



#### Métodos Baseados em FPO para Subsidiar Programas de Participação da Demanda

Prof. Antonio J.A. Simões Costa

Grupo de Sistemas de Potência

Departamento de Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Catarina

Brasil



## Introdução

- A complexidade dos sistemas de potência atuais e as dificuldades para sua expansão impõem melhor utilização dos recursos disponíveis;
- Advento dos mercados competitivos: maiores incentivos para a participação dos consumidores;
- Crescente influência da atividades pelo lado da demanda nas decisões operativas de Sistemas de Potência.



## Atividades pelo Lado da Demanda

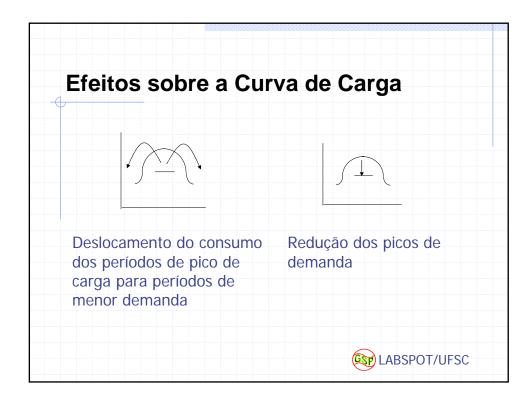
- Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD): Atividades adotadas pela concessionária ou Operador para alterar o padrão de consumo dos seus consumidores [CIGRÉ];
- Formas de Implementação de GLD: Tarifação Dinâmica, Programas de Eficiência Energética, Ofertas de Redução de Demanda, Gerenciamento de Carga;
- Programas de Participação da Demanda (PPD): Programas baseados em incentivos para motivar consumidores a temporariamente reduzir ou deslocar parte de sua demanda em resposta à solicitação da concessionária ou Operador.



#### Programas de Participação da Demanda

- Interação entre concessionária e seus consumidores, com o objetivo de considerar a Participação da Demanda (PD) como parte das estratégias de operação;
- Consumidores devem reduzir seu consumo no momento e da forma solicitada pela concessionária, em contrapartida a incentivos econômicos;
- ➢ PD deve provocar variações nos padrões de consumo (redução de picos, preenchimento de vales e deslocamentos de carga), para promover os efeitos desejados na curva de carga atendida pelo sistema de potência.





#### Modalidades de Participação da Demanda em Ambientes de Mercado

- ➤ Ambiente de Tarifa Fixa/Horo-Sazonal (*Time-of-Use*):
  - Contratos de PD são estabelecidos entre concessionária/operador e consumidores;
  - Contratos devem especificar benefícios para consumidores participantes.
- > Ambiente de Preços Variáveis de Energia (Spot Price):
  - Demanda de grandes consumidores pode variar em função dos preços horários de energia;
  - Concessionária/Operador podem oferecer incentivos para obter reduções de demanda.



### Implementação de PPDs:

#### Consumidores com tarifação horo-sazonal

- Consumidores disponibilizam reduções de parte de sua carga, a pedido da concessionária;
- Contratos s\(\tilde{a}\) estabelecidos entre a concession\(\tilde{a}\)ria e consumidores participantes;
- A concessionária determina onde e quando a carga deve ser reduzida, de acordo com a condição de operação e o nível de severidade.



### Contratos de Participação da Demanda

- Quantidade de carga disponível para redução;
- Tempo para notificação prévia;
- Benefícios econômicos para os participantes;
- Condições de operação sob as quais reduções de carga podem ser solicitadas;
- Frequência máxima para as solicitações da concessionária, etc.



#### Consumidores que Respondem a Preço:

Modelagem da Demanda via Elasticidades

- ightharpoonup Elasticidade-preço:  $\epsilon_d = \frac{\Delta p_d / P_{do}}{\Delta \rho / \rho_o}$
- Relaciona a demanda num intervalo com o preço no mesmo intervalo.
- Elasticidade-preço cruzada no tempo:

$$\varepsilon_{cr,d} = \frac{\Delta p_d(t_i)/P_{do}}{\Delta \rho(t_i)/\rho_o}$$

Relaciona a demanda em um intervalo  $t_i$  com o preço em outro intervalo  $t_i$ .

GSP LABSPOT/UFSC

#### Consumidores que Respondem a Preço:

Função Benefício do Consumidor

- ➤ Expressa o benefício do consumo de energia elétrica para a atividade desenvolvida pelo consumidor;
- ➤ Função Benefício quadrática:

$$B(p_d) = B_1 \cdot p_d - \frac{1}{2} \cdot p_d^T \cdot B_2 \cdot p_d$$

➤ Curva de Demanda associada:

$$p_d = P_{do} + M_d \cdot \rho$$

GSP LABSPOT/UFSC

#### Consumidores que Respondem a Preço:

Relação entre Função Benefício e Curva de Demanda

$$\begin{cases} B(p_d) = B_1 \cdot p_d - \frac{1}{2} \cdot p_d^T \cdot B_2 \cdot p_d \\ p_d = P_{do} + M_d \cdot \rho \end{cases} \qquad B_2 = -M_d^{-1}$$

$$B_1 = B_2 \cdot P_{do}$$

- $\triangleright$  Matriz  $M_d(N_t \times N_t)$ :
  - Elementos diagonais: proporcionais à elasticidadepreço;
  - Elementos fora da diagonal: proporcionais às elasticidades cruzadas.



## **Resultados Esperados**

- Alívio de condições críticas de operação (congestionamentos de transmissão, perfís de tensão deficientes) para preservar qualidade de suprimento e níveis de confiabilidade;
- Redução de carga: mais rápida e flexível do que a partida de unidades geradoras de reserva;
- Prevenção de desgastes na relação concessionáriaconsumidor decorrentes de cortes de carga em condições severas;
- Melhoria no elenco de serviços oferecido pela concessionária a seus consumidores.



## Formulação do FPO Dinâmico (FPOd)

Função-Objetivo (1)

Minimizar (Custo Concessionária –Benef. Consumidor)

#### Custo da Concessionária:

- Energia comprada ou produzida pela concessionária (C<sub>a</sub>);
- Incentivos par encorajar reduções of consumo (I<sub>n</sub>);
- Perdas de faturamento devidas à redução de demanda (R₁).
- Benefício do Consumidor (B<sub>d</sub>):
  - Para consumidores sujeitos a spot price, B<sub>d</sub> representa os benefícios do uso da energia elétrica em função das variações de preço de energia;
  - Não é considerado para consumidores alimentados a tarifa fixa ou horo/sazonal (time-of-use).



### Formulação do FPO Dinâmico (FPOd)

Função-Objetivo (2)

$$Min (C_g - B_d + I_n + R_L)$$

Custos de Generação:

$$C_{g} = \sum_{i=1}^{nS} C_{g_{i}} \qquad C_{g_{i}}(P_{g_{i}}) = c_{l_{i}}^{T}.P_{g_{i}} + \frac{1}{2}.P_{g_{i}}^{T}.C_{2_{i}}.P_{g_{i}} \qquad i \in \{1,...,nS\}$$

Benefício total dos consumidores:

$$\mathbf{B}_{d} = \sum_{i=1}^{nD} \mathbf{B}_{d_{i}} \qquad \mathbf{B}_{d_{i}}(\mathbf{P}_{d_{i}}) = \mathbf{b}_{1_{i}}^{T}.\mathbf{P}_{d_{i}} - \frac{1}{2}.\mathbf{P}_{d_{i}}^{T}.\mathbf{B}_{2_{i}}.\mathbf{P}_{d_{i}} \qquad i \in \{1,...,nD\}$$

Incentivos para Consumidores que respondem a preço:

$$I_n = \sum_{i=1}^{n_D} I_i \left( \sum_{t=1}^{n_{TI}} \tau_t \cdot \left( P_{d_{i_t}} - P_{u_{i_t}} \right) \right)$$

 $I_{n} = \sum_{i=1}^{n_{D}} I_{i} \left( \sum_{t=1}^{n_{TI}} \tau_{t} \left( P_{d_{i_{t}}} - P_{u_{i_{t}}} \right) \right)$ Perda de receita dev. a redução carga:  $R_{L} = \sum_{i=1}^{n_{R}} r_{i} \left( P_{d_{i_{t}}} - P_{u_{i_{t}}} \right) \right)$ (para consumidores horo-sazonais)



#### Formulação do FPO Dinâmico (FPOd) Restrições do Problema de Otimização (1)

- > Equações de balanço de potência ativa e reativa:
  - Modelo Não-linear para a rede;
  - Cargas sensíveis a preço consideradas variáveis de controle.
- Limites Operativos:
  - Potências geradas;
  - Reduções de carga;
  - Tensões nodais;
  - Fluxos de potência nos ramos.
- Restrições dos consumidores:
  - Representam limitações impostas pelo padrão de consumo do consumidor;
  - Podem ser intertemporais (acopladas no tempo).



#### Formulação do FPO Dinâmico (FPOd) Restrições do Problema de Otimização (2)

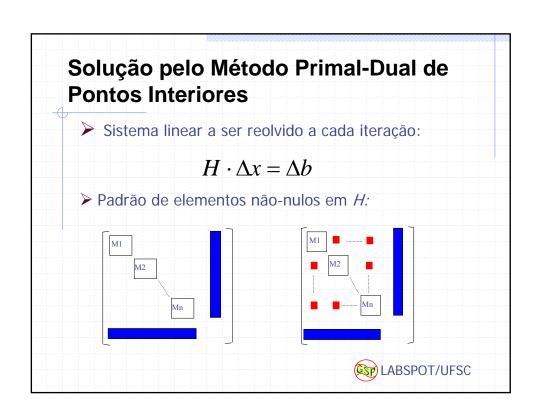
Equações de balanço de potência ativa e reativa:

$$\begin{aligned} & P_{L_{t}} + P_{t}(\theta_{t}, V_{t}) + A_{d}.P_{d_{t}} - A_{g} \cdot P_{g_{t}} - A_{r} \cdot P_{r_{t}} = 0 \\ & Q_{L_{t}} + Q_{t}(\theta_{t}, V_{t}) + A_{d}.Q_{d_{t}} - A_{g} \cdot Q_{g_{t}} - A_{r} \cdot Q_{r_{t}} = 0 \end{aligned}$$

Limites operacionais:

$$\begin{aligned} & P_{g_t}^m \leq P_{g_t} \leq P_{g_t}^M \\ & P_{d_t}^m \leq P_{d_t} \leq P_{d_t}^M \\ & P_{r_t}^m \leq P_{r_t} \leq P_{r_t}^M \\ & V_t^m \leq V_t \leq V_t^M \\ & f_{L_t}^m \leq f_t(\theta_t, V_t) \leq f_{L_t}^M \end{aligned}$$

(SP) LABSPOT/UFSC



# Resultados Fornecidos pela Abordagem FPOd

- Seleção das cargas a serem reduzidas;
- Quantidades das reduções de carga individuais;
- ◆ Tempo e duração das reduções de carga;
- Componentes de custo do Programa de PD.

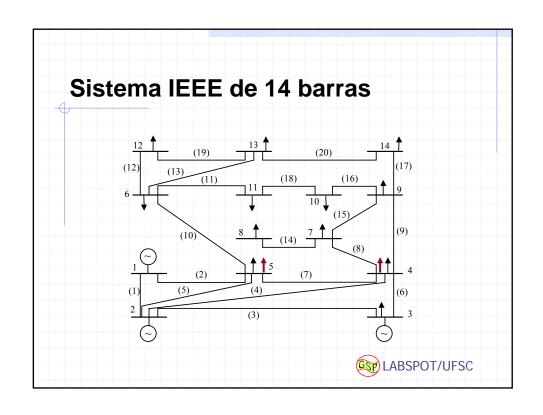


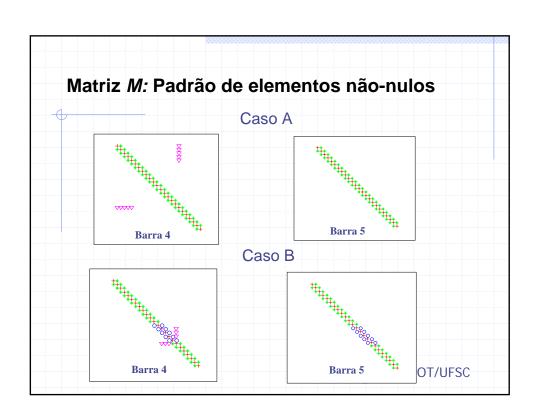
## Resultados de Simulações

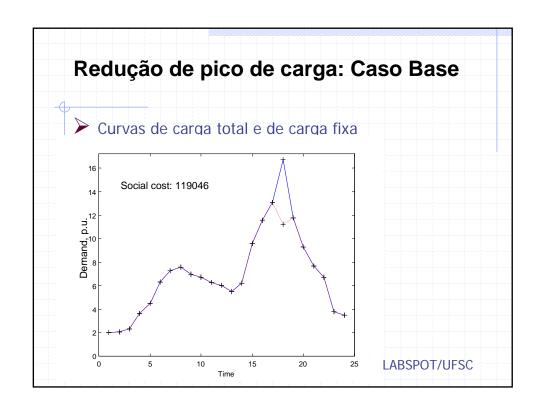
#### Problemas simulados:

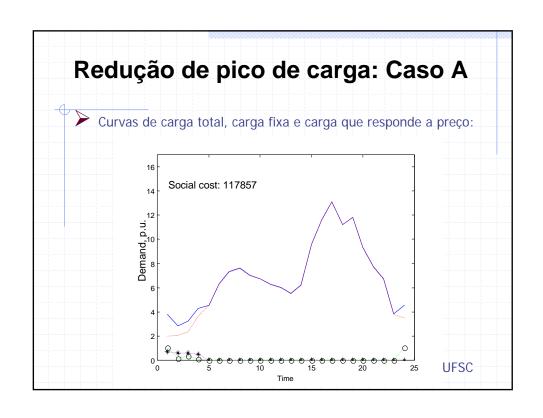
- Redução de pico de carga (sistema IEEE 14 barras);
- Congestionamento de Transmissão
  - Sistema-teste: IEEE 30-barras;
  - Consumidores que respondem a preço (ambiente spot price).
- Perfil de Tensão Deficiente
  - Sistema-teste: modelo reduzido de 37 barras da rede de subtransmissão da CELESC;
  - Preços de energia constantes;
  - Existência de contratos de redução de carga entre concessionária e consumidores.

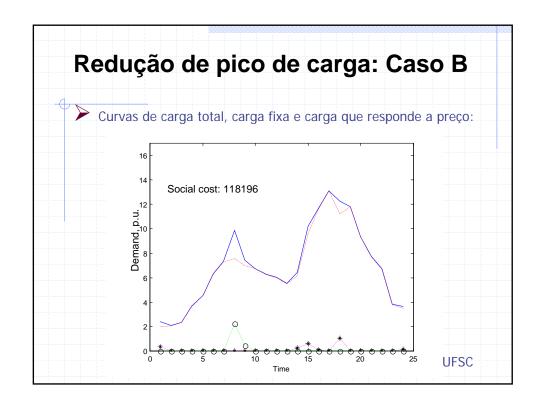


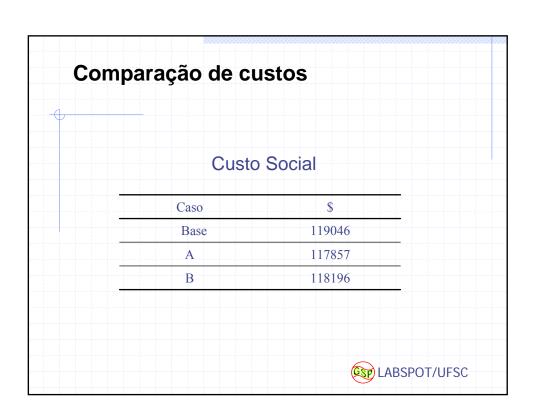




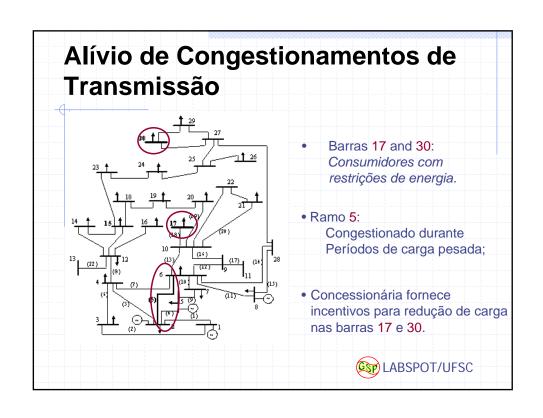








	Ger	ação	
Pg (p.u.)	G1	G2	G3
Base	14.970	22.931	129.365
A	12.985	16.945	137.335
В	13.075	18.064	136.127

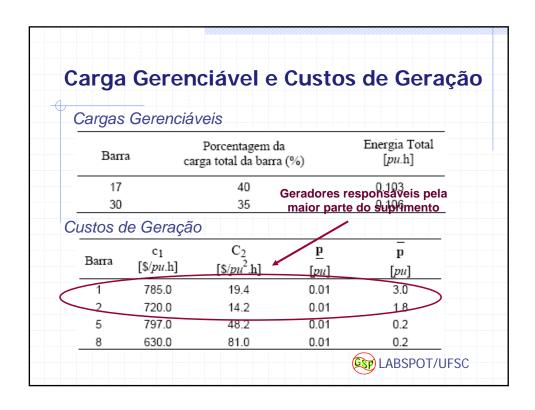


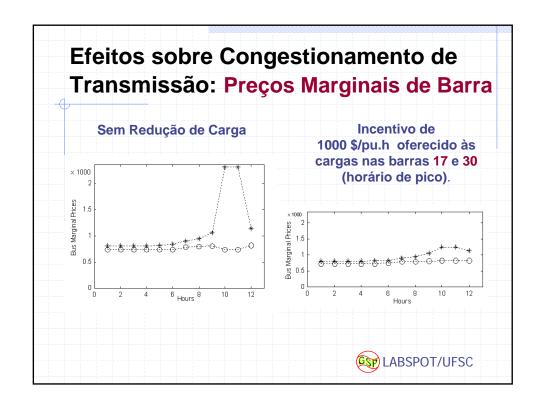
# Elasticidades das Cargas que Respondem a Preço

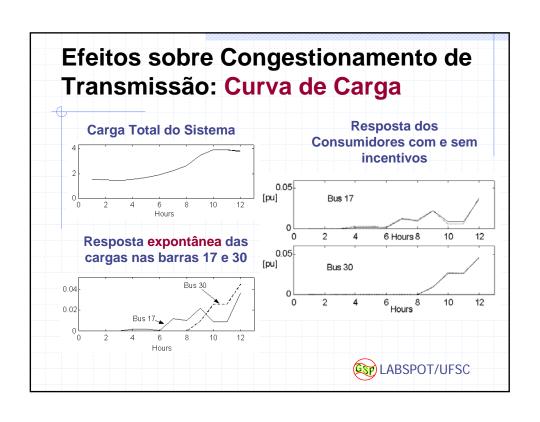
		Intervalo										
Barra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
17	.55	.55	.55	.5	.5	.5	.4	.4	.3	.2	.2	.2
30	.5	.5	.5	.5	.5	.4	.4	.3	.2	.1	.1	.1

- ➤ Valores baixos de elasticidade ⇒ consumidor menos flexível;
- Elasticidades das duas cargas são mais baixas ao final do período;
- Elasticidades cruzadas não são consideradas.

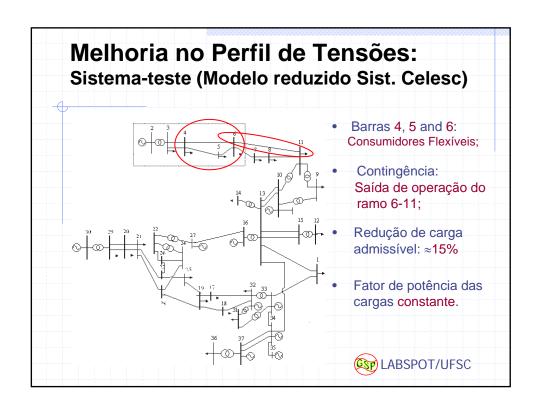


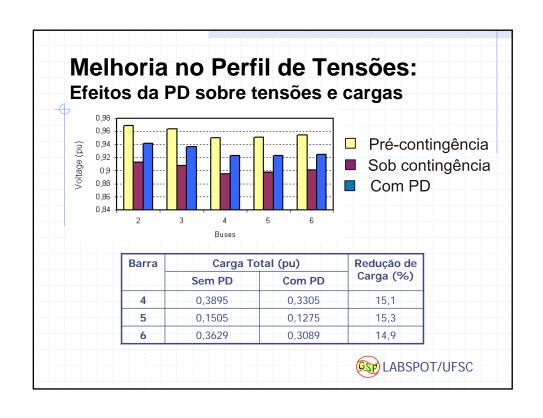


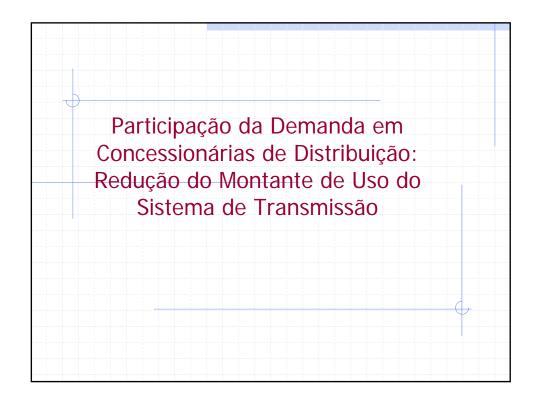




Incentivos x 10 <sup>-2</sup> (\$/pu.h)	Benefício dos Cons. (\$)	Conta de Energia (\$)	Máx. Difer. De PMBs (\$/pu.h)	Incentivos (\$)
0/0	2403,9	479,7	1561,3	0
10/10	2397,8	329,7	429,7	69,4







## Concessionárias de Distribuição

- Devem fornecer energia respeitando critérios de qualidade e limites operacionais dos equipamentos;
- > Devem evitar a ultrapassagem de:
  - valores de energia contratados com seus fornecedores e
  - > capacidades contratadas com o Operador do Sistema;
- Estão sujeitas a:
  - Picos inesperados de consumo;
  - Contingências ou congestionamentos em seu sistema de subtransmissão.



# Operação Convencional de Concessionárias de Distribuição

- Variáveis de controle disponíveis:
  - Potências ativa e reativa geradas;
  - Taps de trafos, chaveamento de capacitores/reatores;
  - Cortes de carga (mandatórias, em situações críticas);
- Potência das cargas são dados do problema → Consumidores não participam de decisões para o alívio de condições críticas;
- Distribuidora compra energia de Empresas Geradoras e Produtores Independentes, entregue via Sist. de Transmissão;
- Requisitos a serem observados:
  - Limites nos montantes de energia contratados;
  - Limites de capacidade contratados com o Operador do Sistema nos pontos de conexão com a Rede de Transmissão.



#### PPDs para Empresas de Distribuição

- Consideram-se PPDs envolvendo consumidores de médio/grande porte de uma empresa de distribuição;
- Concessionária e consumidores estabelecem contratos de suprimento com cláusulas de redução de demanda;
- Consumidores disponibilizam parte de sua carga para redução, em resposta a solicitação da distribuidora;
- Objetivo típico: aliviar os efeitos de condições operacionais severas para a distribuidora.



#### Características do Problema

- Condições operacionais adversas e inesperadas podem levar a aumento no custo da energia importada via rede de transmissão;
- ▶ Por outro lado, reduções de carga levam a perdas de receita da distribuidora ⇒ consumidores do PPD acionados devem ser cuidadosamente selecionados, de acordo com sua localização na rede:
- Necessidade de despacho conjunto do suprimento de energia e reduções de carga, levando em conta:
  - Limites operativos dos equipamentos;
  - Balanço de potência;
  - Limites de redução de carga requeridos pelos consumidores.



## Abordagem Proposta

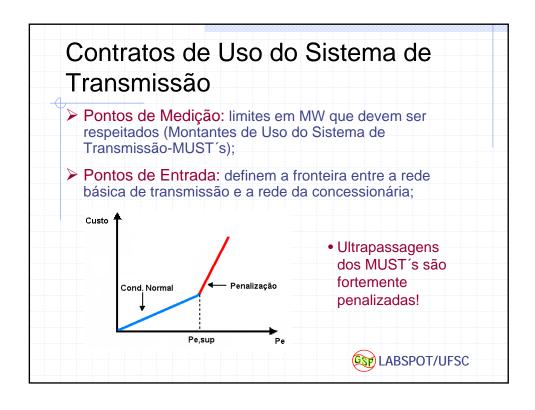
- > FPO especializado, que busca minimizar simultaneamente:
  - Custos da energia adquirida pela distribuidora;
  - Perdas de receita advindas das reduções de demanda dos consumidores.
- Restrições do problema:
  - Equações de balanço de potência na rede;
  - Limites operacionais de equipamentos e ramos;
  - Restrições operacionais dos consumidores participantes do PPD.



## Estratégia de Operação com PPD

- Consumidores participam de decisões para o alívio de condições críticas de operação;
- Desligamentos intempestivos tornam-se reduções de carga realizadas em concordância com os consumidores através de incentivos econômicos;
- Consumidores gerenciados podem ser vistos como pequenos geradores dispersos pela rede elétrica.







# Formulação via FPO

- Problema de otimização e restrições intertemporais: Fluxo de Potência Ótimo Dinâmico (FPOd);
- Duas versões de FPOd foram desenvolvidas:
  - Sem representação da resposta dos consumidores: FPO Base (convencional);
  - Com a representação da resposta dos consumidores: FOPe (Fluxo de Potência Ótimo com Restrições Operacionais).



# Formulação do FPO Base

Minimizar Custo de Potência de Entrada:

$$C(\mathbf{p}_{e}) = \left[ \sum_{t=1}^{n_{T}} \sum_{i=1}^{n_{E}} f_{b_{i}} . p_{e_{i,t}} . h_{t} + \sum_{t=1}^{n_{T}} \sum_{j \in \psi_{i}} f_{c_{i}} . (p_{e_{i,t}} - \bar{P}_{e_{j}}) . h_{t} \right]$$

➤ Sujeito a.<sup>C(P<sub>e</sub>)</sup>

 $1_{L,t}^{m} \leq_{\overline{P}_{e}} A \cdot \theta_{t}^{\bullet} \leq_{e} 1_{L,t}^{M}$ Limites dos Fluxos:

GSP LABSPOT/UFSC

Minimizar Custos de Potência de Entrada e de Não Faturamento:

$$C(p_e) = \left[ \sum_{t=1}^{n_T} \sum_{i=1}^{n_E} f_{b_i} . p_{e_{i,t}} . h_t + \sum_{t=1}^{n_T} \sum_{j \in \psi_i} f_{c_i} . (p_{e_{i,t}} - \bar{P}_{e_j}) . h_t \right] + \left[ NF_1(p_1) + NF_2(p_2) + NF_3(p_3) \right]$$

Sujeito a restrições do FPO Base e a restrições intertemporais:

Consumidores Flexíveis:

Limites de redução de potência:  $p_{l,t}^m \not = p_{l,t} \le p_{l,t}^M$ 

Consumidores com Restrição de Epergia:

- Energia:  $e^m \le P_d \cdot h_T \le e^M$
- Taxa de variação de redução de carda:  $\Delta VDP_e \leq D \cdot P_v \leq \Delta VD^M$

Consumidores com Restrição de Potência:

• Potência constante:  $C \cdot P_C = 0$ 

CSP LABSPOT/UFSC

# Resultados Fornecidos pelo Método

- Localização das cargas a serem reduzidas;
- Montante de energia a ser reduzido;
- > Intervalo de tempo e duração da redução;
- Custo de não-faturamento relativo à redução do consumo.

GSP LABSPOT/UFSC

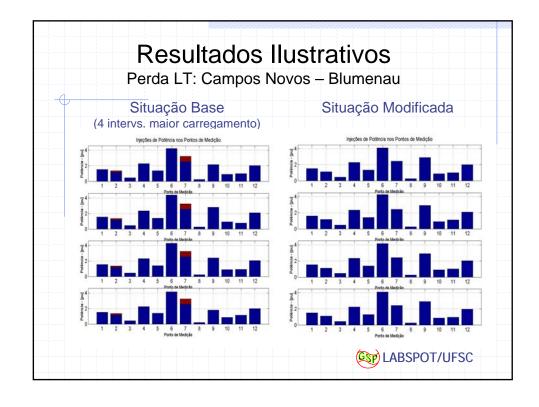
### Resultados Ilustrativos

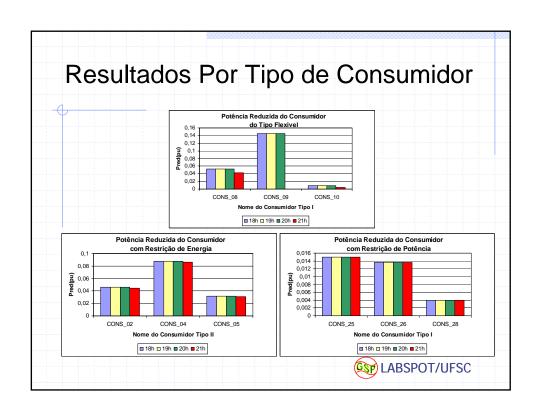
Sistema-teste: Sistema de Subtransmissão da Celesc

Contingência: Perda LT: Campos Novos - Blumenau

- Contingência severa para o sistema Celesc;
- Duração: 1 hora;
- Carregamento considerado: Julho/2003, carga pesada;
- Duas situações :
  - Situação Base: sob contingência e sem GC (FPO);
  - Situação Modificada: sob contingência e com GC (FOPe);
- > Representação dos Consumidores:
  - Região Norte = 25% da capacidade contratada;
  - Outras regiões = 10% da capacidade contratada.







	Sit. Base	Sit. Modificada	
Perda Receita (R\$)		29.719,00	
Multa (R\$)	1.155.700,00	68.780,00	
Total (R\$)	1.155.700,00	98.499,00	

# Conclusões (I)

#### Participação da demanda mostra-se eficaz para:

- Aliviar condições operacionais adversas, tais como: congestionamentos de transmissão, aumentos súbitos de carga, efeitos de contingências sobre perfil de tensão, etc;
- Reduzir custos de operação e penalidades decorrentes de situações críticas de operação;
- ➤ Tendência de aplainamento da curva de carga ⇒ maior segurança na operação do sistema;
- Auxílio na determinação do montante contratado de uso da transmissão por redes de distribuição;



# Conclusões (II)

- PD também permite que investimentos em reforços de transmissão/distribuição possam ser postergados ou melhor escalonados no tempo;
- Fluxo de Potência Ótimo dinâmico proposto qualificase como ferramenta adequada para avaliar a eficácia da contribuição da Participação da Demanda.

