



GAT-08
Fernando Cattan Jusan

Problemas Associados à Especificação e Projeto Independentes de Filtros AC de Estações Conversoras HVDC Operando Eletricamente Próximas em um Ambiente “Multi-Vendor” e “Multi-Owner”

Fernando Cattán Jusan
FURNAS

- Aspectos do projeto de filtros de harmônicos em sistemas “multi-infeed”:
 - ✓ **Coordenação** e compatibilização dos projetos dos filtros das duas estações para obtenção de desempenho harmônico adequado em **operação conjunta** e divisão equilibrada do carregamento harmônico entre os mesmos.
 - ✓ Identificação e prevenção de potenciais problemas de **ressonância** e amplificação harmônica.
 - ✓ Especificação de **limites de harmônicos** aplicados a cada estação individualmente e para operação conjunta.
 - ✓ Procedimentos para verificação do desempenho harmônico conjunto e atribuição de responsabilidades individuais durante **medições no campo**.

- Estas questões não são de interesse puramente técnico e podem ter **impacto econômico** significativo no projeto.
- A falta de clareza na definição dos requisitos para estudos, a insuficiência de informações na **Especificação Técnica** em como lidar com estas questões podem acarretar longas discussões, retrabalho e possivelmente atrasos.
- Desprezar estas fatores pode levar a um projeto inadequado dos filtros, restrições operativas e, no pior cenário, soluções de filtros **incompatíveis**.
- Modificar os filtros após sua construção e instalação é extremamente difícil e demorado, com impacto no arranjo da subestação, fundações, proteção, projeto e fabricação de novos equipamentos, etc.

- “Multi-vendor” → filtros AC de estações conversoras eletricamente próximas são fornecidos por diferentes fabricantes.
- “Multi-owner” → estações conversoras eletricamente próximas pertencem a diferentes concessionárias.
- Com a proliferação de projetos HVDC e o avanço da desregulamentação e liberalização dos mercados de eletricidade em muitas partes do mundo, um cenário com múltiplos agentes e fornecedores vem se tornando cada vez mais comum.

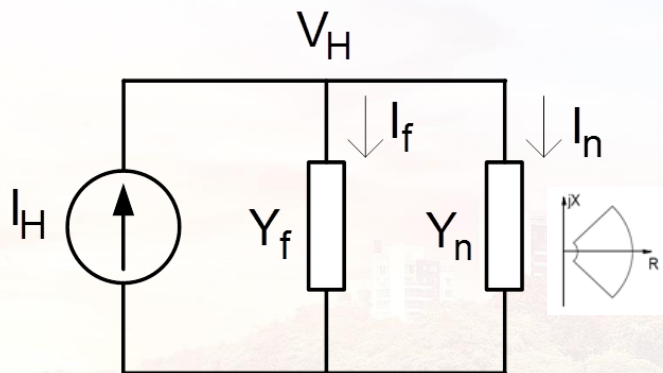
- No Brasil, cada concessão de transmissão é tratada de forma **independente** do ponto de vista regulatório.
- **Limites individuais** de distorção harmônica são definidos de forma independente para cada acessante, mesmo quando conectados ao mesmo ponto elétrico.
- **Limites globais** são também definidos, mas são verificados apenas durante o comissionamento e campanhas de medição, quando os filtros **já estão em operação**.
- Pelas regras atuais, não há exigência formal de estudos ou critérios específicos para a **operação conjunta** envolvendo diferentes estações conversoras.
- Editais de licitação de projetos de sistemas HVDC recentes não definem **métodos** nem estabelecem **requisitos** para avaliação das possíveis interações harmônicas entre sistemas HVDC de diferentes concessões.



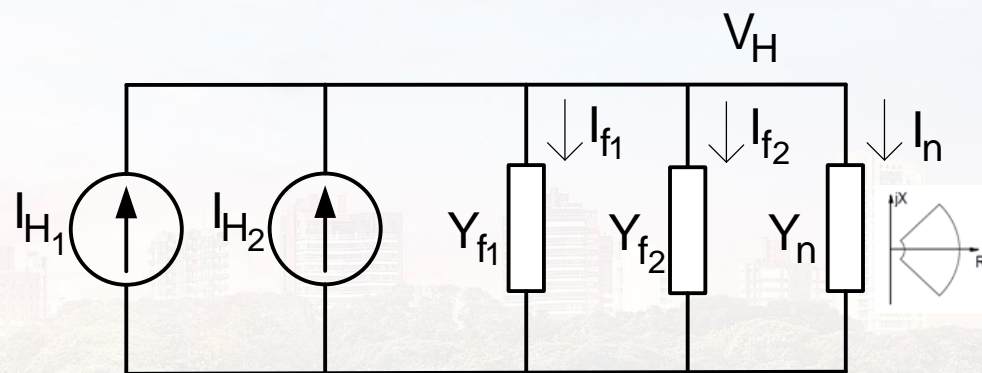
Exemplos

EXEMPLO 1: RESSONÂNCIA ENTRE FILTROS EM HARMÔNICOS CARACTERÍSTICOS

- O pior caso de impedância da rede é selecionado para minimizar a soma vetorial das admitâncias dos filtros e da rede elétrica:



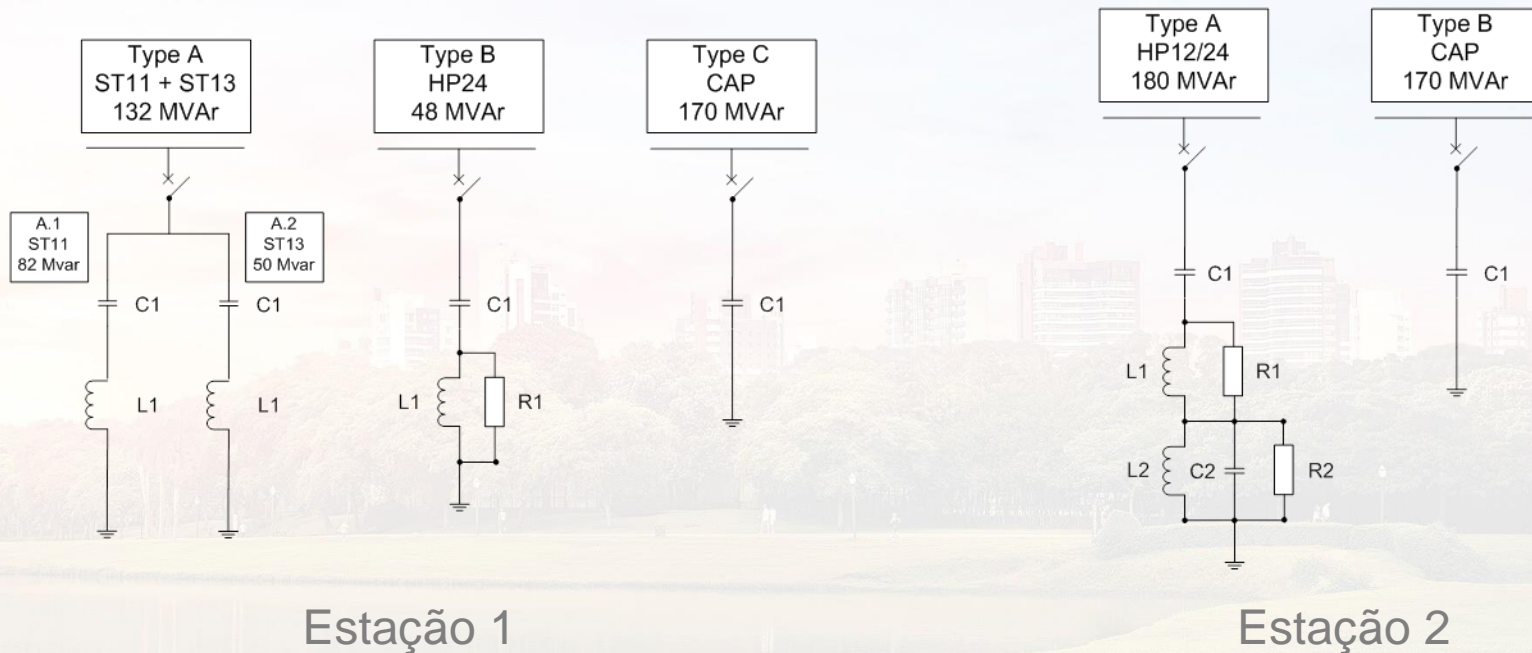
Operação individual



Operação conjunta

$$\max(|V_H|) \Rightarrow \min(|Y_n + Y_f|)$$

- Filtros AC das duas estações conversoras:



EXEMPLO 1: RESSONÂNCIA ENTRE FILTROS EM HARMÔNICOS CARACTERÍSTICOS

- Desempenho harmônico **individual**:

Harmônico	Limite	HVDC 1 (operação individual)	HVDC 2 (operação individual)
11	0.6	0.60	0.59
13	0.6	0.41	0.39
23	0.6	0.22	0.26
25	0.6	0.19	0.21
35	0.4	0.10	0.12
37	0.4	0.08	0.10

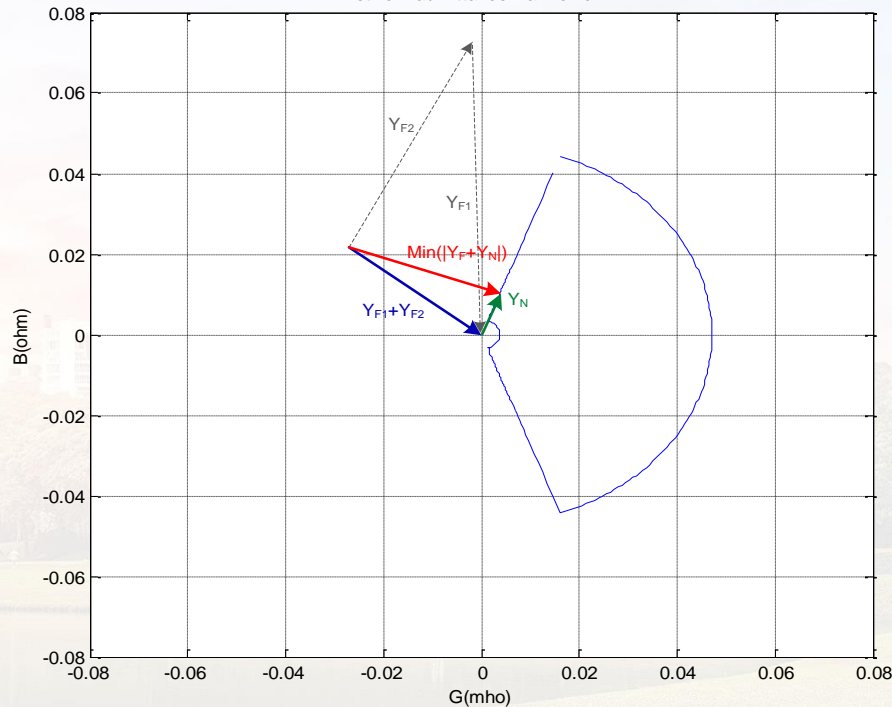
EXEMPLO 1: RESSONÂNCIA ENTRE FILTROS EM HARMÔNICOS CARACTERÍSTICOS

- Desempenho harmônico **conjunto**:

Harmônico	Limite	HVDC 1 (operação individual)	HVDC 2 (operação individual)	HVDC 1 + HVDC 2 (operação conjunta)
11	0.6	0.60	0.59	1.14
13	0.6	0.41	0.39	0.47
23	0.6	0.22	0.26	0.22
25	0.6	0.19	0.21	0.19
35	0.4	0.10	0.12	0.09
37	0.4	0.08	0.10	0.07

EXEMPLO 1: RESSONÂNCIA ENTRE FILTROS EM HARMÔNICOS CARACTERÍSTICOS

- Ressonância entre os filtros das duas estações no 11^o harmônico:



EXEMPLO 2: RESSONÂNCIA DE BAIXA ORDEM

- Filtros AC sintonizados em harmônicos característicos e de mais alta ordem são tipicamente **capacitivos** na faixa de frequência dos harmônicos de baixa ordem.
- Assim, uma **ressonância** é naturalmente criada entre a capacitância dos filtros e a impedância indutiva da rede elétrica.
- Se esta ressonância for mal amortecida e sintonizada em uma frequência entre o 2º~4º harmônico, um oneroso **filtro de baixa ordem** pode ser necessário (e.g. 3º harmônico).
- A frequência de ressonância pode ser aproximada por:
(assumindo conversores com impedância interna infinita)

$$f_{res} = f_0 \cdot \sqrt{\frac{SCL_{min}}{Q_f}}$$

EXEMPLO 2: RESSONÂNCIA DE BAIXA ORDEM

- Considere as estações conversoras do exemplo anterior
- Cada estação possui compensação de potência reativa total de **350 Mvar**
- Em operação **individual**:

$$f_{res} = f_0 \cdot \sqrt{\frac{SCL_{min}}{Q_f}} = 60 \cdot \sqrt{\frac{6500}{350}} = \mathbf{215 \text{ Hz}}$$

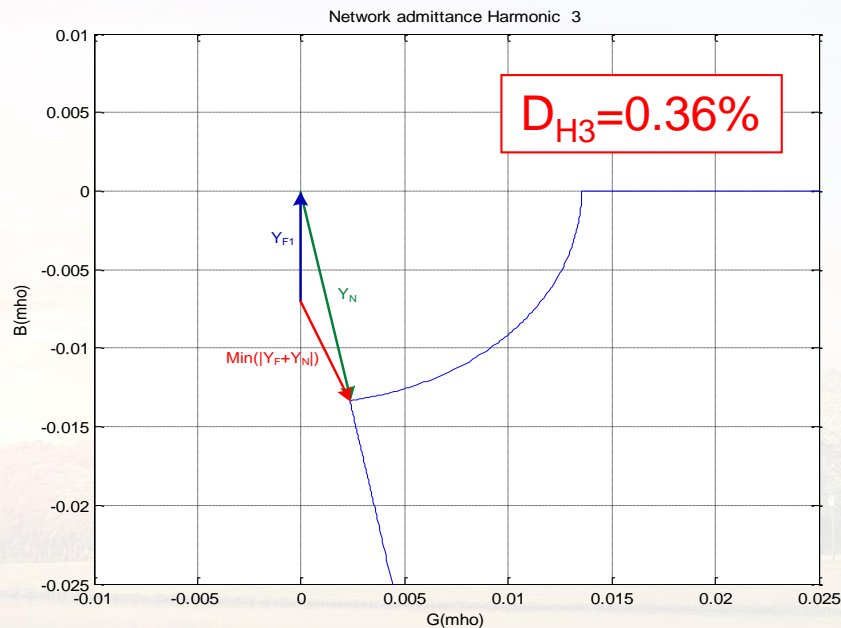
- Em operação **conjunta**:

$$f_{res} = f_0 \cdot \sqrt{\frac{SCL_{min}}{Q_f}} = 60 \cdot \sqrt{\frac{6500}{700}} = \mathbf{150 \text{ Hz}}$$

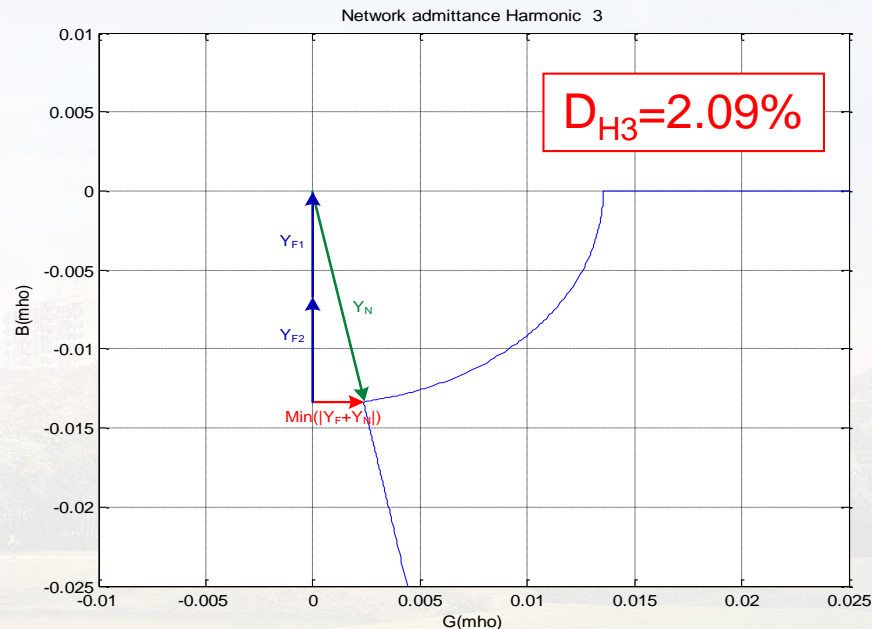
➡ sintonizado no 3º harmônico

EXEMPLO 2: RESSONÂNCIA DE BAIXA ORDEM

- Diagrama vetorial mostrando o efeito da ressonância:



Operação individual



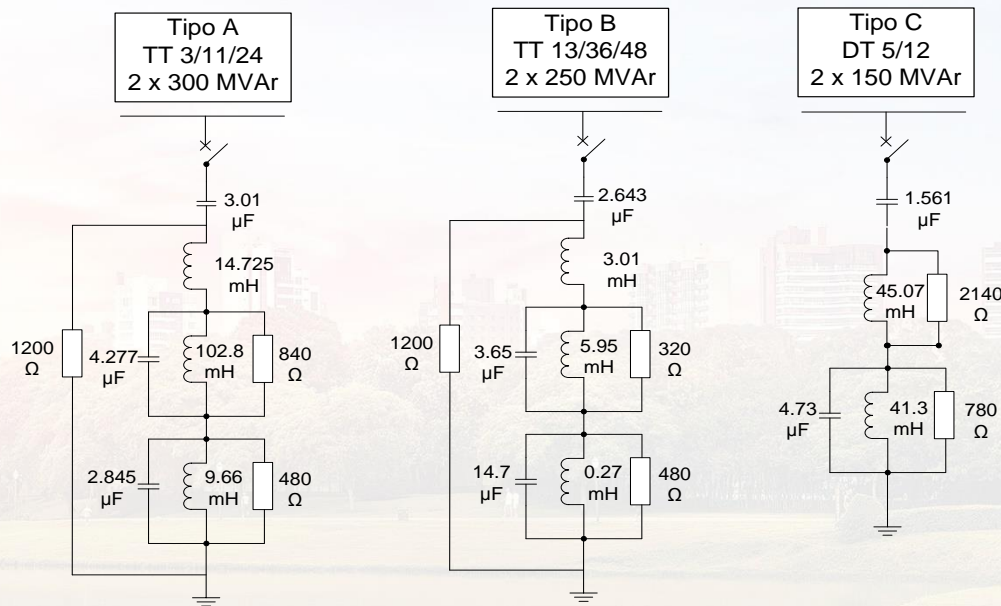
Operação conjunta

EXEMPLO 3: EXCESSO DE POTÊNCIA REATIVA EM CONDIÇÕES DE BAIXA POTÊNCIA TRANSMITIDA

- Dois bipolos idênticos conectados radialmente a uma usina hidrelétrica para transmitir 2 x 3150 MW a um centro de carga distante dos geradores.
- Os bipolos são conectados na mesma barra de um sistema AC, no terminal retificador, e operam com tensão nominal de $\pm 600\text{kV}$ e ângulo de disparo entre $12.5^\circ < \alpha < 17.5^\circ$.
- A rede AC consiste em um sistema de 500 kV, 60 Hz, isolado, formado por somente geradores e linhas de transmissão. O SCL pode variar entre 2.5 GVA e 12.8 GVA.
- A impedância da rede AC é representada por diagramas circulares com elevados ângulos de impedância (amortecimento reduzido).

EXEMPLO 3: EXCESSO DE POTÊNCIA REATIVA EM CONDIÇÕES DE BAIXA POTÊNCIA TRANSMITIDA

- Configuração dos filtros das duas estações conversoras (BP1=BP2):



EXEMPLO 3: EXCESSO DE POTÊNCIA REATIVA EM CONDIÇÕES DE BAIXA POTÊNCIA TRANSMITIDA

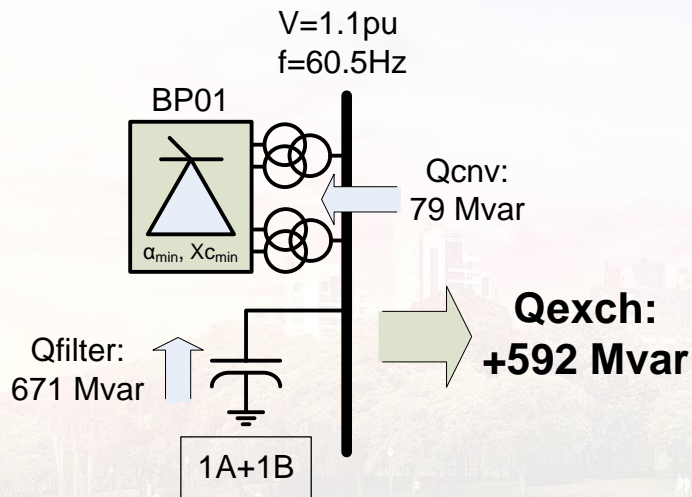
- Operação **individual** com 10% de potência:

Harm	Filtros conectados		
	1A	1B	1A+1B
3	0.26	8.95	0.25
5	0.07	0.23	0.05
11	0.38	0.54	0.23
13	1.70	0.22	0.18
23	0.31	1.86	0.25
25	0.32	1.47	0.31
35	2.21	0.04	0.04
37	2.09	0.13	0.12
47	1.81	0.12	0.11
49	1.74	0.07	0.06
THD	4.33	9.27	0.50

 **Dois filtros são necessários**

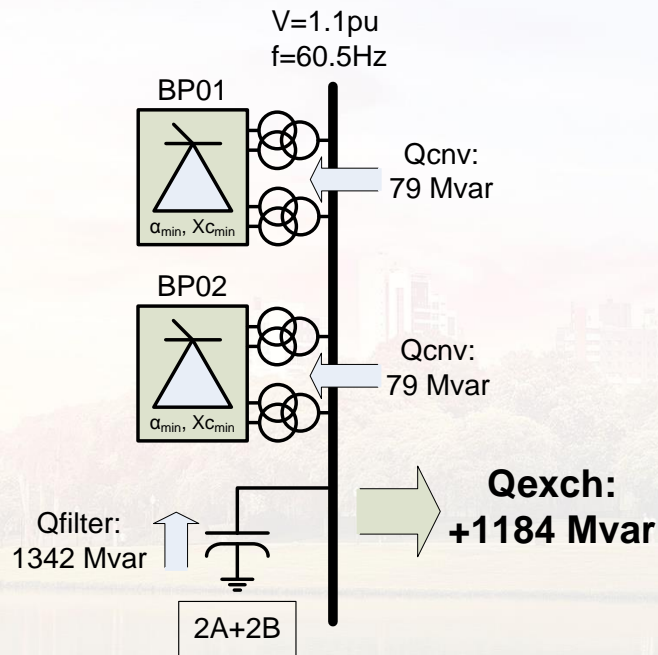
EXEMPLO 3: EXCESSO DE POTÊNCIA REATIVA EM CONDIÇÕES DE BAIXA POTÊNCIA TRANSMITIDA

- Operação **individual** com 10% de potência:



EXEMPLO 3: EXCESSO DE POTÊNCIA REATIVA EM CONDIÇÕES DE BAIXA POTÊNCIA TRANSMITIDA

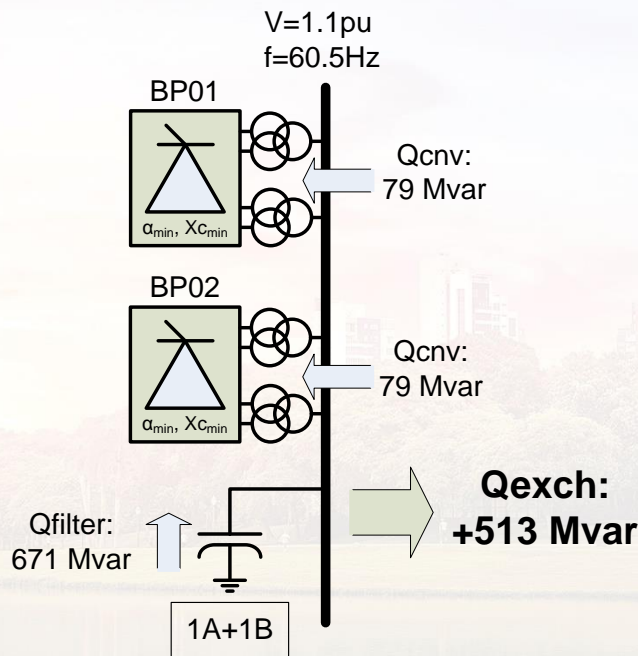
- Operação **conjunta** com 10% de potência cada:



- Excesso de potência reativa injetada na rede se cada bipolo precisar atender critérios de desempenho individuais **de forma independente** durante operação conjunta.
- A rede pode não ser capaz de absorver este **excedente** de reativos (baixa potência – poucas máquinas sincronizadas).
- Possibilidade de perda do controle de tensão e de **auto-excitação**.

EXEMPLO 3: EXCESSO DE POTÊNCIA REATIVA EM CONDIÇÕES DE BAIXA POTÊNCIA TRANSMITIDA

- Operação **conjunta** com 10% de potência cada:



- Um estudo conjunto abrangente e detalhado é necessário para obter uma **solução de filtragem global otimizada**.
- Para isso, o controle do chaveamento de filtros por desempenho harmônico e por potência reativa deve ser feito no nível de **Controle Mestre**.
- Isto permite a utilização ótima dos recursos disponíveis na subestação como um todo, mas requer grande **esforço de cooperação** na etapa de engenharia.

- A premissa de se empregar unicamente critérios de desempenho individual em geral conduz uma solução de filtros não otimizada, podendo resultar em desempenho conjunto inadequado, restrições operativas e, no pior cenário, filtros incompatíveis. O impacto econômico pode ser significativo.
- É fortemente recomendado que o efeito das interações harmônicas seja investigado o quanto antes. Um estudo abrangente e detalhado deve ser realizado na etapa de execução do projeto.
- Todas as informações técnicas necessárias, os métodos e premissas de cálculo e os requisitos de desempenho para esta avaliação devem estar claramente definidos na Especificação Técnica.

Fernando Cattan Jusan

 (21) 2528-5451

 (21) 99558-6990

 cattan@furnas.com.br

 www.furnas.com.br