

# **Power Flow Controllability and Flexibility in the Transmission Expansion Planning Problem: A MILP Approach**

**“Controlabilidade e Flexibilidade de Fluxo de Potência no  
Problema de Planejamento da Expansão da Transmissão:  
Uma abordagem de Programação Inteira Mista”**

**Dissertação de Mestrado (MSc.)**

**Aluno: Ricardo Cunha Perez**

**Orientador: Prof. Djalma Mosqueira Falcão, Ph.D.**

**UFRJ / COPPE / PEE**

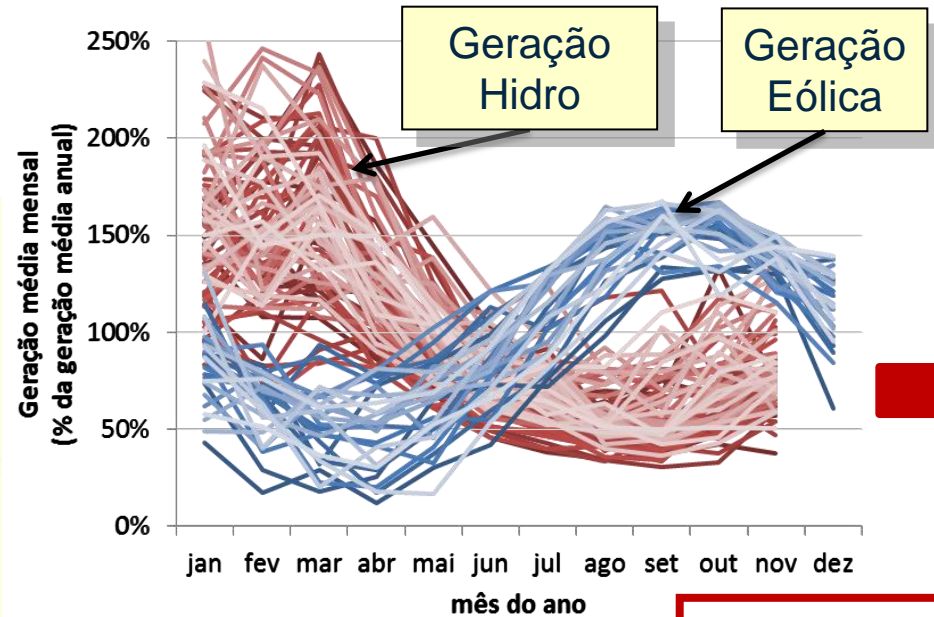
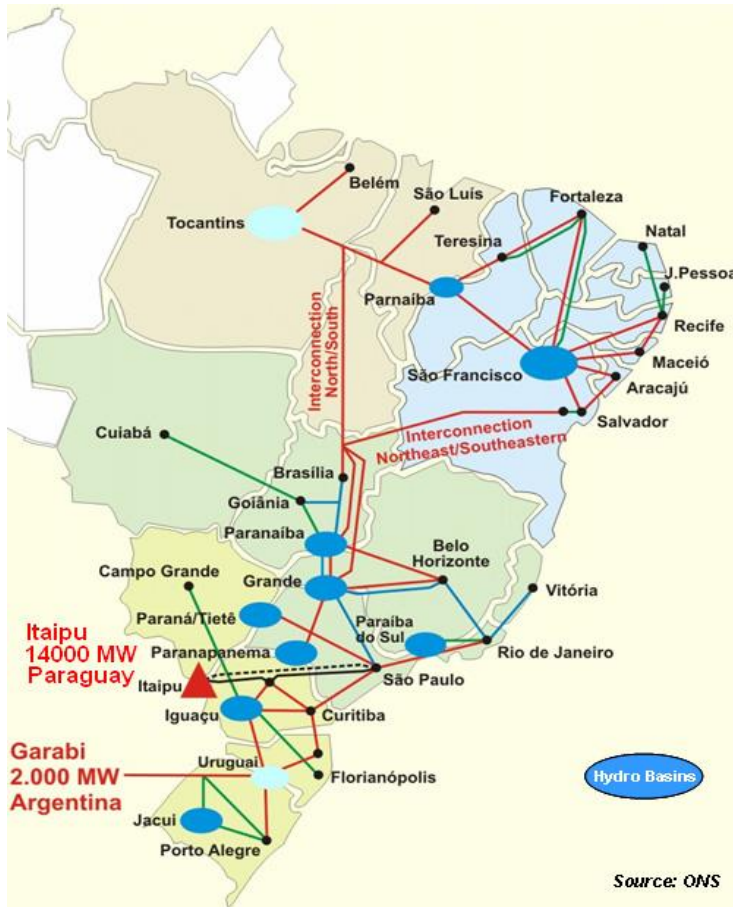
**Março de 2014**



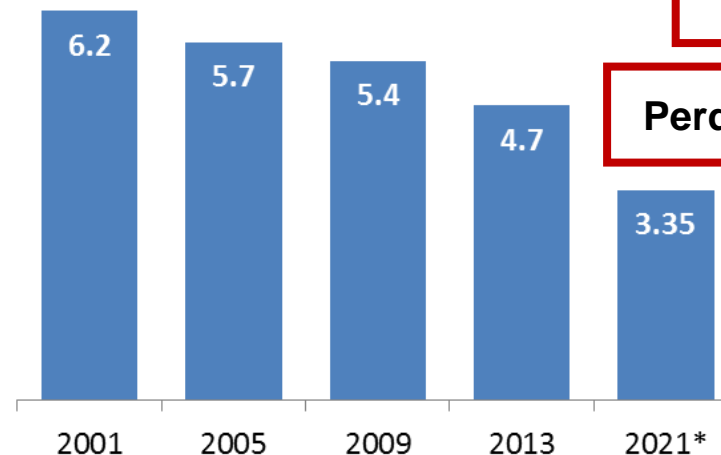
- ▶ Introdução e Resumo do Problema
- ▶ Controlabilidade de Fluxo de Potência & Equipamentos  
FACTS / Distributed-FACTS
- ▶ Modelos de Planejamento da Transmissão
- ▶ Formulações Propostas por Esta Dissertação
- ▶ Estudos de Caso
- ▶ Conclusões

- ▶ Há várias razões para que o carregamento do sistema de transmissão seja inferior a 100%:
  - Confiabilidade (Critério N-1)
  - Proteção contra as incertezas associadas aos cenários de oferta e demanda futuros
  - Planos de expansão robustos para diferentes cenários de despacho:  
(i) sistemas hidrotérmicos e (ii) sistemas com forte inserção de fontes renováveis intermitentes (eólicas, fotovoltaicas)
- ▶ A conjunção destes fatos leva a: (i) altos investimentos para atender os diferentes cenários de despacho e a (ii) baixo nível de carregamento nos circuitos ao longo do ano

## Longas Distâncias



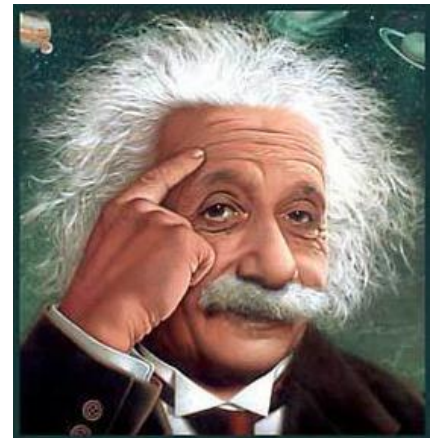
## Relação energia armazenada/carga

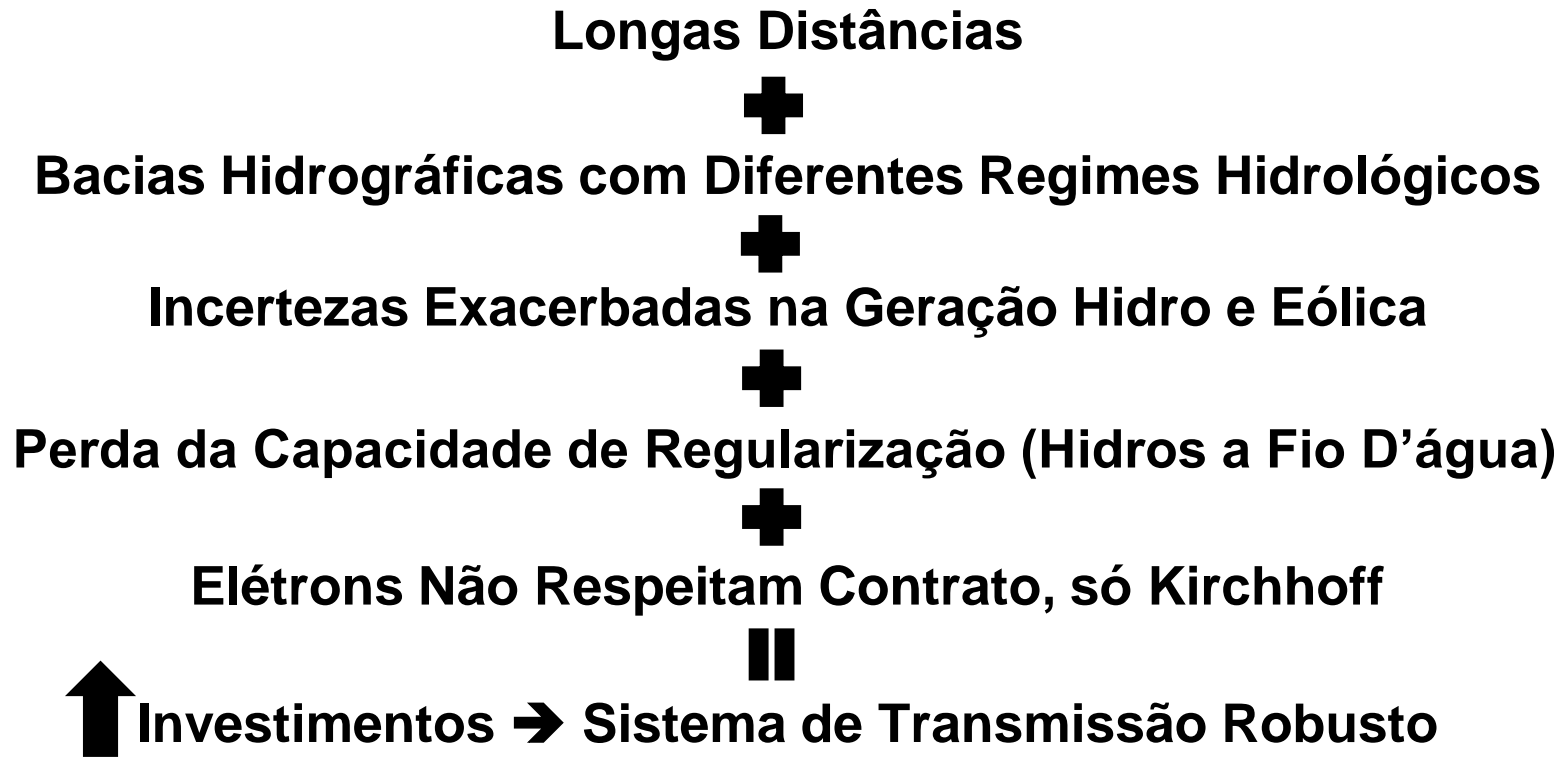


**Incertezas  
Exacerbadas**

**Perda de Regulabilidade**

“If you can’t explain it simply, you don’t understand it well enough” – Albert Einstein



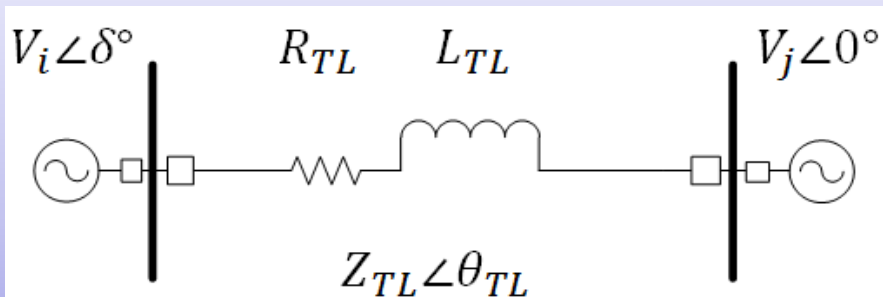


**Equipamentos FACTS & D-FACTS → Interferem nos Parâmetros Elétricos das Linhas → Controlabilidade e Flexibilidade Operativa**

**↓ Investimentos na Transmissão**

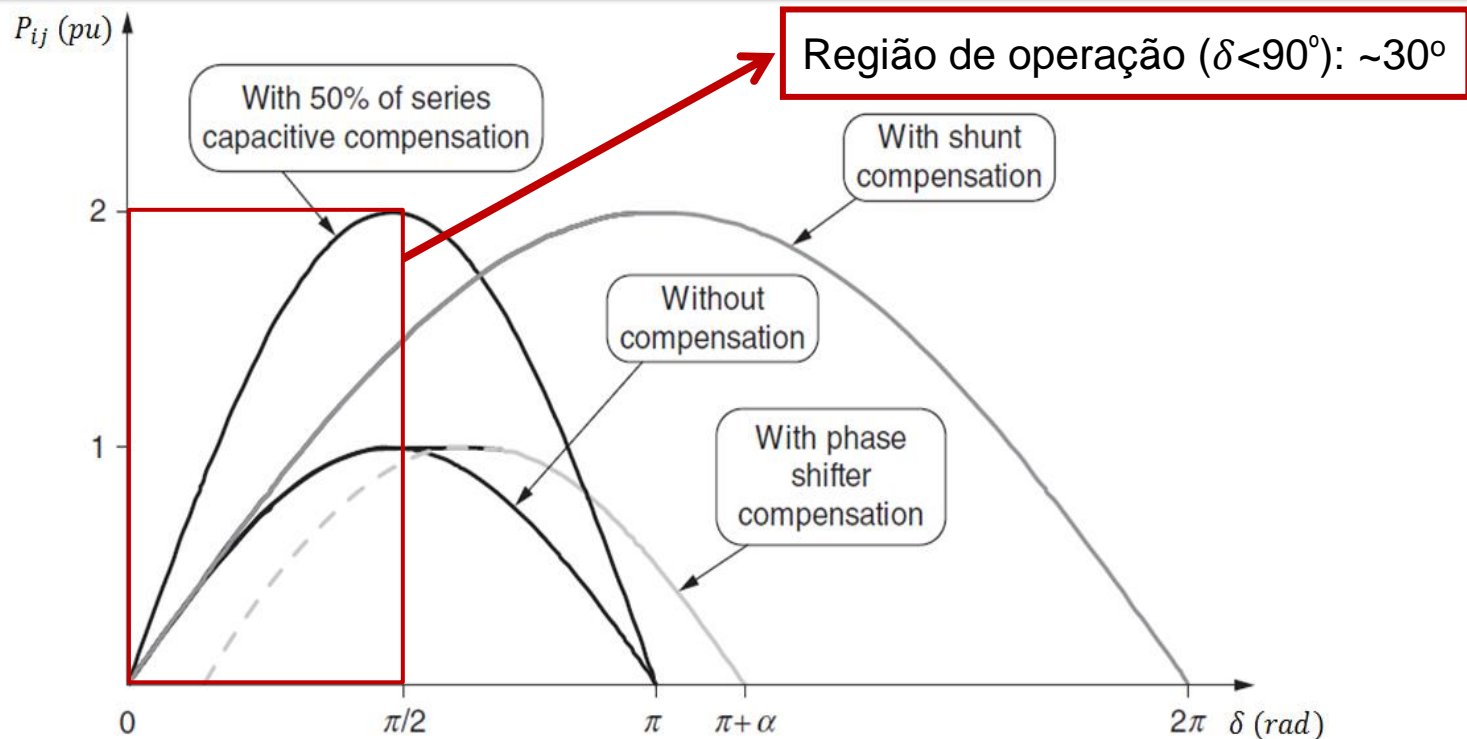
- ▶ Introdução e Resumo do Problema
- ▶ Controlabilidade de Fluxo de Potência & Equipamentos  
FACTS / Distributed-FACTS
- ▶ Modelos de Planejamento da Transmissão
- ▶ Formulações Propostas por Esta Dissertação
- ▶ Estudos de Caso
- ▶ Conclusões

# Controlabilidade de Fluxo de Potência



$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{TL}} \sin(\delta) \quad \Rightarrow \quad \delta_i > \delta_j$$

$$Q_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{TL}} \cos(\delta) - \frac{V_j^2}{X_{TL}} \quad \Rightarrow \quad |V_i| > |V_j|$$

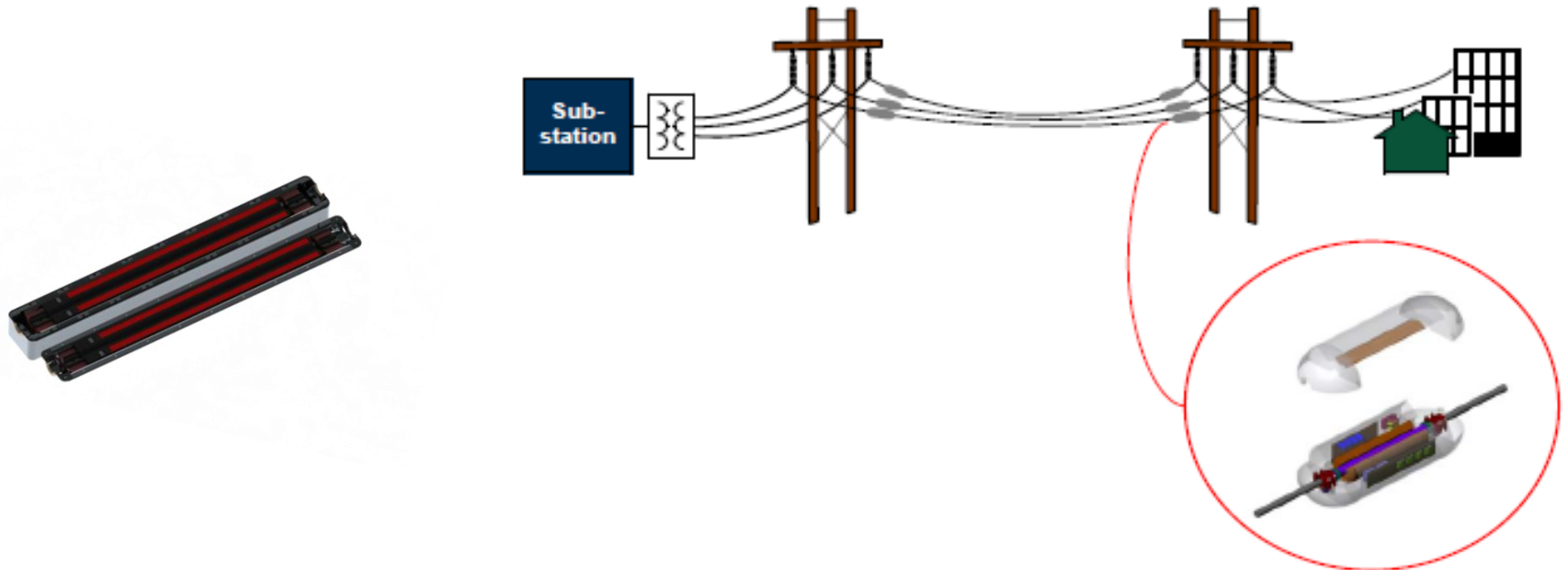




- ▶ Compensação Shunt não aumenta  $P_{ij}$  transferida → Controle de Tensão e Aumento de Estabilidade
- ▶ Defasadores → Controle de defasamento angular entre regiões ou para controlar fluxo de potência, mas não aumenta a  $P_{ij}$  transferida
- ▶ Compensação Série → Melhor opção para aumentar a transferência de potência

Tipo de Controle	Equipamentos FACTS & Distributed-FACTS
Shunt	SVC, STATCOM
Série	SSSC, TSSC, TCSC, Phase Shifter, DSR, DSC
Série & Shunt	UPFC

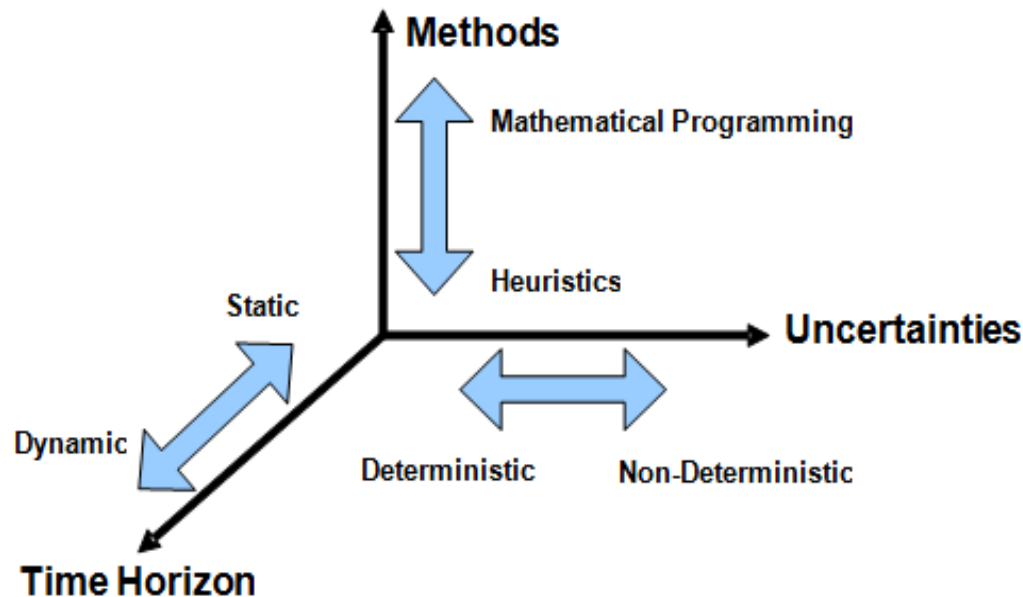
- *Distributed Series Reactors (DSRs)*: apresenta a habilidade de **AUMENTAR** a reatância da linha de transmissão
- *Distributed Series Compensators (DSCs)*: apresenta a habilidade de **AUMENTAR** e **DIMINUIR** a reatância da linha de transmissão
- Um módulo de 50  $\mu\text{H}$  por milha muda a impedância de um condutor típico de 138 kV cerca de 2% (10 kUS\$ / módulo)



## Vantagens dos **DSRs** e **DSCs**:

- ▶ Instalação rápida e eficiente (**em linha viva**)
- ▶ Vida útil: 20 anos (sem manutenção)
- ▶ Sensores: corrente, frequência, AMTs, temperatura, vibração, etc.
- ▶ Não degrada mecânica e termicamente o condutor
- ▶ Diferenciais Tecnológicos em relação aos FACTS Tradicionais:
  - Modularidade → Ganho de Escala Econômica
  - Baixos *Lead Times*
  - Maior Confiabilidade
  - Não Apresenta Problemas de Isolamento
  - Não Interferem nos Ajustes de Proteção das Linhas: observa em 5  $\mu$ s → modo de monitoração

- ▶ Introdução e Resumo do Problema
- ▶ Controlabilidade de Fluxo de Potência & Equipamentos  
FACTS / Distributed-FACTS
- ▶ Modelos de Planejamento da Transmissão
- ▶ Formulações Propostas por Esta Dissertação
- ▶ Estudos de Caso
- ▶ Conclusões



- Abordagens: estática, dinâmica, pseudo-dinâmicas (*forward, backward*)
- Modelos de otimização para auxiliar o estabelecimento de um plano de expansão
- Neste trabalho serão utilizados ➔ Abordagem Estática + FPO DC + Cenários de Despacho

► Função Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{\Omega^1} c_k x_k$$

► Sujeito a:

$$\sum_{k \in \Omega_i^0} f_k^0 + \sum_{k \in \Omega_i^1} f_k^1 + g_i = d_i, \forall i = 1, \dots, I$$

$$-\overline{f_k^0} \leq f_k^0 \leq \overline{f_k^0}, \forall k \in \Omega^0$$

$$-\overline{f_k^1} x_k \leq f_k^1 \leq \overline{f_k^1} x_k, \forall k \in \Omega^1$$

- Evita a não-linearidade presente na Segunda Lei de Kirchhoff (SLK) do modelo DC
- É um modelo muito simplificado
- Esforço computacional bastante reduzido
- As soluções obtidas com esse modelo, em geral, não são viáveis para o modelo DC

► Função Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{\Omega^1} c_k x_k$$

► Sujeito a:

$$\sum_{k \in \Omega_i^0} f_k^0 + \sum_{k \in \Omega_i^1} f_k^1 + g_i = d_i, \forall i = 1, \dots, I$$

$$f_k^0 = \gamma_k^0 (\theta(i_k) - \theta(j_k)), \forall k \in \Omega^0$$

$$-\overline{f_k^0} \leq f_k^0 \leq \overline{f_k^0}, \forall k \in \Omega^0$$

$$-\overline{f_k^1} x_k \leq f_k^1 \leq \overline{f_k^1} x_k, \forall k \in \Omega^1$$

- Circuitos existentes na rede devem obedecer o modelo DC (PLK e SLK)
- Circuitos candidatos devem obedecer apenas a PLK
- Modelo mantém a linearidade e melhora a precisão pois os ramos existentes são, em geral, a maioria
- **Ainda não representa a SLK para Candidatos**

- Segunda Lei de Kirchhoff (SLK) para circuitos candidatos:

$$f_k = \gamma_k \mathbf{x}_k (\boldsymbol{\theta}_i - \boldsymbol{\theta}_j)$$

- Não linearidade associada ao produto entre a variável binária de decisão de investimento em novos circuitos  $\mathbf{x}_k$  e o ângulo das tensões  $\boldsymbol{\theta}_{ij}$

- Desigualdade linear disjuntiva substitui a igualdade não linear:

$$-M(1 - x_k) \leq f_k - \gamma_k(\theta_i - \theta_j) \leq M(1 - x_k)$$

$$\text{If } \mathbf{x}_k = 1: \quad 0 \leq f_k - \gamma_k(\theta_i - \theta_j) \leq 0$$

$$f_k = \gamma_k(\theta_i - \theta_j)$$



- Segunda Lei de Kirchhoff (SLK) para circuitos candidatos:

$$f_k = \gamma_k \mathbf{x}_k (\boldsymbol{\theta}_i - \boldsymbol{\theta}_j)$$

- Não linearidade associada ao produto entre a variável binária de decisão de investimento em novos circuitos  $\mathbf{x}_k$  e o ângulo das tensões  $\boldsymbol{\theta}_{ij}$

- Desigualdade linear disjuntiva substitui a igualdade não linear:

$$-M(1 - x_k) \leq f_k - \gamma_k(\theta_i - \theta_j) \leq M(1 - x_k)$$

$$\text{If } \mathbf{x}_k = 0: \quad -M \leq f_k - \gamma_k(\theta_i - \theta_j) \leq M$$

- Segunda Lei de Kirchhoff (SLK) para circuitos candidatos:

$$f_k = \gamma_k \mathbf{x}_k (\boldsymbol{\theta}_i - \boldsymbol{\theta}_j)$$

- Não linearidade associada ao produto entre a variável binária de decisão de investimento em novos circuitos  $\mathbf{x}_k$  e o ângulo das tensões  $\boldsymbol{\theta}_{ij}$

- Desigualdade linear disjuntiva substitui a igualdade não linear:

$$-M(1 - x_k) \leq f_k - \gamma_k(\theta_i - \theta_j) \leq M(1 - x_k)$$

- Limite de Fluxo (só imposto se candidato for construído):

$$-\mathbf{x}_k \bar{f}_k \leq f_k \leq \bar{f}_k \mathbf{x}_k$$

- ▶ Modelo de Transportes muito simplificado (só modela PLK) tanto para existentes como para candidatos
- ▶ Modelo Híbrido Linear representa PLK e SLK para existentes, porém somente PLK para candidatos
- ▶ Modelo Disjuntivo representa PLK e SLK tanto para circuitos existentes como candidatos, porém insere as constantes disjuntivas “*Big M*” no problema
- ▶ **Pergunta:** qual é o impacto de se ter múltiplos cenários de despacho?

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K c_k x_k$$

**Sujeito a:**

$$S f^n = d^n - g^n$$

$$f_{k0}^n = \gamma_{k0}(\theta^n(i_k) - \theta^n(j_k))$$

$$-\overline{f_k^0} \leq f_{k0}^n \leq \overline{f_k^0}$$

$$-\overline{f_k^1} x_k \leq f_{k1}^n \leq \overline{f_k^1} x_k$$

Variáveis Binárias  $x_k$   
acoplam as equações do  
FPO para todos os cenários  
de despacho

- ▶ Introdução e Resumo do Problema
- ▶ Controlabilidade de Fluxo de Potência & Equipamentos  
FACTS / Distributed-FACTS
- ▶ Modelos de Planejamento da Transmissão
- ▶ Formulações Propostas por Esta Dissertação
  - Modelo Híbrido Alternativo: Proposta da Dissertação
- ▶ Estudos de Caso
- ▶ Conclusões

- Circuitos existentes na rede obedecem o modelo DC (PLK e SLK)
- Circuitos candidatos obedecem PLK e **agora devem representar a SLK:**

$$f_k^1 - \gamma_k^1 x_k \Delta\theta_{ij} = 0 \quad \forall k \in \Omega^1$$

- **Objetivo:** evitar a não-linearidade presente na 2ª Lei de Kirchhoff para linhas candidatas acrescentando ao mesmo tempo controlabilidade de fluxo ao sistema. Para tal, devemos contemplar a seguinte restrição:

$$0 \leq \gamma_k^1 \leq \overline{\gamma}_k^1$$

- Multiplicando os termos por  $|\Delta\theta_{ij}|$ :

$$\gamma_k^1 |\Delta\theta_{ij}| \leq \overline{\gamma}_k^1 |\Delta\theta_{ij}|$$

↓ Substituindo por  $|f_k^1|$

$$|f_k^1| \leq \overline{\gamma}_k^1 |\Delta\theta_{ij}|$$

↓ F(x) Absoluto é não linear

$$f_{k1}^n = f_{k1}^{n+} - f_{k1}^{n-}$$

↓

$$f_{k1}^{n+} \leq \overline{\gamma}_k^1 \Delta\theta_k^{n+}$$

↓

$$f_{k1}^{n-} \leq \overline{\gamma}_k^1 \Delta\theta_k^{n-}$$

$$\Delta\theta_k^n = \Delta\theta_k^{n+} - \Delta\theta_k^{n-} = \Delta\theta_{ij}^n$$

- ▶ Com a inserção destas equações no modelo, ainda não há garantia de que a SLK para circuitos candidatos será respeitada
- ▶ Isto ocorre porque não há restrições que garantem que somente  $\Delta\theta_k^{n+}$  **ou**  $\Delta\theta_k^{n-}$  é não nulo na solução ótima do problema
- ▶ Explicação Completa → Apêndice C da Dissertação
- ▶ Partindo deste princípio, **um primeiro conjunto de equações** é proposto para resolver este problema:

$$\Delta\theta_k^{n+} \leq K \times z_k^n$$

$$\Delta\theta_k^{n-} \leq K \times (1 - z_k^n)$$

$$z_k^n \in \{0,1\}$$



$z_k^n$	$\Delta\theta_k^{n+}$	$\Delta\theta_k^{n-}$
0	0	$\leq K$
1	$\leq K$	0

- ▶ A decisão do modelo de usar  $\Delta\theta_k^{n+}$  **ou**  $\Delta\theta_k^{n-}$  depende intrinsecamente da direção do fluxo, i.e., se o fluxo for de  $i$  para  $j$ ,  $\Delta\theta_k^{n+}$  é não nulo e  $\Delta\theta_k^{n-}$  é zero se o fluxo for de  $j$  to  $i$ ,  $\Delta\theta_k^{n-}$  é não nulo e  $\Delta\theta_k^{n+}$  é zero

- ▶ Assim, é proposta **uma formulação mais apertada para acelerar o modelo de Fluxo de Potência Ótimo (FPO):**

<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <math>z_k^{n+} \geq f_{k1}^{n+}/\overline{f_{k1}}</math></li> <li>▶ <math>z_k^{n-} \geq f_{k1}^{n-}/\overline{f_{k1}}</math></li> </ul>	}	→	$z_k^{n+}$	$z_k^{n-}$	$\Delta\theta_k^{n+}$	$\Delta\theta_k^{n-}$
$0$			$0$			
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <math>\Delta\theta_k^{n+} \leq K(1 - z_k^{n-})</math></li> <li>▶ <math>\Delta\theta_k^{n-} \leq K(1 - z_k^{n+})</math></li> </ul>	}	→	$0$	$1$	$0$	$\leq K$
$1$			$0$	$\leq K$	$0$	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <math>z_k^{n+} + z_k^{n-} \leq x_k</math></li> </ul>	}	→	$1$	$1$		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <math>z_k^{n+}, z_k^{n-} \in \{0,1\}</math></li> </ul>						



- ▶ Introdução e Resumo do Problema
- ▶ Controlabilidade de Fluxo de Potência & Equipamentos  
FACTS / Distributed-FACTS
- ▶ Modelos de Planejamento da Transmissão
- ▶ Formulações Propostas por Esta Dissertação
  - Incorporação de Compensação Série: Proposta da Dissertação
- ▶ Estudos de Caso
- ▶ Conclusões

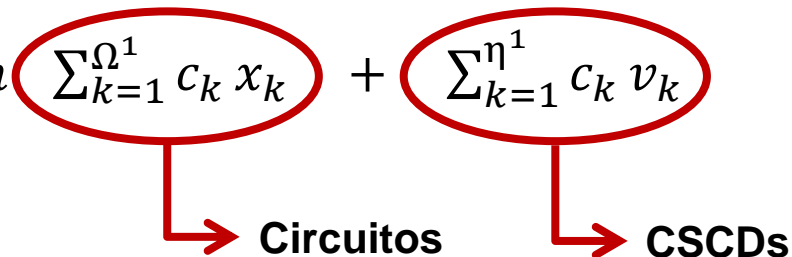
- ▶ Como visto anteriormente, a primeira formulação proposta modela um circuito com susceptância variando entre  $0 \leq \gamma_k^1 \leq \overline{\gamma_k^1}$ .
- ▶ **Pergunta:** e se  $\overline{\gamma_k^1}$  fosse ajustado de tal forma que ele representasse uma **Compensação Série (CS)** em uma linha de transmissão?
- ▶ Essa é a idéia da Segunda Formulação Proposta por esta Dissertação.
- ▶ Como há equipamentos capazes de (i) aumentar, (ii) diminuir e (iii) aumentar e diminuir a susceptância da linha alvo, este trabalho propõe as seguintes convenções:
  - **Compensação Positiva:** CS com o intuito de **aumentar** a susceptância e por consequência o fluxo na linha alvo.
  - **Compensação Negativa:** CS com o intuito de **diminuir** a susceptância e por consequência o fluxo na linha alvo.
  - **Compensação Dupla:** CS com o intuito de **aumentar e diminuir** a susceptância e por consequência o fluxo na linha alvo.

- Os *Candidate Series Compensation Devices* (CSCDs), podem **compensar positivamente** uma LT em  $\alpha\%$  representado por  $\gamma_{max}^{CS}$ .

$$\bar{\gamma}_{k1} = \gamma_{max}^{CS} \quad \longrightarrow \quad 0 \leq \gamma_{k1} \leq \gamma_{max}^{CS}$$

- Então o modelo é escrito da seguinte forma:

Função Objetivo:  $Min \quad \sum_{k=1}^{\Omega^1} c_k x_k + \sum_{k=1}^{\eta^1} c_k v_k$



PLK:  $f_{ROW}^n = f_{k0}^n + \delta_{k1}^n$

Decomposição:  $\delta_{k1}^n = \delta_{k1}^{n+} - \delta_{k1}^{n-}$

SLK:  $\delta_{k1}^{n+} \leq \bar{\gamma}_{k1} \Delta \theta_k^{n+}$

SLK:  $\delta_{k1}^{n-} \leq \bar{\gamma}_{k1} \Delta \theta_k^{n-}$

- Fluxo no CSCD só existe se for construído:  $\delta_{k1}^{n+} \leq \overline{f_{k0}} v_k$
- Fluxo no CSCD só existe se for construído:  $\delta_{k1}^{n-} \leq \overline{f_{k0}} v_k$
- Limite de Fluxo no conjunto (LT + CSCD):  $-\overline{f_{k0}} \leq f_{k0}^n + \delta_{k1}^n \leq \overline{f_{k0}}$
- Garantia de Fluxo em Única Direção:

- $z_k^{n+} \geq \delta_{k1}^{n+} / \overline{f_{k0}}$
  - $z_k^{n-} \geq \delta_{k1}^{n-} / \overline{f_{k0}}$
  - $\Delta\theta_k^{n+} \leq K(1 - z_k^{n-})$
  - $\Delta\theta_k^{n-} \leq K(1 - z_k^{n+})$
  - $z_k^{n+} + z_k^{n-} \leq v_k$
  - $z_k^{n+}, z_k^{n-} \in \{0,1\}$
- Para Cada CSCD
- Para Cada ROW

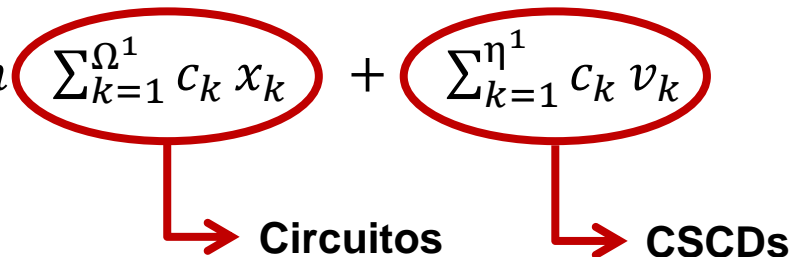
$z_k^{n+}$	$z_k^{n-}$	$\Delta\theta_k^{n+}$	$\Delta\theta_k^{n-}$
0	0		
0	1	0	$\leq K$
1	0	$\leq K$	0
1	1		

- Os *Candidate Series Compensation Devices* (CSCDs), podem **compensar negativamente** uma LT em  $\alpha\%$  representado por  $\gamma_{min}^{CS}$ .

$$\bar{\gamma}_{k2} = -\gamma_{min}^{CS} \quad \longrightarrow \quad 0 \leq \gamma_{k2} \leq -\gamma_{min}^{CS}$$

- Então o modelo é escrito da seguinte forma:

Função Objetivo:  $Min \sum_{k=1}^{\Omega^1} c_k x_k + \sum_{k=1}^{\eta^1} c_k v_k$



PLK:  $f_{ROW}^n = f_{k0}^n - \delta_{k2}^n$

Decomposição:  $\delta_{k2}^n = \delta_{k2}^{n+} - \delta_{k2}^{n-}$

SLK:  $\delta_{k2}^{n+} \leq \bar{\gamma}_{k2} \Delta \theta_k^{n+}$

SLK:  $\delta_{k2}^{n-} \leq \bar{\gamma}_{k2} \Delta \theta_k^{n-}$

- ▶ Fluxo no CSCD só existe se for construído:  $\delta_{k2}^{n+} \leq \overline{f_{k0}} v_k$
- ▶ Fluxo no CSCD só existe se for construído:  $\delta_{k2}^{n-} \leq \overline{f_{k0}} v_k$
- ▶ Limite de Fluxo no conjunto (LT + CSCD):  $-\overline{f_{k0}} \leq f_{k0}^n - \delta_{k2}^n \leq \overline{f_{k0}}$
- ▶ Garantia de Fluxo em Única Direção:
  - ▶  $z_k^{n+} \geq \delta_{k2}^{n+} / \overline{f_{k0}}$
  - ▶  $z_k^{n-} \geq \delta_{k2}^{n-} / \overline{f_{k0}}$
  - ▶  $\Delta\theta_k^{n+} \leq K(1 - z_k^{n-})$
  - ▶  $\Delta\theta_k^{n-} \leq K(1 - z_k^{n+})$
  - ▶  $z_k^{n+} + z_k^{n-} \leq v_k$
  - ▶  $z_k^{n+}, z_k^{n-} \in \{0,1\}$

- ▶ Fluxo no CSCD só existe se for construído:  $\delta_{k2}^{n+} \leq \overline{f_{k0}} v_k$
- ▶ Fluxo no CSCD só existe se for construído:  $\delta_{k2}^{n-} \leq \overline{f_{k0}} v_k$
- ▶ Limite de Fluxo no conjunto (LT + CSCD):  $-\overline{f_{k0}} \leq f_{k0}^n - \delta_{k2}^n \leq \overline{f_{k0}}$
- ▶ Garantia de Fluxo em Única Direção:
  - ▶  $z_k^{n+} \geq \delta_{k2}^{n+} / \overline{f_{k0}}$
  - ▶  $z_k^{n-} \geq \delta_{k2}^{n-} / \overline{f_{k0}}$
  - ▶  $\Delta\theta_k^{n+} \leq K(1 - z_k^{n-})$
  - ▶  $\Delta\theta_k^{n-} \leq K(1 - z_k^{n+})$
  - ▶  $z_k^{n+} + z_k^{n-} \leq v_k$
  - ▶  $z_k^{n+}, z_k^{n-} \in \{0,1\}$

**Compensação Dupla nada mais é do que a combinação da Compensação Positiva com a Negativa!**

- ▶ Limite de Fluxo no conjunto (LT + CSCD):  $-\overline{f_{k0}} \leq f_{k0}^n + \delta_{k1}^n - \delta_{k2}^n \leq \overline{f_{k0}}$
- ▶ Fluxo no CSCD (Comp. Positiva):  $\delta_{k1}^{n+} \leq \overline{f_{k0}} v_k$  e  $\delta_{k1}^{n-} \leq \overline{f_{k0}} v_k$
- ▶ Fluxo no CSCD (Comp. Negativa):  $\delta_{k2}^{n+} \leq \overline{f_{k0}} v_k$  e  $\delta_{k2}^{n-} \leq \overline{f_{k0}} v_k$
- ▶ SLK (Comp. Positiva):  $\delta_{k1}^{n+} \leq \overline{\gamma}_{k1} \Delta\theta_k^{n+}$  e  $\delta_{k1}^{n-} \leq \overline{\gamma}_{k1} \Delta\theta_k^{n-}$
- ▶ SLK (Comp. Negativa):  $\delta_{k2}^{n+} \leq \overline{\gamma}_{k2} \Delta\theta_k^{n+}$  e  $\delta_{k2}^{n-} \leq \overline{\gamma}_{k2} \Delta\theta_k^{n-}$
- ▶ Garantia de Fluxo em Única Direção:
  - ▶  $z_k^{n+} \geq \delta_{k1}^{n+} / \overline{f_{k0}}$  e  $z_k^{n-} \geq \delta_{k1}^{n-} / \overline{f_{k0}}$
  - ▶  $z_k^{n+} \geq \delta_{k2}^{n+} / \overline{f_{k0}}$  e  $z_k^{n-} \geq \delta_{k2}^{n-} / \overline{f_{k0}}$


$$\Delta\theta_k^{n+} \leq K(1 - z_k^{n-})$$

$$\Delta\theta_k^{n-} \leq K(1 - z_k^{n+})$$

$$z_k^{n+} + z_k^{n-} \leq v_k$$

$$z_k^{n+}, z_k^{n-} \in \{0,1\}$$

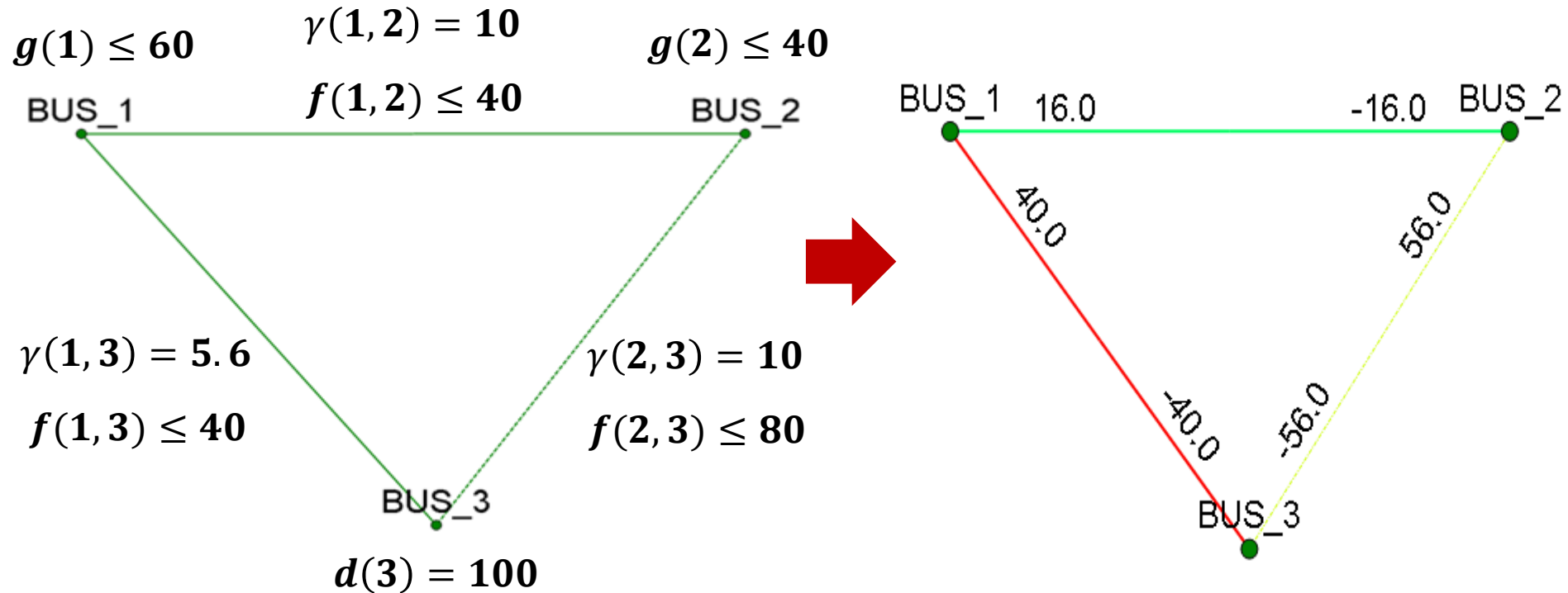


- ▶ Restrição de Precedência (só posso construir CSCD se Linha for construída):  $v_k \leq x_k$
- ▶ Limite de Fluxo no conjunto (LT + CSCD):  $-\overline{f_{k1}}x_k \leq f_{k1}^n + \delta_{k1}^n - \delta_{k2}^n \leq \overline{f_{k1}}x_k$
- ▶ Onde  $f_{k1}^n$  também é decomposto:  $f_{k1}^n = f_{k1}^{n+} + f_{k1}^{n-} \rightarrow$   Gap de Integralidade
- ▶ Garantia de Fluxo em Única Direção:

<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <math>z_k^{n+} \geq f_{k1}^{n+} / \overline{f_{k1}}</math></li> <li>▶ <math>z_k^{n-} \geq f_{k1}^{n-} / \overline{f_{k1}}</math></li> <li>▶ <math>z_k^{n+} + z_k^{n-} \leq x_k</math></li> <li>▶ <math>\Delta\theta_k^{n+} \leq K(1 - z_k^{n-})</math></li> <li>▶ <math>\Delta\theta_k^{n-} \leq K(1 - z_k^{n+})</math></li> <li>▶ <math>z_k^{n+}, z_k^{n-} \in \{0,1\}</math></li> </ul>	Compensação Positiva	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ <math>z_k^{n+} \geq f_{k1}^{n+} / 2\overline{f_{k1}}</math></li> <li>▶ <math>z_k^{n-} \geq f_{k1}^{n-} / 2\overline{f_{k1}}</math></li> <li>▶ <math>z_k^{n+} + z_k^{n-} \leq x_k</math></li> <li>▶ <math>\Delta\theta_k^{n+} \leq K(1 - z_k^{n-})</math></li> <li>▶ <math>\Delta\theta_k^{n-} \leq K(1 - z_k^{n+})</math></li> <li>▶ <math>z_k^{n+}, z_k^{n-} \in \{0,1\}</math></li> </ul>	Compensação Negativa
--	----------------------	--	----------------------

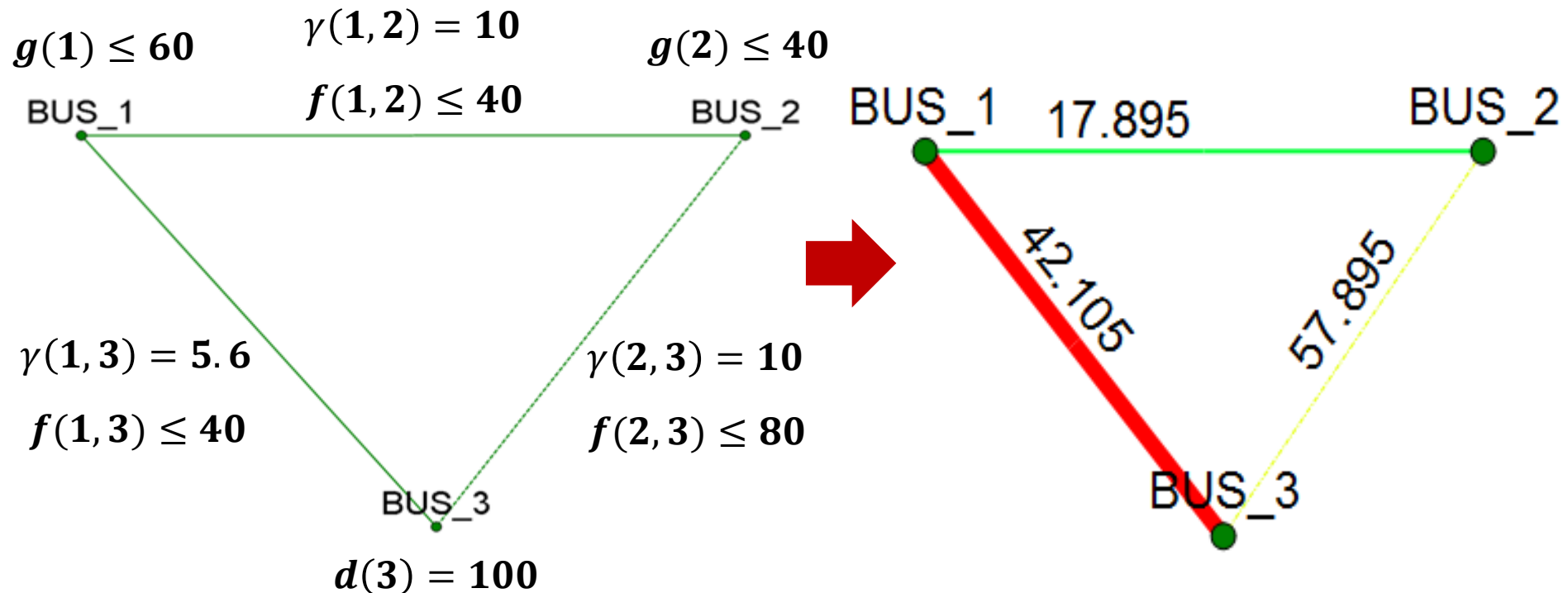
- ▶ Introdução e Resumo do Problema
- ▶ Controlabilidade de Fluxo de Potência & Equipamentos  
FACTS / Distributed-FACTS
- ▶ Modelos de Planejamento da Transmissão
- ▶ Formulações Propostas por Esta Dissertação
- ▶ Estudos de Caso
- ▶ Conclusões

## ► Candidato Híbrido (2,3):



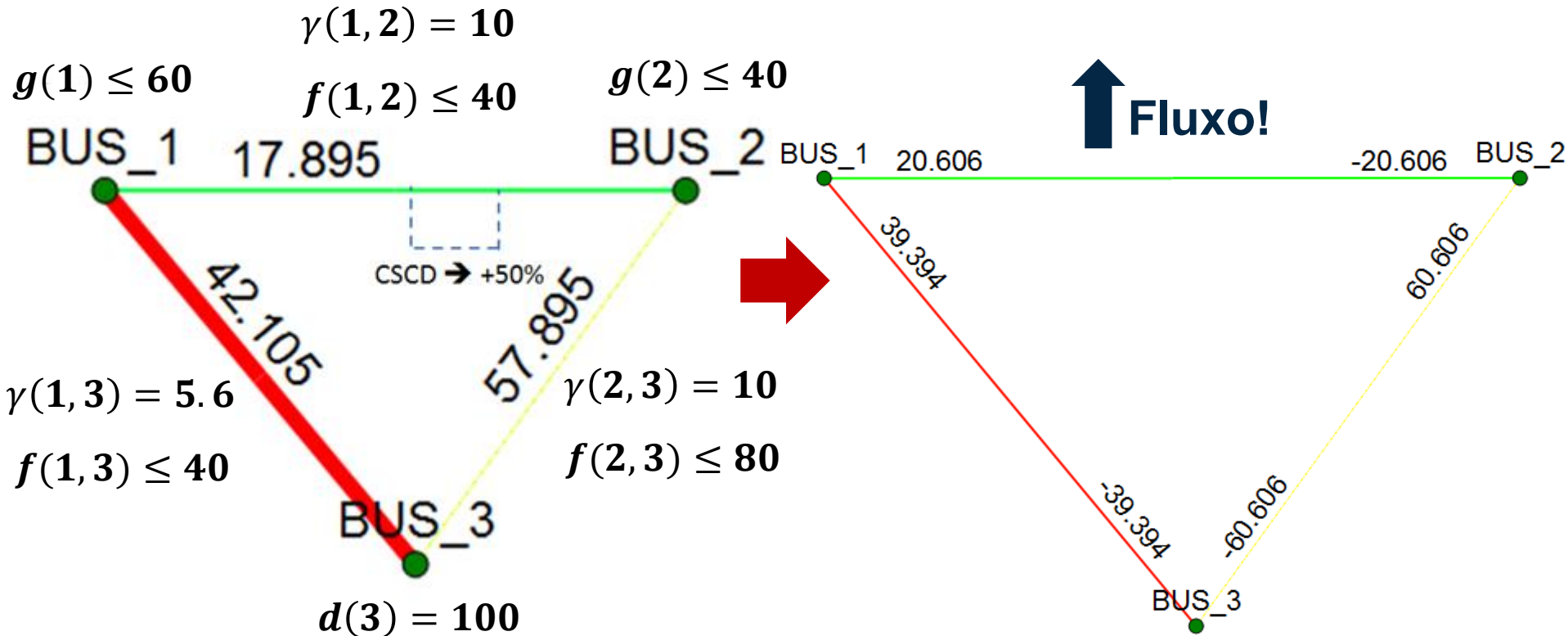
- Formulação do Candidato Híbrido funcionou com êxito e o passou o máximo possível de fluxo na linha (2,3), respeitando os limites de fluxo

- Candidato (2,3) Modelado através da Formulação Disjuntiva:



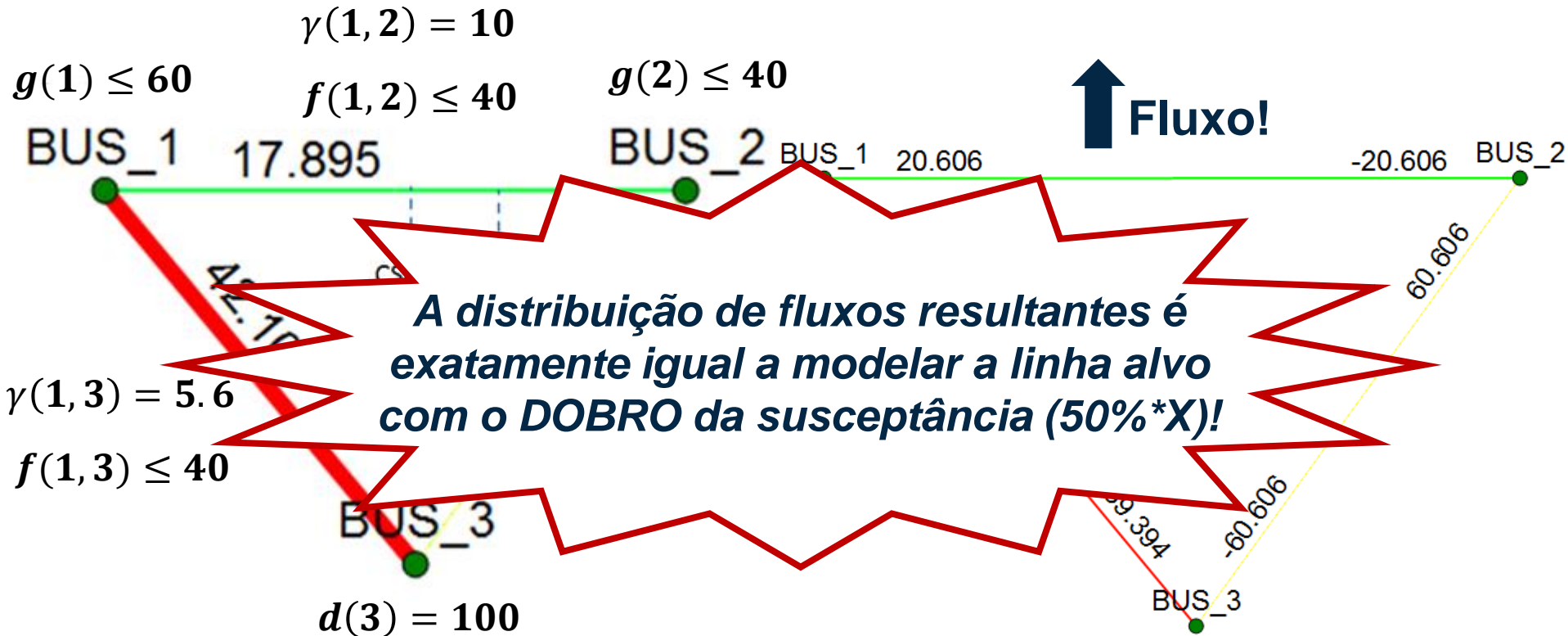
- FPO DC executado após modelo de expansão mostra que a adição do candidato (2,3) não é suficiente para eliminar a sobrecarga na rede

- CSCD (1,2) com Compensação **Positiva** (50%):



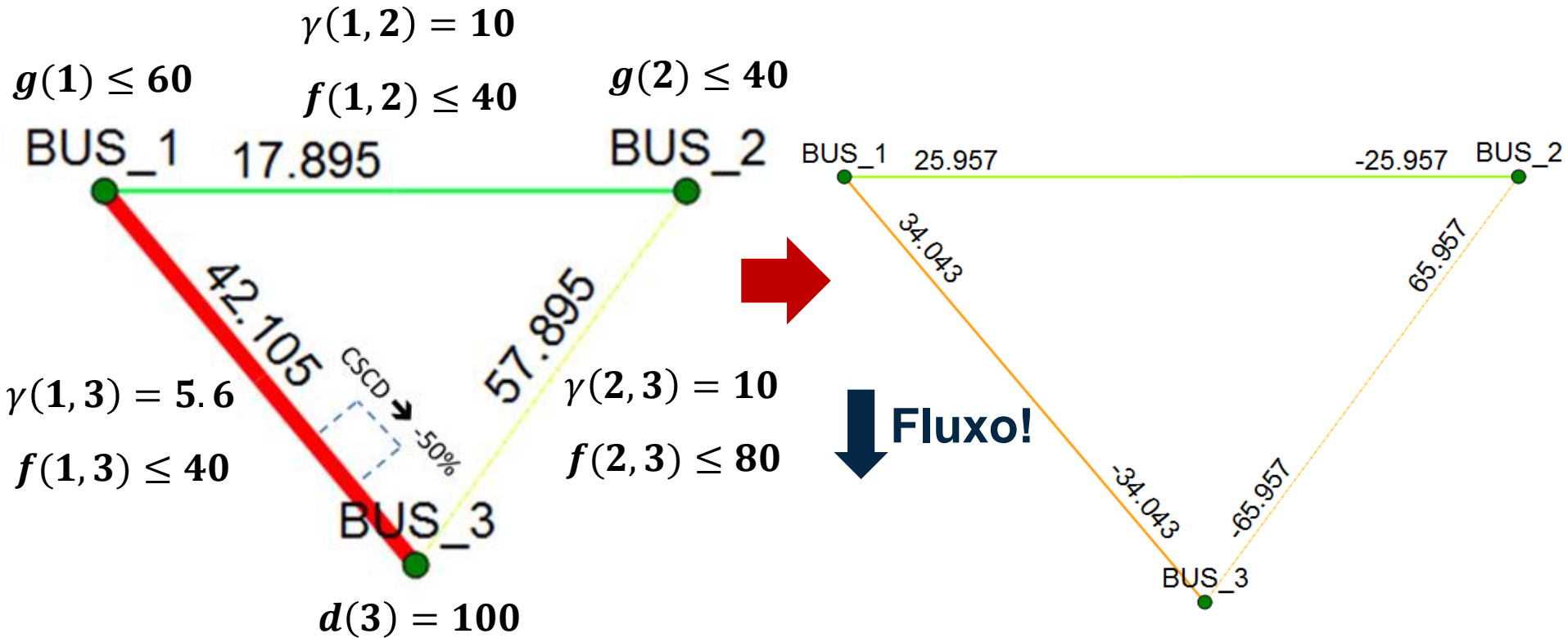
- CSCD (1,2) compensa a linha alvo em 50% e elimina a ocorrência de corte de carga na expansão e por consequência a sobrecarga no FPO DC

- CSCD (1,2) com Compensação **Positiva** (50%):

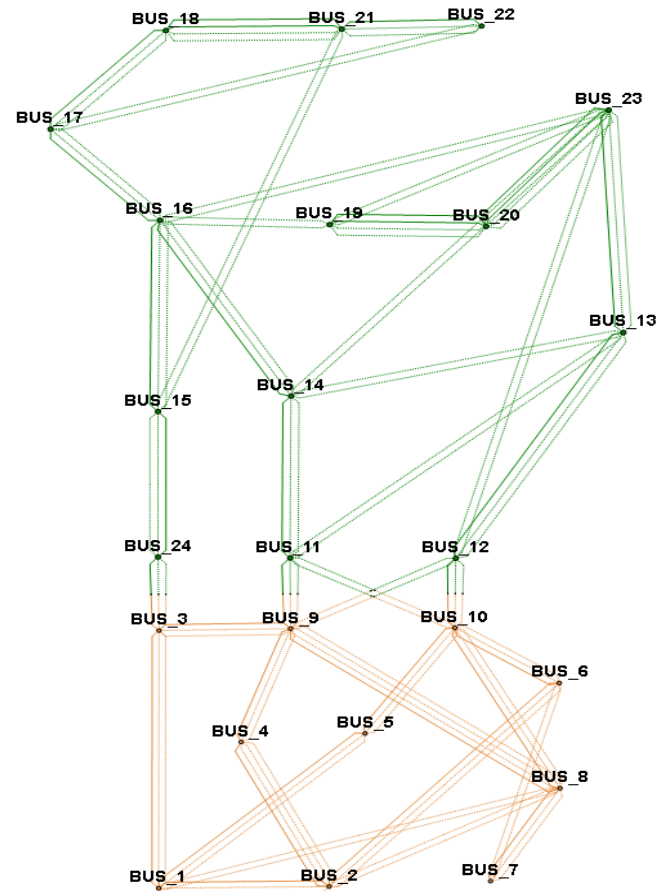


- CSCD (1,2) compensa a linha alvo em 50% e elimina a ocorrência de corte de carga na expansão e por consequência a sobrecarga no FPO DC

- CSCD (1,3) com Compensação **Negativa** (50%):



- CSCD (1,3) compensa a linha alvo em 50% e elimina a ocorrência de corte de carga na expansão e por consequência a sobrecarga no FPO DC



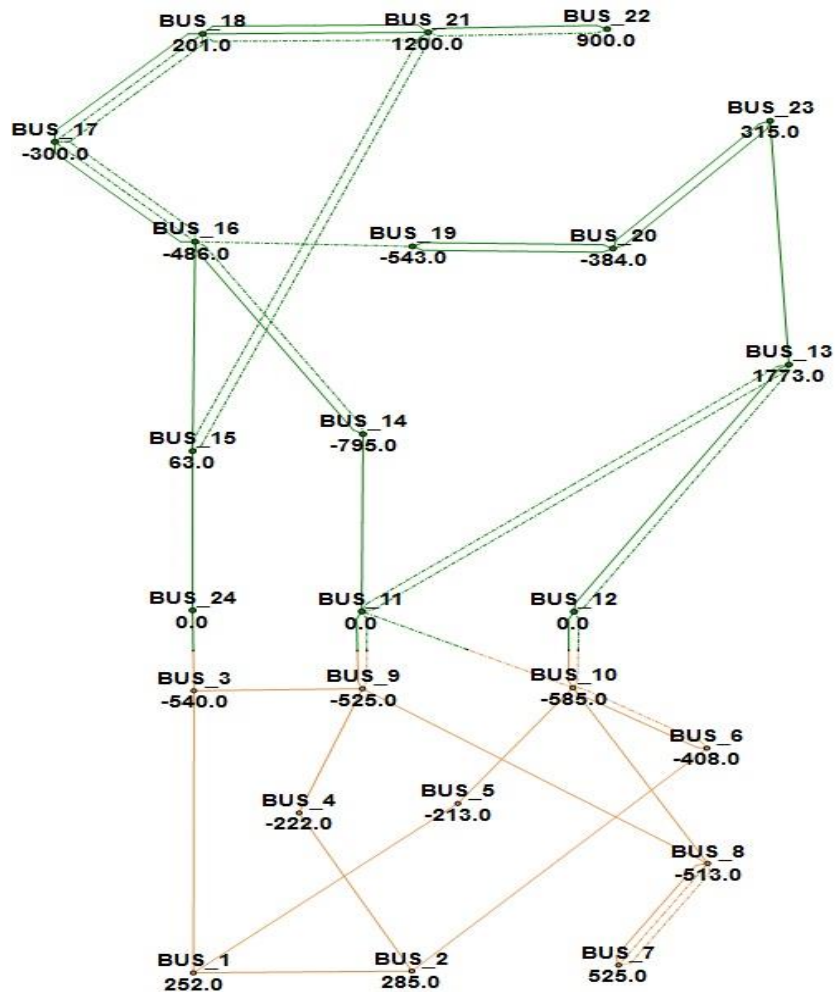
- O sistema sob análise apresenta 30 circuitos existentes e 84 candidatos: 56 duplicações; 28 em 14 novos corredores
- 4 cenários de despacho: G1 a G4



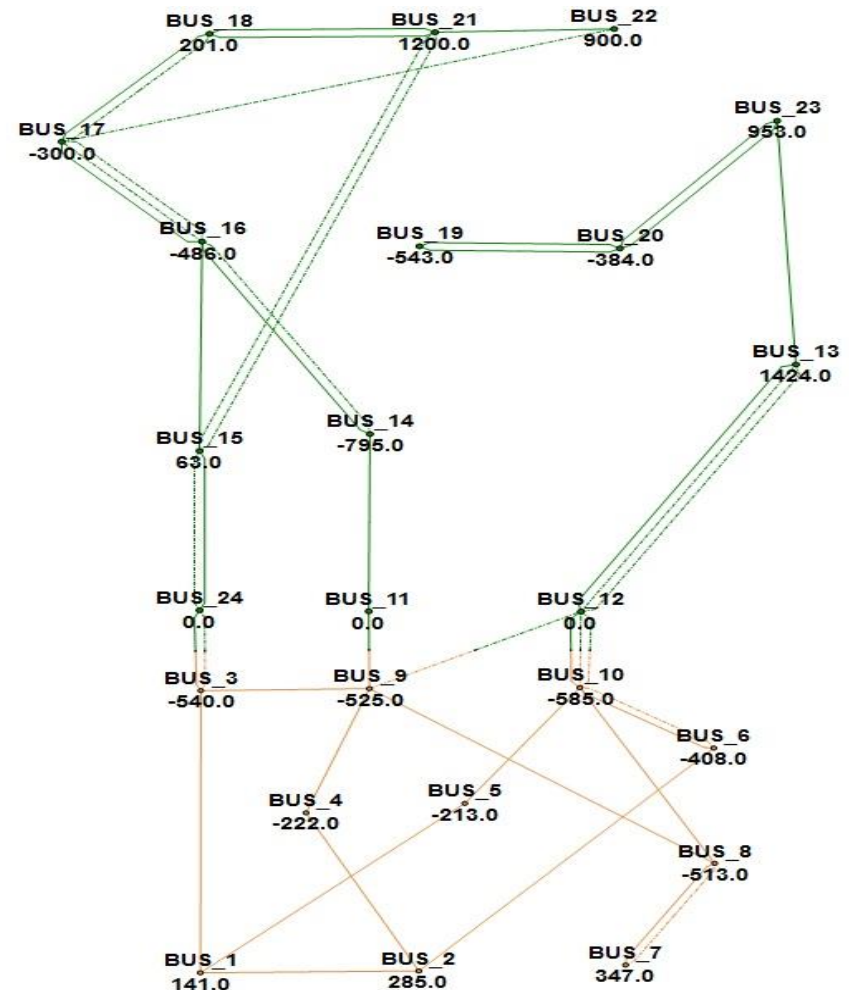
- ▶ Sistema: IEEE-24Bus
- ▶ Benchmarking para valoração dos benefícios **técnicos** trazidos pelos CSCDs e pela metodologia proposta
- ▶ Planos de Expansão Analisados:
  - BAU → **Único** Cenário de Despacho
  - BAU → **Todos** Cenários de Despacho
  - BAU + CSCDs → **Único** Cenário de Despacho
  - BAU + CSCDs → **Todos** Cenários de Despacho
- ▶ 101 CSCDs (em todas LTs existentes e candidatas) → compensação dupla (50%) e baixo custo

# Planos de Exp.: BAU & Único Cenário

## Cenário de Despacho: G1

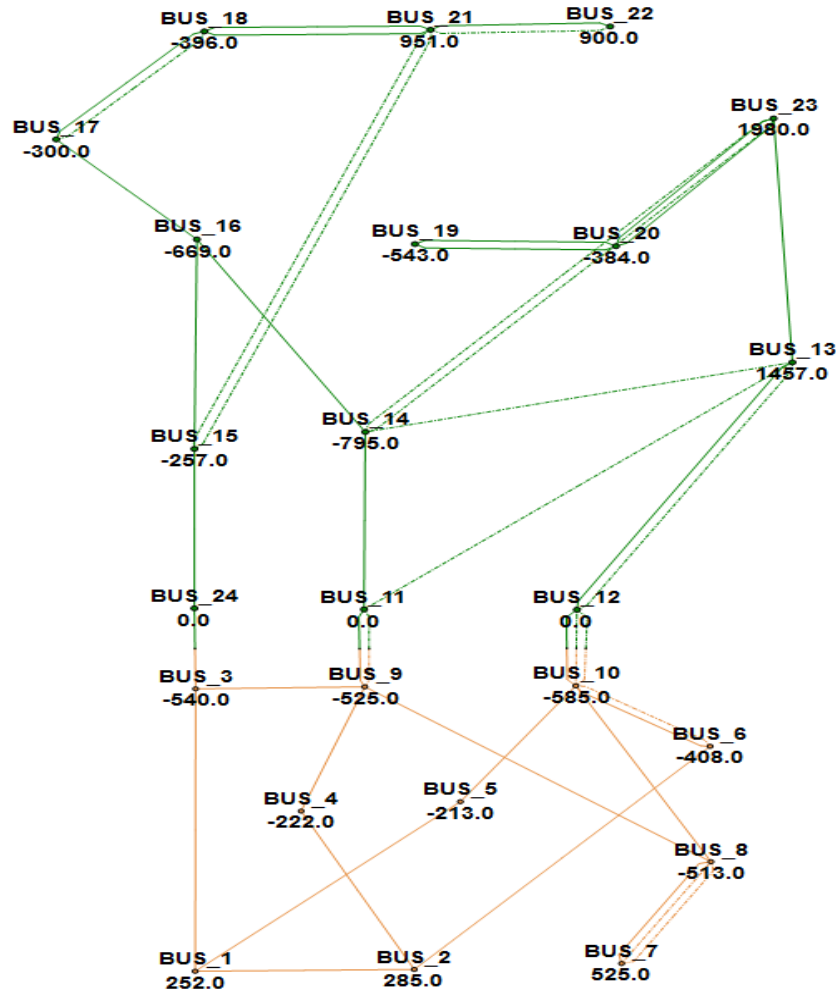


## Cenário de Despacho: G2

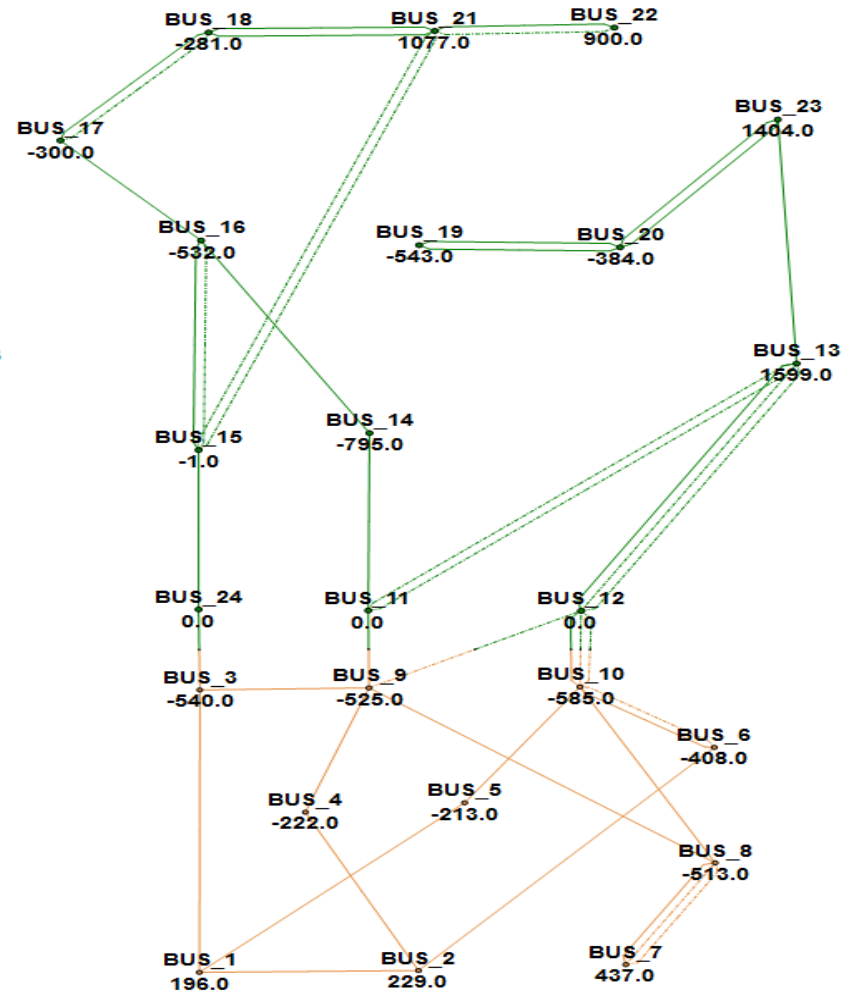


# Planos de Exp.: BAU & Único Cenário

## Cenário de Despacho: G3



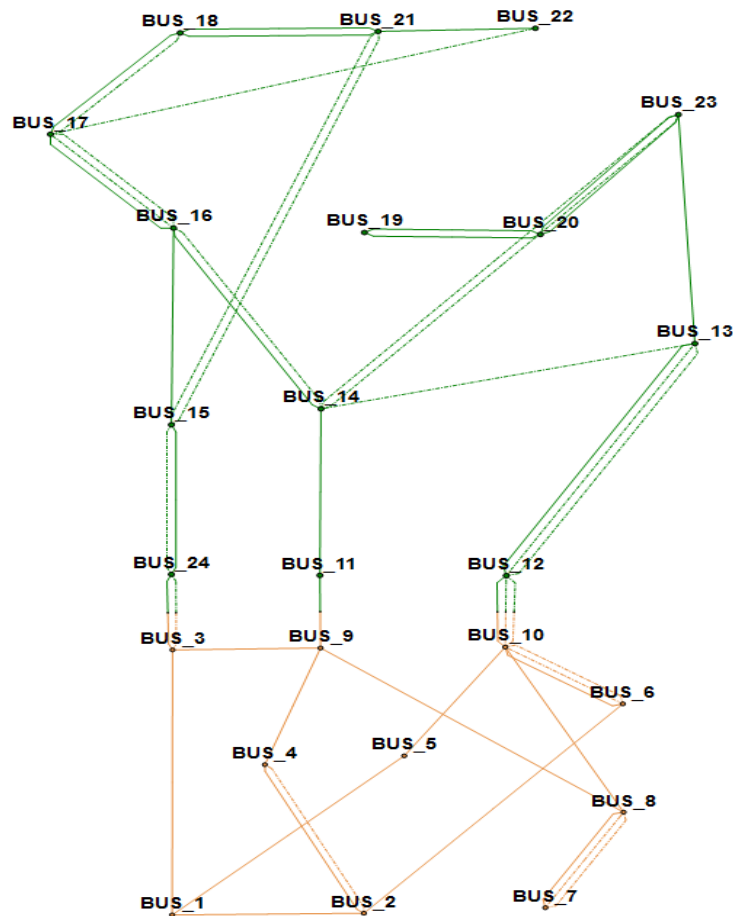
## Cenário de Despacho: G4



Cenário de Despacho	G1	G2	G3	G4
# Circuitos Adicionados	19	16	15	15
Custo Plano de Expansão [M\$]	860	864	814	736
Custo Plano de Expansão [%]	117%	117%	111%	100%
Tempo CPU [Segundos]	5	4	8	4

- ▶ Plano de Expansão mais econômico → G4
- ▶ G1 é 17% mais oneroso que G4
- ▶ G2 é 17% mais oneroso que G4
- ▶ G3 é 11% mais oneroso que G4

# Planos de Exp.: BAU & **Todos** Cenários

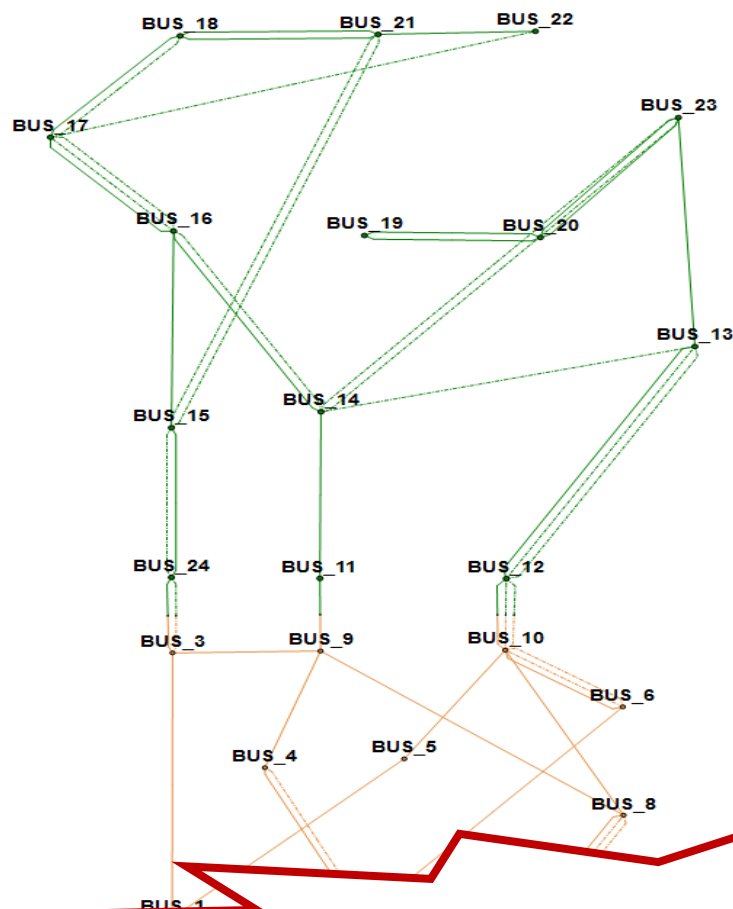


- 51% mais oneroso que G4
- Nível de carregamento médio sistêmico: 65.3% (**9% de redução**)

Cenário de Despacho	Todos Cenários
# Circuitos Adicionados	21
Custo Plano de Expansão [M\$]	1113
Custo Plano de Expansão [%]	151%
Tempo CPU [Segundos]	520

Cenário de Despacho	G1	G2	G3	G4	Média
Carregamento - BAU & Único Cenário [%]	69.5%	72.8%	70.0%	74.9%	71.8%
Carregamento - BAU & Todos Cenários [%]	69.8%	67.2%	62.2%	62.2%	65.3%

# Planos de Exp.: BAU & **Todos** Cenários



- 51% mais oneroso que G4
- Nível de carregamento médio sistêmico: 65.3% (**9% de redução**)

Cenário de Despacho	Todos Cenários
# Circuitos Adicionados	21
Custo Plano de Expansão [M\$]	1113
Custo Plano de Expansão [%]	151%
Tempo CPU [Segundos]	520

**Altos Investimentos e Baixos Carregamentos!**

	G4	Média
Carregamento - BAU	74.9%	71.8%
Carregamento - Todos Cenários	69.8%	65.3%

Cenário de Despacho	G1	G2	G3	G4	Todos
# Circuitos Adicionados	16	15	14	14	21
# CSCDs Adicionados	8	8	12	4	15
Custo Plano de Expansão [M\$]	790	796	720	728	972
Custo Plano de Expansão [%]	92%	92%	88%	99%	87%
Tempo CPU [Segundos]	305	33	179	10	5266

- ▶ Redução de Investimentos em **TODOS** os casos
- ▶ **Maior número de CSCDs** adicionados quando **todos** cenários de despacho são considerados
- ▶ **Maior economia** quando **todos** cenários de despacho são considerados

# Planos de Exp.: BAU + CSCDs

Cenário de Despacho	G1	G2	G3	G4	Todos
# Circuitos Adicionados	16	15	14	14	21
# CSCDs Adicionados	8	8	12	4	15
Custo Plano de Expansão [M\$]	790	796	720	728	972
Custo Plano de Expansão [%]	92%	92%	88%	99%	87%
Tempo CPU [Segundos]	305	33	179	10	5266

- ▶ Redução de Investimentos em **TODOS** os casos
  - ▶ **Maior número de CSCDs** adicionados quando **todos** cenários de despacho são considerados
  - ▶ **Maior economia** de custo de expansão
- Maior Nº Cenários → Maior a Demanda por Flexibilidade Operativa!***



# Planos de Exp.: BAU + CSCDs

Cenário de Despacho	G1	G2	G3	G4	Todos
# Circuitos Adicionados	16	15	14	14	21
# CSCDs Adicionados	8	8	12	4	15
Custo Plano de Expansão [M\$]	790	796	720	728	972
Custo Plano de Expansão [%]	92%	92%	88%	99%	87%
Tempo CPU [Segundos]	305	33	179	10	5266

- ▶ Redução de Investimentos em **TODOS** os casos
  - ▶ **Maior número de CSCDs** adicionados quando **todos** cenários de despacho são considerados
  - ▶ **Maior economia** de despacho são considerados
- Maior Nº Cenários → Maiores são os efeitos técnicos e econômicos!***

- Realce da Controlabilidade e Flexibilidade de Fluxo de Potência promovida pela formulação proposta:

CSCD #ID	G1	G2	G3	G4
1	-7%	+50%	+50%	
2		-50%		
3	-11%	+50%		
4		-50%	-50%	-50%
5		+49%		
6		+50%	+50%	
7		-50%	+50%	
8		+50%		
9		+45%	-46%	
10		+50%	+50%	
11	+40%	+50%	+50%	+46%
12		+50%		
13		-50%		
14	-27%	-25%		-25%
15		+50%	+50%	

- Realce da Controlabilidade e Flexibilidade de Fluxo de Potência promovida pela formulação proposta:

CSCD #ID	G1	G2	G3	G4
1	-7%	+50%	+50%	
2		-50%		
3	-11%	+50%		
4		-50%	-50%	-50%
5		+49%		

***Um setpoint de operação específico para cada cenário de despacho!***

11	+40%	+50%	+50%	+46%
12		+50%		
13		-50%		
14	-27%	-25%		-25%
15		+50%	+50%	

- ▶ Comparação do nível de carregamento da rede entre os casos:  
BAU & BAU + CSCDs

- ▶ Quando apenas um **único** cenário de despacho é considerado:

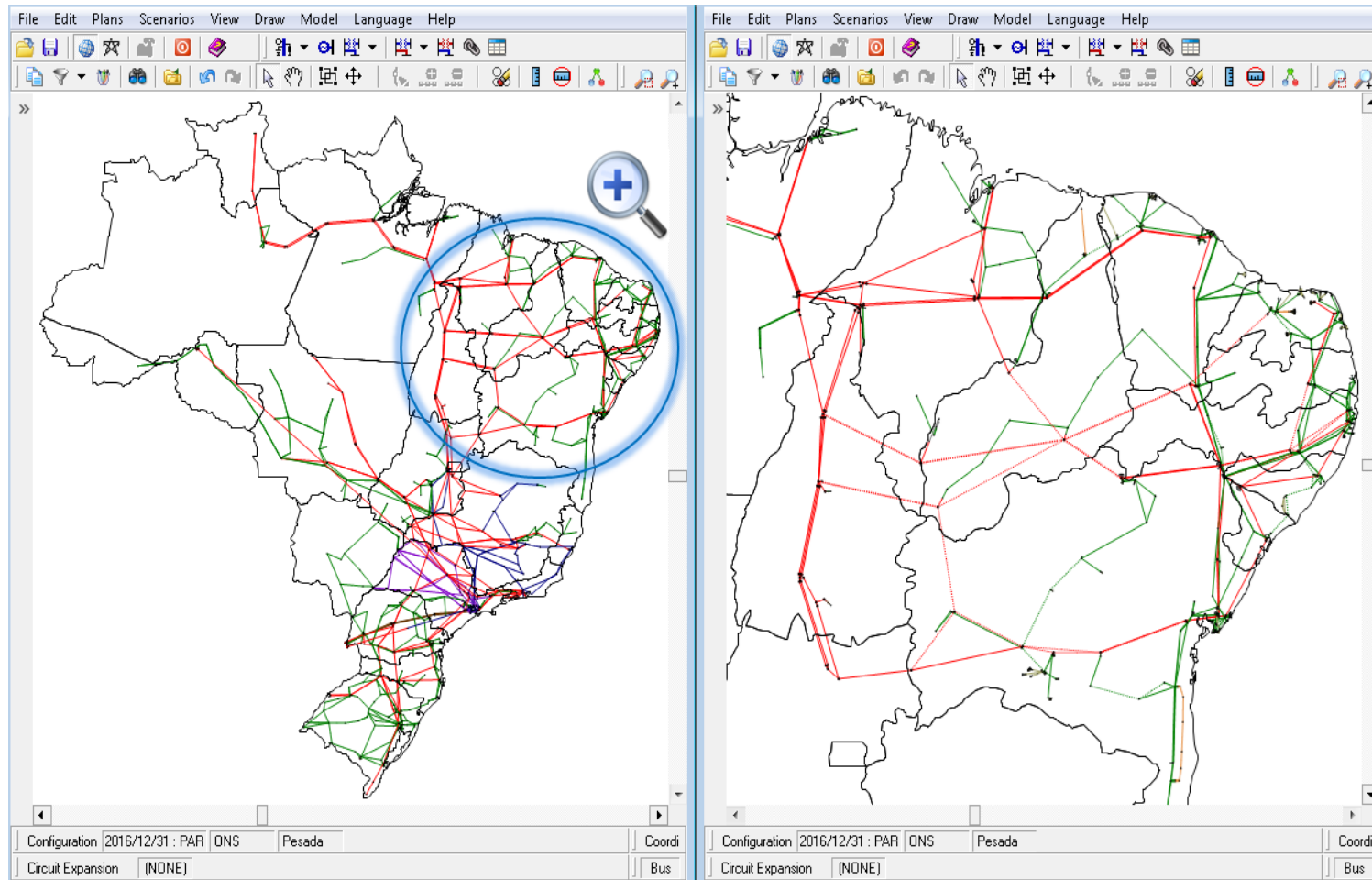
Único Cenário de Despacho	Média
Carregamento da Rede - BAU [%]	71.8%
Carregamento da Rede - BAU + CSCDs [%]	73.1%

- ▶ Quando **todos** cenários de despacho são considerados:

Todos Cenários de Despacho	Média
Carregamento da Rede - BAU [%]	65.3%
Carregamento da Rede - BAU + CSCDs [%]	67.5%

- ▶ Aumento do nível de carregamento médio dos circuitos → Maior utilização dos recursos já construídos

# EC3 – Brasil – Caso Prático



► Configuração de Dezembro 2016 ➔ 5822 barras e 8432 circuitos

- ▶ Simulação da operação eletro-energética do SIN através do Modelo SDDP para obtenção dos Cenários de Despacho
- ▶ Com o intuito de se capturar a variabilidade dos despachos, foram selecionados os percentis P1, P25, P50, P75 e P100 do total de geração do NE → Além da variabilidade, captura a autossuficiência do NE (máxima importação e máxima exportação)
- ▶ Foi feito um equivalente da Região Nordeste para diminuir o esforço computacional → 1220 barras e 1785 circuitos (187 linhas da Rede Básica sendo monitoradas)
- ▶ As linhas pertencentes ao plano de expansão 2013–2016 foram consideradas candidatas (88 linhas de transmissão)

- ▶ Planos de Expansão Analisados:
  - BAU → **Único** Cenário de Despacho
  - **CS1** → BAU & **Todos** Cenários de Despacho
  - **CS2** → BAU + DSRs em LT existentes & **Todos** Cenário de Despacho
  - **CS3** → BAU + DSRs em LT existentes + TCSCs em LTs candidatas & **Todos** Cenários de Despacho
- ▶ Custos de linhas calculados → Banco de Preços da ANEEL
- ▶ Custos dos TCSCs → função quadrática de MVar
- ▶ DSRs → reatância de compensação (reatância da linha, ampacidade e número de condutores por fase) → número de DSRs necessários → Custo Total
- ▶ Nível máximo de compensação de 30% para todos CSCDs

► BAU para **Único & Todos** Cenários de Despacho:


Cenário de Despacho	P1	P25	P50	P75	P100	Todos
# Linhas Adicionadas	19	19	16	18	26	25
# Linhas no Plano Robusto	11	15	12	18	18	All
Custo Plano de Expansão [M\$]	649	529	330	347	727	745
Custo Plano de Expansão [%]	197%	161%	100%	105%	221%	226%
Tempo CPU [Segundos]	35	3	2	2	78	283

► BAU + CSCDs para **Todos** Cenários de Despacho:

Case Study	# Linhas Adicionadas	# Linhas no Plano CS1	# CSCDs Adicionados	Investimentos em Linhas [M\$]	Investimentos em CSCDs [M\$]	Custo Plano Expansão [M\$]	Economia [M\$]	CPU Time [Minutos]
CS1	25	All	-	745	-	745	-	5
CS2	24	21	4	695	24	719	26	26
CS3	23	22	4	694	21	715	30	43



- ▶ Introdução e Resumo do Problema
- ▶ Controlabilidade de Fluxo de Potência & Equipamentos  
FACTS / Distributed-FACTS
- ▶ Modelos de Planejamento da Transmissão
- ▶ Formulações Propostas por Esta Dissertação
- ▶ Estudos de Caso
- ▶ Conclusões

- ▶ A formulação MILP para **Candidatos Híbridos** alcançou os objetivos propostos:
  - Evita não-linearidade presente na Segunda Lei de Kirchhoff (SLK) para circuitos candidatos
  - Alcança resultados mais próximos do modelo DC sem a inserção das constantes disjuntivas “*Big M*”
  - Adiciona flexibilidade de fluxo de potência para o circuito candidato
  - Porém, insere variáveis inteiras no problema associadas à direção do fluxo →  esforço computacional

- ▶ A formulação MILP de **Compensação Série** alcançou os objetivos propostos:
  - CSCD pode ser conectado à linha existente ou candidata
  - **Nível de compensação máximo** do equipamento definido pelo usuário
  - Além do nível, é possível definir o **TIPO** de Compensação: Positiva, Negativa ou Dupla
  - Formulação proposta apresenta um **setpoint** de operação específico para cada cenário de despacho → controlabilidade e flexibilidade operativa almejada
- ▶ Possibilidade de utilização de *solvers* comerciais para MILPs

- ▶ Na formulação proposta, o nível máximo de compensação é definido pelo usuário:
  - Investigar a relação entre nível de compensação e custo (curva linear, côncava ou convexa?) → esforços direcionados para formulação na qual o próprio modelo decidirá o *trade-off* ótimo entre nível de compensação e custo
- ▶ Mais Pesquisas em controlabilidade e flexibilidade de FPO:
  - Esforços para determinação da *Real-time Dynamic Thermal Rating* (RDTR) → aplicações diretas na operação → limites térmicos mais realistas de linhas poderão também apresentar aplicações no planejamento da transmissão

- ▶ Mais Pesquisas em controlabilidade e flexibilidade de FPO:
  - Análise do efeito conjunto → Defasadores + CSCDs
  - Intensa pesquisa industrial no momento: *DC Breakers* → Modelagem de Links DC Multi-terminais e de Redes DC (PLK e SLK) no FPO DC
  - Possibilidade de modelar variáveis binárias na MILP associadas ao chaveamento e alteração da configuração da Rede DC de acordo cenários de despacho e condições operativas

A ciência avança!

Obrigado!

Ricardo Perez



**COPPE**  
UFRJ

Instituto Alberto Luiz Coimbra de  
Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia