

# Avaliação Quantitativa e Qualitativa da Flexibilidade na Interface entre Sistemas de Transmissão e Distribuição<sup>\*</sup>

Ranielli V. Pombo<sup>\*</sup> João A. Passos Filho<sup>\*</sup> Fábio P. C. Brillhante<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, UFJF, MG, (e-mails: ranielli.vieira@engenharia.ufjf.br, joao.passos@ufjf.edu.br).

<sup>\*\*</sup> Petrobras, CENPES, RJ, (e-mail: fabio.brilhante@petrobras.com.br)

---

## Abstract:

The growing scenario of Distributed Energy Resources (DERs) integration in low voltage brings challenges related to the security operation of power systems globally and possibilities of providing ancillary services to contribute to system management. Therefore, the power exchange at the interface between the transmission and distribution systems gains relevance for the security operation of both. In this context, the flexibility region emerges as an alternative to enable the knowledge of this information, and the flexibility coefficients present themselves as a possibility to measure the capability of each system from the point of view of both operators. This work applies a methodology to construct flexibility regions and the concepts of flexibility coefficients to evaluate the connection of transmission and distribution systems. The reference methodology was expanded to handle the construction of maps for the transmission system through a few modifications in the problem formulation. Simulations and analysis were executed using 33 and 38-bus transmission and distribution systems through Python language implementation. The results show that the flexibility coefficients allow performing analyses to identify the best connection point between systems to take better advantage of their flexibilities.

**Resumo:** O cenário de crescimento da integração de Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) na baixa tensão traz desafios relacionados à operação segura de sistemas de potência de forma global e possibilidades de prestação de serviços ancilares de modo contribuir com o gerenciamento do sistema. Diante disso, a troca de potência na interface entre os sistemas de transmissão e distribuição ganha relevância para a operação segura de ambos. Nesse contexto, a região de flexibilidade surge como uma alternativa para possibilitar o conhecimento dessa informação e os coeficientes de flexibilidade apresentam-se como uma possibilidade de mensurar a capacidade de cada sistema do ponto de vista de ambos operadores. Esse trabalho realiza a aplicação de uma metodologia para construção de regiões de flexibilidade e os conceitos dos coeficientes de flexibilidade para avaliar a conexão de sistemas de transmissão e distribuição. A metodologia aplicada é expandida para lidar com a construção de regiões para o sistema de transmissão através de poucas modificações na formulação do problema. As simulações e análises são realizadas utilizando sistemas de transmissão e distribuição de 33 e 38 barras através de implementação em linguagem Python. Os resultados mostram que os coeficientes de flexibilidade permitem realizar análises para identificar o melhor ponto de conexão entre os sistemas de modo aproveitar melhor suas flexibilidades.

*Keywords:* Flexibility Region; Flexibility Coefficient; Distributed Energy Resource; TSO/DSO Interface; Optimal Power Flow.

*Palavras-chaves:* Região de flexibilidade; Coeficiente de flexibilidade; Recurso energético distribuído; Interface TSO/DSO; Fluxo de Potência Ótimo.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A região de flexibilidade no ponto de conexão entre sistemas de transmissão e distribuição pode ser uma informação importante para os operadores de ambos sistemas, sobretudo para o operador da transmissão, pois traz informações que representam a capacidade do alimentador

de distribuição sem ser necessário conhecer de forma detalhada essa rede.

No contexto dos Recursos Energéticos Distribuídos (REDs) essa informação ganha ainda mais relevância, uma vez que os REDs podem fornecer flexibilidade de modo a colaborar com o gerenciamento da operação do sistema de transmissão como um serviço ancilar.

Alguns conceitos de flexibilidade são apresentados na literatura. Em Silva et al. (2018a), a flexibilidade é definida

---

<sup>\*</sup> Os autores agradecem à Petrobras pelo apoio financeiro.

como a capacidade de modificação do padrão de geração e/ou consumo em reação a um sinal externo de modo a providenciar um serviço ao sistema. De modo geral, é possível caracterizar a flexibilidade do sistema através dos recursos que permitem esse sistema transitar entre diferentes pontos de operação. A Figura 1 ilustra esse conceito onde um sistema que opera no ponto “A” realiza as modificações em sua operação e passa a operar no ponto “B” dentro da região de flexibilidade disponível assumindo novos valores de potência ativa e reativa no *Point of Common Coupling* (PCC).

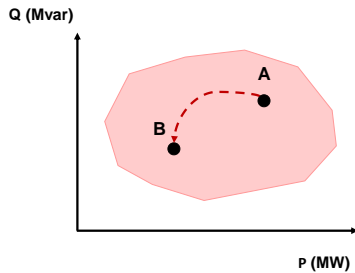


Figura 1. Representação da mudança entre pontos de operação dentro da região de flexibilidade.

A flexibilidade pode estar associada a diferentes localizações em sistemas de potência. Na Figura 2 observa-se a flexibilidade em três pontos do sistema:

- Flexibilidade local: representa a flexibilidade proveniente de cada RED;
- Flexibilidade da distribuição: representa a agregação da flexibilidade individual de cada RED levando em conta as restrições do sistema de distribuição;
- Flexibilidade da transmissão: representa a agregação da flexibilidade individual de cada recurso levando em conta as restrições do sistema de transmissão.

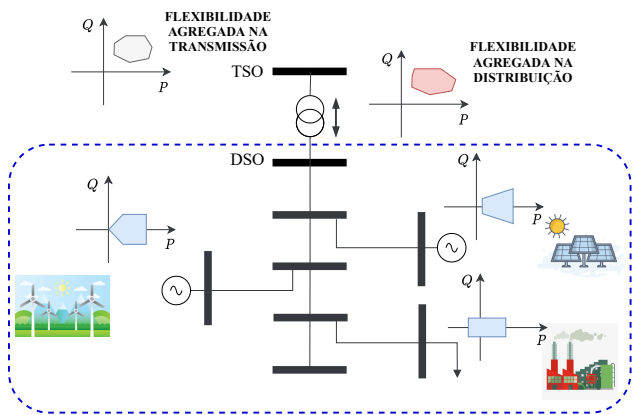


Figura 2. Flexibilidade em diferentes pontos do sistema.

Em Stanković et al. (2021) são introduzidos os coeficientes de flexibilidade  $T_{flex}$  e  $D_{flex}$  com a finalidade de quantificar o impacto das flexibilidades no PCC do ponto de vista do *Transmission System Operator* (TSO) e do *Distribution System Operator* (DSO). Ambos são calculados utilizando regiões de flexibilidade na interface TSO/DSO de acordo com as equações (1) e (2).

$$D_{flex} = \frac{A(D \cap T)}{A(D)} \quad (1)$$

$$T_{flex} = \frac{A(D \cap T)}{A(T)} \quad (2)$$

O operador  $A(*)$  representa o cálculo da área da região passada como argumento,  $D$  representa a região de flexibilidade calculada para o sistema de distribuição e  $T$  representa a região de flexibilidade para o sistema de transmissão.

O coeficiente  $D_{flex}$  descreve a usabilidade da flexibilidade do sistema de distribuição na interface entre os sistemas. Valores elevados de  $D_{flex}$  significam que a interface TSO/DSO pode acomodar uma porcentagem elevada de valores de troca de potência ativa e reativa definidos pela região de flexibilidade do DSO. Já o coeficiente  $T_{flex}$ , descreve a quantidade de flexibilidade do sistema de distribuição que cobre a gama de troca de energia permitida no barramento do sistema de transmissão na interface TSO/DSO. Essa gama de troca de potência permitida é definida pela região de flexibilidade do TSO. O coeficiente  $T_{flex}$ , quantifica quanto da capacidade de troca de potência de uma determinada barra do sistema de transmissão dada por sua região de flexibilidade, pode ser explorada pelo sistema de distribuição. Valores de  $T_{flex}$  elevados significam que a flexibilidade fornecida pelo sistema de distribuição pode impactar significativamente na operação do sistema de transmissão Stanković (2021).

No presente trabalho, uma metodologia para construção de regiões de flexibilidade aplicada em sistemas de distribuição é expandida para ser aplicada em sistemas de transmissão e, a partir da construção das regiões para ambos sistemas, o cálculo dos coeficientes de flexibilidade é realizado de modo a avaliar a capacidade operativa no ponto de acoplamento comum dos sistemas num contexto de penetração de REDs no sistema de distribuição.

A sequência do artigo está estruturada da seguinte forma: a seção 2 apresenta a metodologia utilizada para construção de regiões de flexibilidade abordando tanto os problemas de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) solucionados quanto o algoritmo utilizado; na seção 3 são apresentados o estudo de caso proposto e os resultados obtidos e, por fim, na seção 4 são apresentadas as conclusões.

## 2. METODOLOGIA

Diversas metodologias para determinação da flexibilidade em sistemas de potência são abordados na literatura. De modo geral, duas abordagens principais são utilizadas: metodologias baseadas em simulação de Monte Carlo e Fluxo de Potência Convencional, como em Reis (2020), Gonzalez et al. (2018), Riaz and Mancarella (2019), e Heleno et al. (2015) e metodologias baseadas em FPO, como em Lopez et al. (2021), Silva et al. (2018b), Silva et al. (2018a), Stanković et al. (2021) e Ageeva et al. (2019). Algumas características de cada uma das abordagens são destacadas a seguir:

- Metodologias Baseadas em Simulação de Monte Carlo e Fluxo de Potência Convencional:
  - Geração de inúmeros pontos de operação;
  - Sucessíveis soluções de fluxo e potência;
  - Método simples e possível de ser generalizado para várias topologias;

- Limitação inerente ao método: alto custo computacional devido à solução de inúmeros cenários.
- Metodologias Baseadas em Fluxo de Potência Ótimo:
  - Visa encontrar as bordas da região considerando restrições;
  - Mais adequada para redes médias e pequenas;
  - O tamanho e a complexidade computacional cresce com tamanho da rede e número de REDs.

Nesse trabalho, a metodologia baseada em FPO descrita em Silva et al. (2018a) foi empregada para construção de regiões de flexibilidade para o DSO e para o TSO.

A metodologia busca encontrar primeiramente os limites máximos e mínimos de potência ativa e reativa da região de flexibilidade e, posteriormente, é feita uma etapa de refinamento que visa encontrar novos pontos sobre o perímetro da região, moldando assim sua forma.

A dependência entre potência ativa e reativa e as restrições da rede têm impacto na quantidade de recursos flexíveis que podem ser ativados de modo influenciar nas possibilidades de mudanças do ponto de operação do sistema. Ao ignorar esses fatores, a região de flexibilidade no PCC seria a soma da flexibilidade individual de cada recurso flexível no ponto de operação programado. Considerando que os recursos flexíveis tenham um formato retangular resultaria, no PCC, em uma região de flexibilidade com um formato retangular maior, conforme representado na Figura 3 pelo retângulo cinza. Ao adicionar as restrições da rede, a região de flexibilidade também é limitada levando a um retângulo menor. Na etapa de refinamento todas as restrições da rede e a dependência entre potência ativa e reativa são consideradas para a obtenção do conjunto viável de pontos de operação dentro do retângulo azul. Isso é feito de modo determinar os valores de potência que compõem o perímetro da região de flexibilidade.

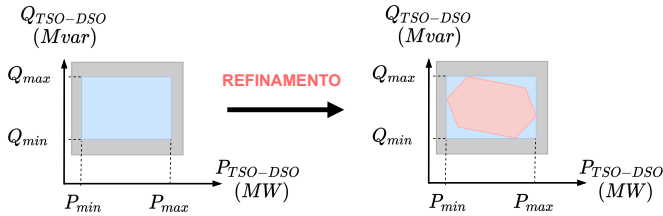


Figura 3. Ilustração conceitual da metodologia aplicada na construção de regiões de flexibilidade. Silva et al. (2018a)

### 2.1 Formulação do Problema de Otimização

Conforme destacado anteriormente, o processo de construção da região de flexibilidade inicia-se com a determinação de  $P_{min}$ ,  $P_{max}$ ,  $Q_{min}$  e  $Q_{max}$  no PCC. Para isso, quatro problemas de otimização devem ser resolvidos. Uma função objetivo com parâmetros variáveis que permite obter todo o perímetro da região de flexibilidade é utilizada de modo otimizar a potência ativa e reativa conforme (3).

$$\text{Min } \alpha \cdot P_{TSO \rightarrow DSO} + \beta \cdot Q_{TSO \rightarrow DSO} \quad (3)$$

Onde  $P_{TSO \rightarrow DSO}$  e  $Q_{TSO \rightarrow DSO}$  são, respectivamente, a potência ativa e reativa na interface TSO/DSO. A função

objetivo em (3) representa a inclinação de uma família de retas definida conforme mostrado em (4) de modo que para diferentes valores de  $\theta$  são obtidos diferentes pontos no perímetro da região de flexibilidade.

$$\tan \theta = -\frac{\alpha}{\beta} \quad (4)$$

No problema de otimização, as variáveis de estado que o caracterizam estão relacionadas à tensão em todas as barras e aos recursos flexíveis presentes no sistema que podem ser:

- Variação da geração ativa e reativa:  $\Delta P_i^G$  e  $\Delta Q_i^G$ ;
- Variação da carga ativa e reativa:  $\Delta P_i^L$  e  $\Delta Q_i^L$ ;
- Variação de compensadores de potência reativa:  $\Delta Q_i^{cond}$ .

Tap de transformadores e chaveamento de banco de capacitores também podem ser recursos flexíveis em um sistema, porém, nesse trabalho ambos foram considerados parâmetros fixos. Vale destacar que a mesma formulação de FPO é usada para os problemas referentes aos sistemas de transmissão e distribuição. Isso é possível pois o sistema de distribuição utilizado neste trabalho é equilibrado de modo permitir representá-lo como seu equivalente de sequência positiva. O problema de otimização está sujeito às restrições típicas de problemas de FPO conforme apresentado de (5) à (16).

$$(\Delta P_i^G + P_i^G) - (\Delta P_i^L + P_i^L) - P_i = 0 \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$(\Delta Q_i^G + Q_i^G) + (\Delta Q_i^{cond} + Q_i^{cond}) + V_i^2 \cdot b_{shi} - (\Delta Q_i^L + Q_i^L) - Q_i = 0 \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$(S_{ij}^b)^2 \leq (S_{ij,max}^b)^2 \quad \forall b \in B \quad (8)$$

$$(S_{ji}^b)^2 \leq (S_{ji,max}^b)^2 \quad \forall b \in B \quad (9)$$

$$\Delta P_{i,min}^G \leq \Delta P_i^G \leq \Delta P_{i,max}^G \quad \forall i \in N_G \quad (10)$$

$$\Delta Q_{i,min}^G \leq \Delta Q_i^G \leq \Delta Q_{i,max}^G \quad \forall i \in N_G \quad (11)$$

$$\Delta P_{i,min}^L \leq \Delta P_i^L \leq \Delta P_{i,max}^L \quad \forall i \in N_L \quad (12)$$

$$\Delta Q_{i,min}^L \leq \Delta Q_i^L \leq \Delta Q_{i,max}^L \quad \forall i \in N_L \quad (13)$$

$$\Delta Q_{i,min}^{cond} \leq \Delta Q_i^{cond} \leq \Delta Q_{i,max}^{cond} \quad \forall i \in N_C \quad (14)$$

$$P_i = \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} \quad \forall i, j \in N \quad (15)$$

$$Q_i = \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} \quad \forall i, j \in N \quad (16)$$

As equações (5) e (6) são restrições de balanço de potência ativa e reativa do sistema para cada barra  $i$  pertencente ao conjunto de barras  $N$  onde  $P_i^G, Q_i^G, P_i^L$  e  $Q_i^L$  são, respectivamente, a geração ativa, geração reativa, carga ativa e carga reativa presente na barra  $i$  no caso base. Os parâmetros  $Q_i^G$  e  $b_{shi}$  são, respectivamente, a potência reativa de compensadores síncronos, no caso base, e a susceptância de banco de capacitores conectados à barra  $i$ . As variáveis  $P_i$  e  $Q_i$  representam, respectivamente, a soma da potência ativa e reativa que flui nas linhas da barra  $i$  para outras barras  $j$  conectadas a  $i$  conforme representado em (15) e (16).

As inequações (7), (8), e (9) representam limitações físicas da rede. Em (7), são definidos os limites inferiores e superiores da tensão na barra  $i$  enquanto (8) e (9) impõem o limite de fluxo de potência aparente em cada linha  $b$  do sistema pertencente ao conjunto de linhas  $B$ . As variáveis,  $V_i$ ,  $S_{ij}$ , e  $S_{ji}$  representam, respectivamente, a tensão na barra  $i$ , o fluxo que vai da barra  $i$  para barra  $j$  e o fluxo que vai da barra  $j$  para a barra  $i$ .

De (10) à (14), temos a representação dos limites dos recursos flexíveis. As variáveis  $\Delta P_i^G$  e  $\Delta Q_i^G$  representam a flexibilidade de potência ativa e reativa relacionada ao gerador  $i$  pertencente ao conjunto de geradores  $N_G$  sendo  $N_G \subset N$ . Analogamente,  $\Delta P_i^L$  e  $\Delta Q_i^L$  representam a flexibilidade de carga ativa e reativa na barra  $i$  pertencente ao conjunto de cargas  $N_L$  sendo  $N_L \subset N$ . Já  $\Delta Q_i^{cond}$  é a flexibilidade relacionada aos compensadores síncronos ligados à barra  $i$  pertencente ao conjunto de compensadores síncronos  $N_C$  sendo  $N_C \subset N$ .

Importante destacar que o PCC do sistema de distribuição é a barra *swing* do sistema. Portanto,  $P_{TSO \rightarrow DSO}$  e  $Q_{TSO \rightarrow DSO}$  pode ser escrito conforme (17) e (18) onde a barra  $i$  é a barra de acoplamento entre os sistemas.

$$P_{TSO \rightarrow DSO} = \Delta P_i^G + P_i^G \quad (17)$$

$$Q_{TSO \rightarrow DSO} = \Delta Q_i^G + Q_i^G \quad (18)$$

Para o problema de otimização relacionado ao sistema de transmissão, o ponto de acoplamento comum é uma barra de carga. Portanto,  $P_{TSO \rightarrow DSO}$  e  $Q_{TSO \rightarrow DSO}$  são dados, respectivamente, por (19) e (20) onde  $i$  é referente à barra de acoplamento comum do sistema de transmissão.

$$P_{TSO \rightarrow DSO} = \Delta P_i^L + P_i^L \quad (19)$$

$$Q_{TSO \rightarrow DSO} = \Delta Q_i^L + Q_i^L \quad (20)$$

No presente trabalho, a montagem e solução dos problemas de otimização são feitas em linguagem *Python* através do pacote de otimização Gekko Beal et al. (2018) utilizando o Método de Pontos Interiores (MPI) como algoritmo de solução. A implementação realizada foi validada a partir da comparação entre seus resultados com resultados obtidos com o Programa de Fluxo de Potência Ótimo (FLUPOT), desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), que também utiliza o MPI.

## 2.2 Algoritmo para Construção da Região de Flexibilidade

O processo de construção da região de flexibilidade em um determinado barramento do sistema de potência considerado o PCC pode ser resumido através do fluxograma apresentado na Figura 4.

Observando o fluxograma temos que em **A** são resolvidos problemas de otimização para  $\theta = 0^\circ, 180^\circ, 90^\circ$  e  $-90^\circ$ :

- Para  $\theta = \pm 90$  temos  $\alpha = \mp 1$  e  $\beta = 0$ .  $P_{max}$  e  $P_{min}$  são calculados bem como a potência reativa correspondente.
- Para  $\theta = 0$  e  $\theta = 180$  temos  $\alpha = 0$  e  $\beta = \pm 1$ .  $Q_{min}$  e  $Q_{max}$  são calculados bem como a potência ativa correspondente.

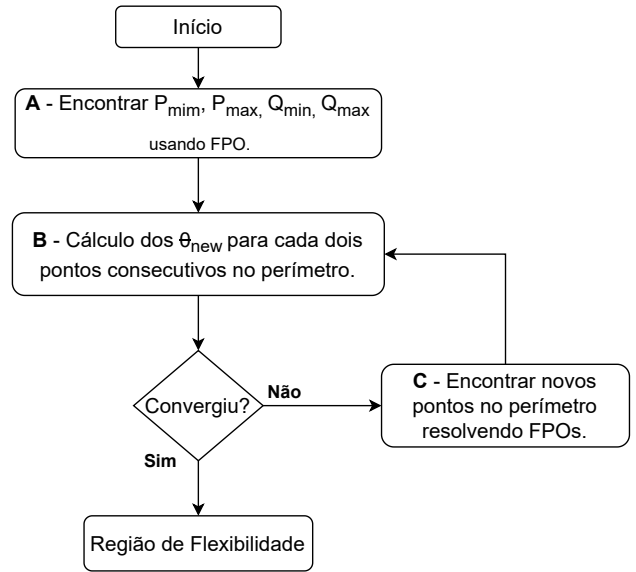


Figura 4. Algoritmo para construção da região de flexibilidade. Silva et al. (2018a)

Na etapa **B**, são calculados os ângulos  $\theta_{new}$  de todas as retas que ligam dois pontos consecutivos no perímetro da região de flexibilidade a partir de (21) e, na sequência, os critérios definidos em (22) e (23) são avaliados.

$$\theta_{new} = \tan^{-1} \left( \frac{Q_{i+1} - Q_i}{P_{i+1} - P_i} \right) \quad (21)$$

$$|\theta_{new} - \theta_i| > \theta_{tol} \quad (22)$$

$$|\theta_{new} - \theta_{i+1}| > \theta_{tol} \quad (23)$$

As variáveis  $\theta_i$  e  $\theta_{i+1}$  representam os ângulos que deram origem a dois pontos consecutivos no perímetro da região de flexibilidade que definem a reta de inclinação  $\theta_{new}$  que os conectam. Os pontos  $(P_i, Q_i)$  e  $(P_{i+1}, Q_{i+1})$  são respectivamente, o par ordenado de potência ativa e reativa dos dois pontos sobre o perímetro calculados a partir de  $\theta_i$  e  $\theta_{i+1}$ . A variável  $\theta_{tol}$  é o ângulo de tolerância que é critério de parada do algoritmo. A Figura 5 ilustra o passo de obtenção de  $\theta_{new}$  entre dois pontos consecutivos.

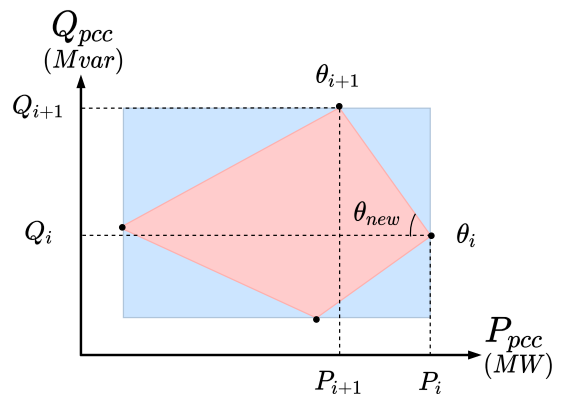


Figura 5. Esquema de cálculo de  $\theta_{new}$ .

Para todo  $\theta_{new}$  que respeite os critérios anteriormente definidos, um novo par  $\alpha$  e  $\beta$  é calculado e um novo problema de otimização será resolvido para os novos valores dos

parâmetros em **C**. Observando (4) e (21), temos que  $\alpha$  e  $\beta$  são obtidos conforme (24) e (25).

$$\alpha = -(Q_{i+1} - Q_i) \quad (24)$$

$$\beta = P_{i+1} - P_i \quad (25)$$

Uma vez que não exista  $\theta_{new}$  que atenda (22) e (23) simultaneamente o processo iterativo é encerrado e a região de flexibilidade é obtida.

### 3. RESULTADOS

Nessa seção, a metodologia para construção de regiões de flexibilidade e os conceitos dos coeficientes  $D_{flex}$  e  $T_{flex}$  são utilizados de modo permitir realizar uma análise quantitativa da flexibilidade disponível na interface TSO/DSO sob o ponto de vista de ambos sistemas. Para realização das simulações, utilizou-se o sistema de transmissão de 33 barras descrito em Alves (2007) e o sistema de distribuição de 38 barras apresentado em Singh et al. (2007).

O sistema de transmissão utilizado tem sua topologia mostrada na Figura 6. Os limites inferiores e superiores de tensão, em p.u., são iguais a 0.95 e 1.1. No PCC, a variação da carga ativa e reativa,  $\Delta P_i^L$  e  $\Delta Q_i^L$ , tem limites abertos. Os limites de geração ativa e reativa de cada gerador são apresentados na Tabela 1.

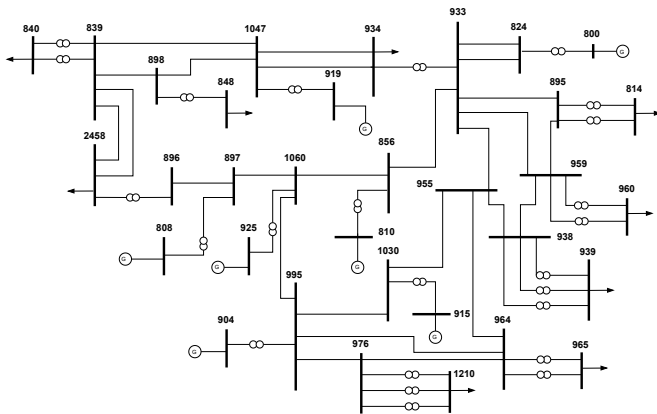


Figura 6. Sistema 33 Barras. Alves (2007)

Tabela 1. Dados de geração sistema 33 barras.

N <sup>o</sup>	Geração Min (MW)	Geração Max (MW)	Geração Min (Mvar)	Geração Max (Mvar)
800	0	1230	-800	800
808	0	1300	-600	600
810	0	1250	-400	532
904	0	1500	-475	475
915	0	820	-516	465
919	0	710	-148	220
925	0	1000	-440	420

A topologia do sistema de distribuição é apresentada na Figura 7. Os limites inferiores e superiores de tensão, em p.u., são iguais a 0.95 e 1.1. Os recursos flexíveis presentes no sistema são cinco geradores fotovoltaicos conectados em diferentes barras do sistema. Estes geradores são modelados como uma injeção de potência ativa com capacidade de regulação tensão. As barras de conexão e as informações

de geração ativa e reativa de cada usina são apresentadas na Tabela 2. Os parâmetros  $G_n$  representam o valor da potência ativa gerada em um cenário de penetração fotovoltaico  $n$  específico.

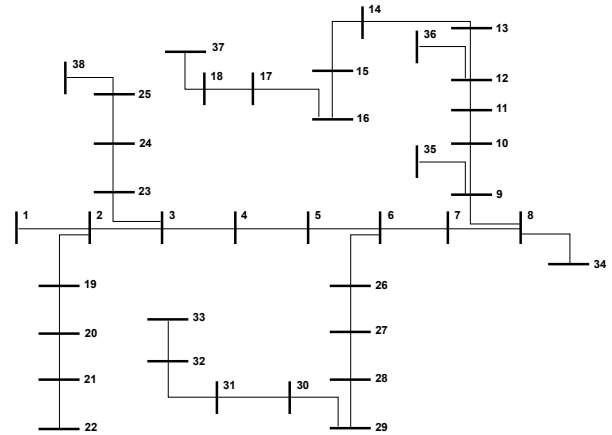


Figura 7. Sistema 38 Barras. Singh et al. (2007)

Tabela 2. Dados de geração sistema 38 barras.

N <sup>o</sup>	Geração Min (MW)	Geração Max (MW)	Geração Min (Mvar)	Geração Max (Mvar)
1	-9999	9999	-9999	9999
34	0	$G_n$	-180	180
35	0	$G_n$	-90	90
36	0	$G_n$	-30	30
37	0	$G_n$	-60	60
38	0	$G_n$	-30	30

O estudo de caso proposto consiste em obter os índices  $D_{flex}$  e  $T_{flex}$  considerando ambos sistemas descritos nessa seção. Os índices são obtidos considerando a conexão de dois alimentadores em cada barra do sistema de transmissão, uma por vez, considerando diferentes cenários de geração fotovoltaica na rede de distribuição de modo avaliar as melhores possibilidades para conexão entre ambos sistemas com base na capacidade de troca de geração ativa e reativa entre eles. Os níveis de penetração de geração fotovoltaica em relação à carga do total do sistema são iguais a 50%, 40%, 30%, 20%, 10% e 0%. Os valores para cada cenário são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Cenários de geração fotovoltaica.

N <sup>o</sup>	$C_0$ (MW)	$C_1$ (MW)	$C_2$ (MW)	$C_3$ (MW)	$C_4$ (MW)	$C_5$ (MW)
34	88.75	71.00	53.25	35.50	17.75	0.00
35	44.4	35.52	26.64	17.76	8.88	0.00
36	14.80	11.84	8.88	5.92	2.96	0.00
37	29.59	23.67	17.75	11.84	5.92	0.00
38	14.40	11.52	8.64	5.76	2.88	0.00

Como resultados das simulações são obtidos gráficos da região para ambos os sistemas em cada cenário e os respectivos valores dos coeficientes de flexibilidade. A Tabela 4 apresenta os valores dos coeficientes calculados em cada cenário de geração e a Figura 8 apresenta as regiões de flexibilidade para o cenário  $C_0$ .

Os coeficientes fornecem informações relativas à quantidade de flexibilidade que pode ser utilizada sob o ponto

Tabela 4. Coeficientes  $D_{flex}$  e  $T_{flex}$  calculados.

N°	$C_0$ (%)		$C_1$ (%)		$C_2$ (%)		$C_3$ (%)		$C_4$ (%)		$C_5$ (%)	
	$D_{flex}$	$T_{flex}$	$D_{flex}$	$T_{flex}$	$D_{flex}$	$T_{flex}$	$D_{flex}$	$T_{flex}$	$D_{flex}$	$T_{flex}$	$D_{flex}$	$T_{flex}$
814	99,99	6,26	100,00	5,12	100,00	3,43	100,00	2,34	100,00	1,07	100,00	0,05
840	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
848	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
934	96,56	6,59	96,08	5,36	94,88	3,55	94,98	2,42	97,68	1,13	100,00	0,05
939	86,92	3,84	85,63	3,09	87,74	2,12	88,58	1,46	93,86	0,71	100,00	0,03
960	100,00	5,76	100,00	4,71	100,00	3,16	100,00	2,15	100,00	0,98	100,00	0,04
965	60,85	3,92	60,00	3,16	62,67	2,21	60,91	1,47	62,00	0,68	81,86	0,04
1210	100,00	4,30	100,00	3,52	100,00	2,36	100,00	1,61	100,00	0,73	100,00	0,03
2458	65,77	4,74	59,23	3,49	50,31	1,99	38,28	1,03	19,06	0,23	0,00	0,00

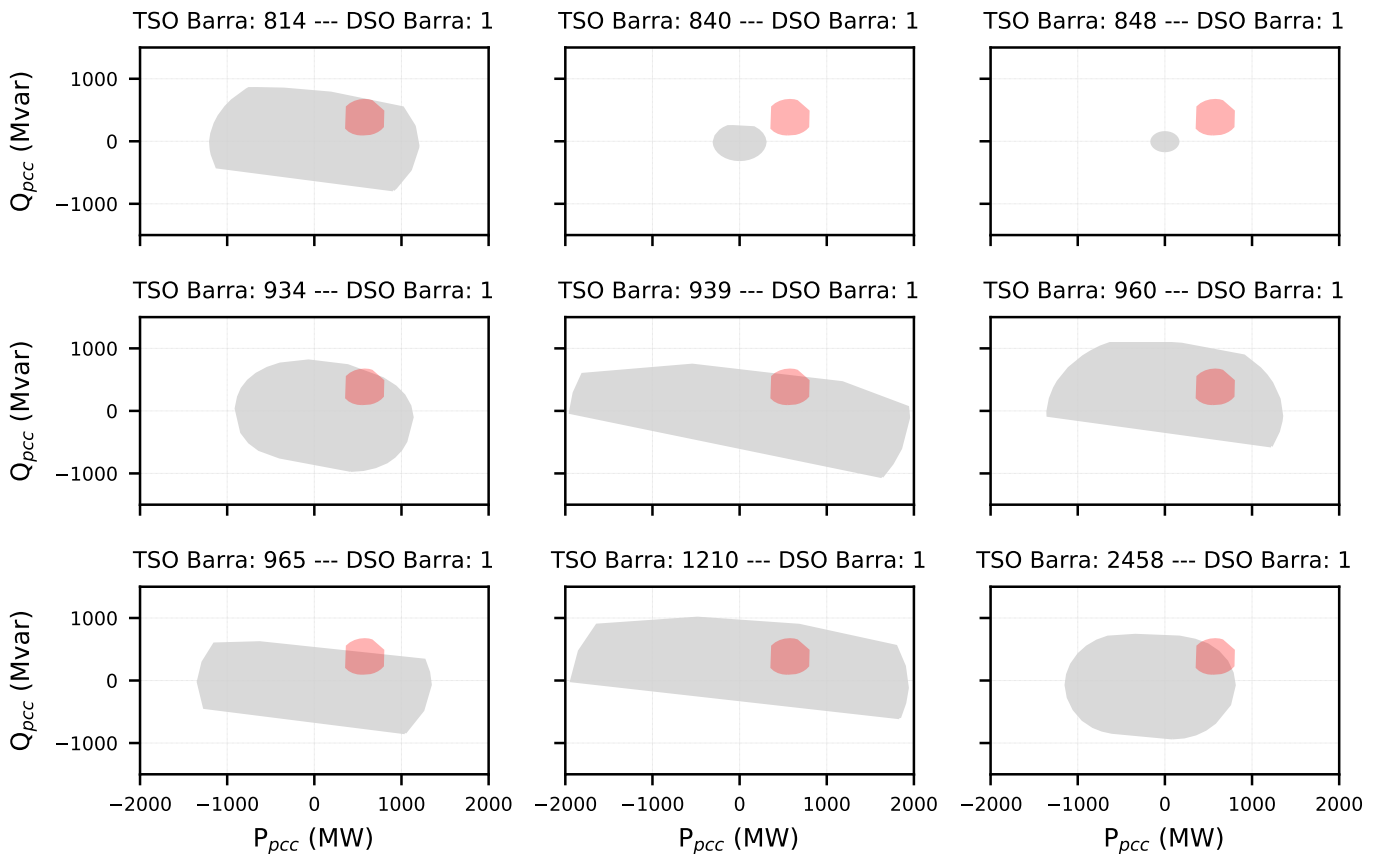


Figura 8. Região de flexibilidade - Cenário 100%.

de vista de ambos operadores. Os gráficos fornecem informação visual da região em que os sistemas podem operar respeitando os limites de ambas as redes simultaneamente. Nos gráficos, as regiões em cinza e em vermelho referem-se, respectivamente, aos sistemas de transmissão e distribuição.

Observando os coeficientes de flexibilidade e os gráficos apresentados, é possível notar que se a região de flexibilidade da distribuição estiver totalmente contida pela região da transmissão o coeficiente  $D_{flex}$  é igual a 100%. Além disso, se  $D_{flex}$  e  $T_{flex}$  são iguais a zero, então não há nenhuma interseção entre as áreas da região de flexibilidade de cada sistema. Quando não existe interseção entre ambas regiões significa não haver possibilidade de conexão dos alimentadores de distribuição ao ponto de

acoplamento comum da transmissão sem que haja violação das restrições em pelo menos um dos sistemas.

A Figura 9 apresenta as regiões de flexibilidade para cada cenário de penetração de geração para conexão dos alimentadores de distribuição à barra 2458 do sistema de transmissão. Ao observar os gráficos, fica evidente a redução da região de flexibilidade do sistema de distribuição à medida que o nível de penetração fotovoltaica também reduz. Além disso, como a região de flexibilidade para uma mesma barra do sistema de transmissão não se altera, pois independe do nível de penetração fotovoltaica na distribuição, é possível concluir que se a redução dessa penetração ocasionar uma redução da área de interseção entre ambas regiões ocorrerá também uma redução do  $T_{flex}$ .

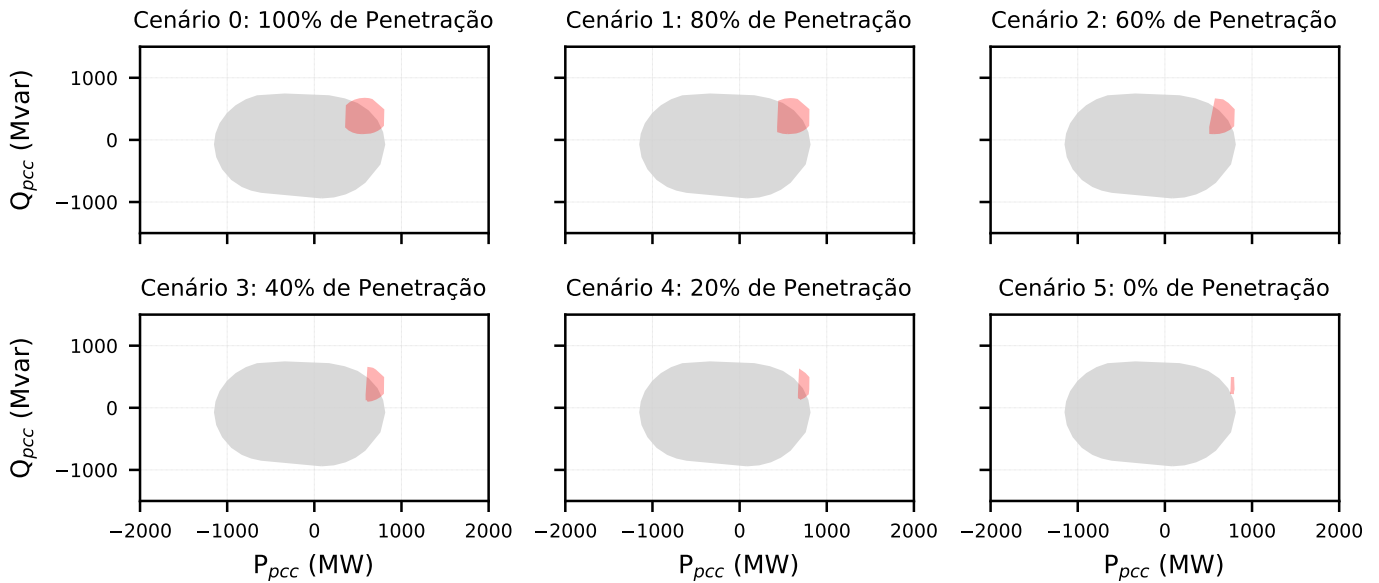


Figura 9. Região de flexibilidade - Barra 2458.

Do ponto de vistas dos operadores de ambos sistemas, algumas interpretações podem ser realizadas com relação aos coeficientes de flexibilidade. Observando as Figuras 10 e 11, pode-se ilustrar as seguintes conclusões:

- Do ponto de vista do DSO:
  - Elevado valor de  $D_{flex}$  revela que o sistema de distribuição pode operar em condições de baixa restrição assumindo uma vasta gama de valores na interface TSO/DSO;
  - Menores valores de  $D_{flex}$  significam que o sistema de distribuição opera sobre condições mais restritas visto que, a gama de valores de potência que podem ser fornecidos na interface TSO/DSO é pequena. Operando em condições mais restritas, o custo de operação do sistema pode se tornar elevado.
- Do ponto de vista do TSO:
  - Elevado valor de  $T_{flex}$  indica que as operações do DSO podem afetar fortemente operação do TSO. Em outras palavras, significa que o montante da flexibilidade proveniente da distribuição cobre uma grande gama da região de flexibilidade logo o operador da transmissão pode explorar melhor a flexibilidade fornecida pela distribuição;
  - Baixos valores de  $D_{flex}$  significa que a interseção entre as regiões cobre uma pequena área da região de flexibilidade da transmissão. Logo, o sistema de transmissão se beneficia pouco da flexibilidade fornecida pela distribuição;
  - No estudo de caso proposto temos que em ambos gráficos presentes nas Figuras 10 e 11 o  $T_{flex}$  apresenta baixo valor visto que a região de flexibilidade do sistema de transmissão é muito maior que a área de interseção entre as regiões. Ambos os casos não trariam grandes vantagens ao operador da transmissão que deverá operar numa pequena faixa de valores permitidos em comparação com o total em sua região. Porém, comparando ambas barras, vemos que a flexibilidade da distribuição

pode impactar mais na operação da barra 934 do que na barra 965.

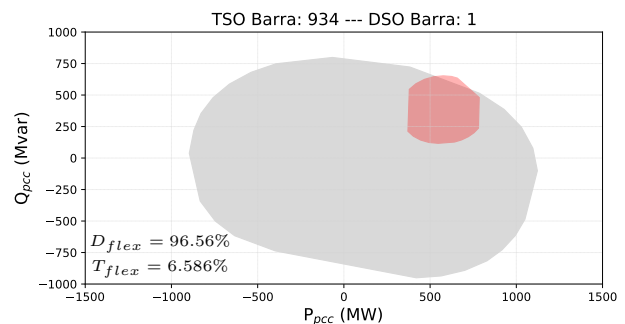


Figura 10. Região de flexibilidade - C0 - Barra 934.

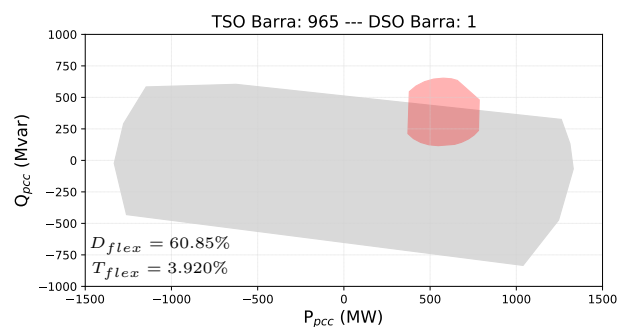


Figura 11. Região de flexibilidade - C0 - Barra 965.

#### 4. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, o tema de flexibilidade na interface foi abordado detalhando a metodologia de construção da região de flexibilidade e ampliando para aplicação em sistemas de transmissão, além de discutir o conceito dos coeficientes de flexibilidade.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que os coeficientes de flexibilidade possibilitam quantificar as possibilidades operativas na interface TSO/DSO. Os conceitos e metodologia apresentadas podem fornecer uma aplicação na área de planejamento fornecendo informações para tomada de decisão tanto no planejamento de novos alimentadores e sua conexão ao sistema de transmissão ou até mesmo na escolha entre alimentadores já existentes para conexão REDs de modo fornecer uma maior flexibilidade a ser aproveitada pelo sistema de transmissão no atendimento de serviços ancilares.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido dentro do projeto “GERENCIAMENTO DE RECURSOS ENERGÉTICOS DISTRIBUÍDOS PARA PRESTAÇÃO DE NOVOS SERVIÇOS À REDE ELÉTRICA” PD-00553-0064/2019 no âmbito do programa de P&D do sistema elétrico regulado pela ANEEL.

#### REFERÊNCIAS

- Ageeva, L., Majidi, M., and Pozo, D. (2019). Analysis of feasibility region of active distribution networks. In *2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, 1–5. IEEE.
- Alves, W.F. (2007). Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência. *Niterói, Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense*.
- Beal, L., Hill, D., Martin, R., and Hedengren, J. (2018). Gekko optimization suite. *Processes*, 6(8), 106. doi: 10.3390/pr6080106.
- Gonzalez, D.M., Hachenberger, J., Hinker, J., Rewald, F., Häger, U., Rehtanz, C., and Myrzik, J. (2018). Determination of the time-dependent flexibility of active distribution networks to control their tso-dso interconnection power flow. In *2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 1–8. IEEE.
- Heleno, M., Soares, R., Sumaili, J., Bessa, R.J., Seca, L., and Matos, M.A. (2015). Estimation of the flexibility range in the transmission-distribution boundary. In *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, 1–6. IEEE.
- Lopez, L., Gonzalez-Castellanos, A., Pozo, D., Roozbehani, M., and Dahleh, M. (2021). Quickflex: a fast algorithm for flexible region construction for the tso-dso coordination. In *2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 1–6. IEEE.
- Reis, D.M.R.d. (2020). *Determinação e valorização da região de flexibilidade na Interface TSO-DSO*. Ph.D. thesis, Universidade Nova de Lisboa.
- Riaz, S. and Mancarella, P. (2019). On feasibility and flexibility operating regions of virtual power plants and tso/dso interfaces. In *2019 IEEE Milan PowerTech*, 1–6. IEEE.
- Silva, J., Sumaili, J., Bessa, R.J., Seca, L., Matos, M., and Miranda, V. (2018a). The challenges of estimating the impact of distributed energy resources flexibility on the tso/dso boundary node operating points. *Computers & Operations Research*, 96, 294–304.
- Silva, J., Sumaili, J., Bessa, R.J., Seca, L., Matos, M.A., Miranda, V., Caujolle, M., Goncer, B., and Sebastian-Viana, M. (2018b). Estimating the active and reactive power flexibility area at the tso-dso interface. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(5), 4741–4750.
- Singh, D., Misra, R.K., and Singh, D. (2007). Effect of load models in distributed generation planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 2204–2212.
- Stanković, S. (2021). *Voltage Support of Transmission Grids Using Resources Located in the Underlying Lower Voltage Networks: Unlocking the Potential of Distributed Generation Reactive Power Capabilities*. Ph.D. thesis, KTH Royal Institute of Technology.
- Stanković, S., Söder, L., Hagemann, Z., and Rehtanz, C. (2021). Reactive power support adequacy at the dso/tso interface. *Electric Power Systems Research*, 190, 106661.