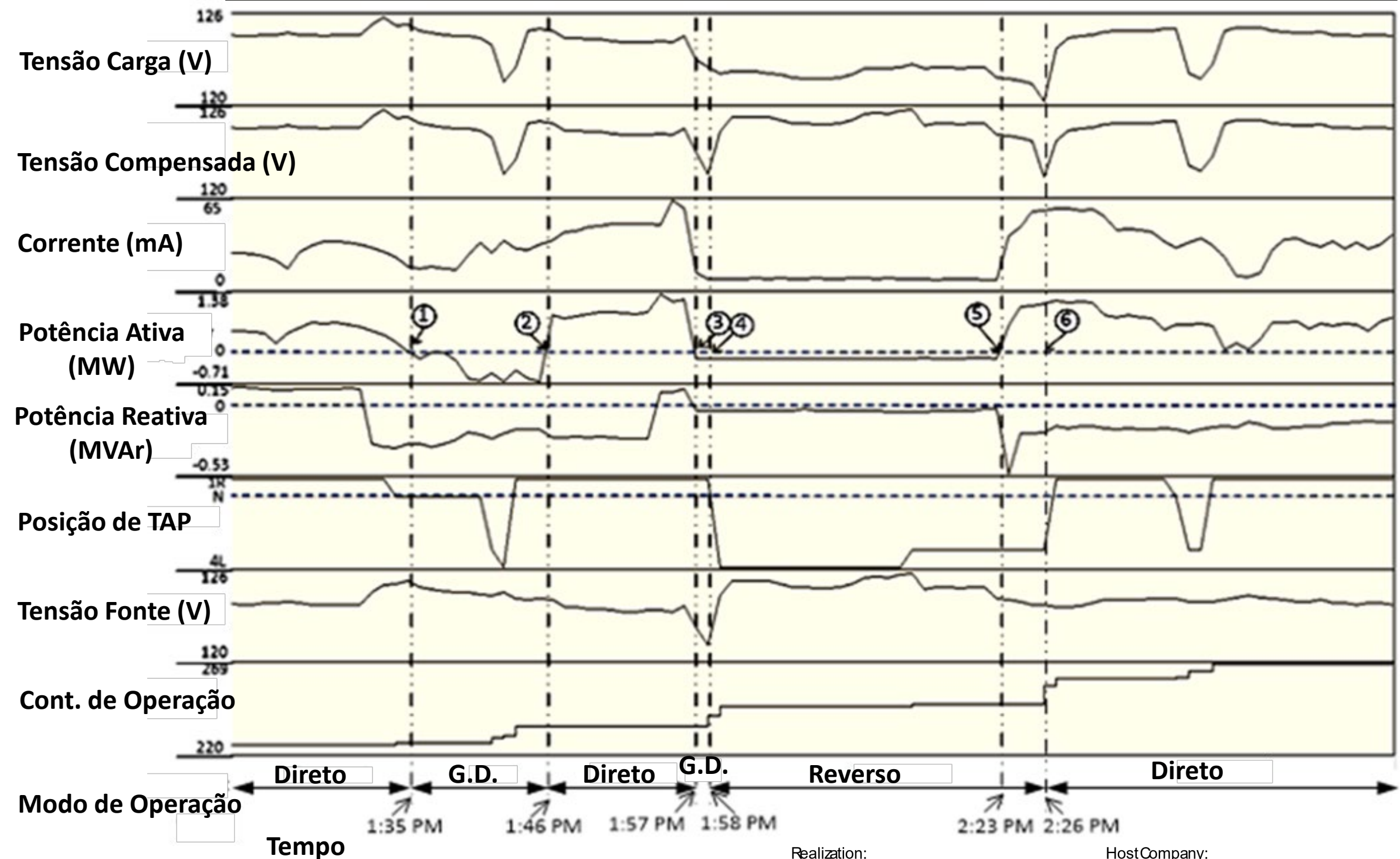
**CEMIG**



# Modo auto determinação

## Testes em campo do modo auto determinação

- O controle determinou os modos de operações corretamente, nos diversos cenários simulados.
- Testes reais, com condições de campo com presença de G.Ds e manobra na rede.
- Não houve violação de tensão, e operações excessivas.
- O controle foi capaz de realizar operações e inverter o modo de operação após detecção de fluxo inverso por manobra na rede



Realization:

HostCompany:

instituto  
abradee



CEMIG

# Conclusões



- A aplicação de curva de tempo inverso, possibilita uma resposta mais adequada para a operação de reguladores automáticos de tensão monofásicos, trazendo a analogia de proteção de curto circuito, tem-se que quanto maior for o evento de tensão, mais rápido será a atuação e o inverso também se aplica.
- O conceito de compensação de queda de tensão da forma tradicional, deixa de ser confiável, devido a contribuição de corrente da G.D. de no sistema de distribuição. Por isso se faz necessário a compensação remota de tensão, com uma retroalimentação das medidas próxima a carga, podendo ser realizada por sensores, banco de capacitores, religadores, medidores etc.
- O recurso de auto determinar o modo de operação do regulador de tensão quando aplicado a redes com G.Ds. e pontos de manobra na rede, evita que o regulador se perca atingindo extremos de regulação de forma indevida, operações excessivas e transgressões de tensão no sistema de distribuição de energia elétrica.
- Os métodos apresentados tem o intuito de mostrar que é possível a aplicação de reguladores de tensão de forma a responder os desafios da alta penetração de G.Ds. nas redes de distribuição de energia, de forma escalável e viável.
- As soluções apresentadas deve-se somar e complementar demais propostas, como por exemplo a estratégia de integração Volt-VAR, DERMS etc.
- Portanto para evitar um grande acréscimo nas compensações financeiras devido as transgressões de tensão que vem crescendo nos últimos anos, a correta parametrização e necessidade de recursos para adaptar-se as G.Ds se faz necessário nos controles de R.T.





**OBRIGADO!**