



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO VI

GRUPO DE ESTUDO DE COMERCIALIZAÇÃO, ECONOMIA E REGULAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - GCR

**EXPERIÊNCIA PRÁTICA NA APLICAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO
DE MONTANTE DE USO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO A SER CONTRATADO POR
DISTRIBUIDORA DE GRANDE PORTE CONSIDERANDO INCERTEZAS**

R. S. Ferreira L. C. da Costa Jr. M. R. M. Carvalho R. C. Perez L. M. Thomé F. R. Zanfelice
PSR CPFL Energia

RESUMO

Este artigo tem como objetivo a análise da contratação do uso do sistema de transmissão por distribuidoras de grande porte, sistema malhado e múltiplos pontos de conexão com a Rede Básica. A experiência prática dos autores com um processo real de determinação do Montante de Uso do Sistema de Transmissão é apresentada, discutindo-se os principais aspectos da metodologia empregada e as conclusões obtidas. Aspectos associados à gestão de risco na contratação do MUST são abordados em profundidade, discutindo-se o impacto da consideração de diferentes atributos, critérios e premissas sobre os montantes a serem contratados e sobre os custos da contratação.

PALAVRAS-CHAVE

Contratação do uso do sistema de transmissão, gestão de risco, tratamento de incertezas no problema de fluxo de potência

1.0 - INTRODUÇÃO

Um dos pilares para o correto planejamento da expansão e da operação do sistema de transmissão é o conhecimento dos montantes máximos de potência que serão demandados nos pontos de conexão das distribuidoras com a Rede Básica. De forma a fornecer insumos para as funções de planejamento da expansão e da operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), as distribuidoras devem informar anualmente ao ONS valores de Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST) para um horizonte de quatro anos. Os MUST das distribuidoras, informados por ponto de conexão, deverão ser os montantes máximos anuais de demanda de potência em cada horário de contratação. Os valores verificados das demandas máximas em cada ponto de conexão da distribuidora são comparados aos valores contratados, e a regulação prevê penalidades caso a diferença exceda uma determinada banda de tolerância. Recentemente, as disposições da Resolução Normativa (RN) nº 399, de 13 de Abril de 2010 [1], tornaram mais rígidas as condições de contratação de MUST, obrigando as distribuidoras a decisões mais acuradas, sob pena da imposição de penalidades por subcontratação ou sobrecontratação¹.

A determinação dos valores de MUST a serem contratados é, no entanto, tarefa de natureza complexa. A projeção dos montantes a serem contratados pela maioria das distribuidoras brasileiras é afetada por incertezas quanto à demanda de potência de sua área de concessão, ao perfil de produção dos geradores conectados à sua rede de distribuição e à topologia e disponibilidade de instalações da rede elétrica. Para um grupo específico de concessionárias, há fatores adicionais que devem ser considerados ao se realizar a contratação do MUST. Para distribuidoras de grande porte, com rede de distribuição em alta tensão malhada, com múltiplos pontos de conexão

¹ A referida resolução introduz outros mecanismos de interesse para a contratação do uso do sistema de transmissão, como regras para a atualização anual dos MUST contratados. Estes outros mecanismos fogem, entretanto, ao escopo deste texto.

à Rede Básica e cujas características topológicas permitem a importação de potência de áreas elétricas distintas do sistema externo, a contratação do MUST passa a ser influenciada pelas condições operativas do SIN. De modo a gerir corretamente os riscos associados à contratação do MUST, estas empresas devem implementar um processo que permita identificar e avaliar as incertezas associadas a todos estes fatores e tomar decisões que impliquem na mínima exposição a riscos, considerando a contratação para todos os seus pontos de conexão².

Este artigo tem como objeto de análise a contratação do uso de transmissão por distribuidoras com as características mencionadas no parágrafo anterior. A experiência prática dos autores com o processo de determinação do MUST a ser contratado por uma distribuidora de grande porte e fortemente influenciada pelas condições operativas do SIN é apresentada, discutindo-se os aspectos principais da metodologia empregada e as principais conclusões obtidas. Aspectos associados à gestão de risco na contratação do MUST são abordados em particular profundidade, discutindo-se o impacto da consideração de diferentes atributos e critérios de contratação sobre os montantes a serem contratados e sobre os custos totais verificados. As conclusões são apresentadas com base em resultados obtidos para um subconjunto de quatro pontos de conexão, que preservam muitas das características do sistema de distribuição original sob estudo. Alguns dos dados referentes a estes pontos de conexão são omitidos ou ligeiramente modificados, com o objetivo de preservar a confidencialidade das informações da distribuidora.

O restante deste documento apresenta a metodologia, os resultados e as conclusões do trabalho.

2.0 - BREVE DESCRIÇÃO DO SISTEMA CONSIDERADO

O sistema considerado para as análises deste documento constitui-se de um subconjunto de quatro pontos de conexão de uma distribuidora de grande porte, sistema malhado e cujos fluxos de potência são fortemente influenciados pelas condições operativas do SIN. A Figura 1 mostra, de maneira esquemática, o sistema sob estudo. A cor azul identifica pontos de conexão e instalações do sistema de distribuição da *rede interna* da distribuidora. Os pontos de conexão estudados são identificados pelos algarismos 1 a 4.

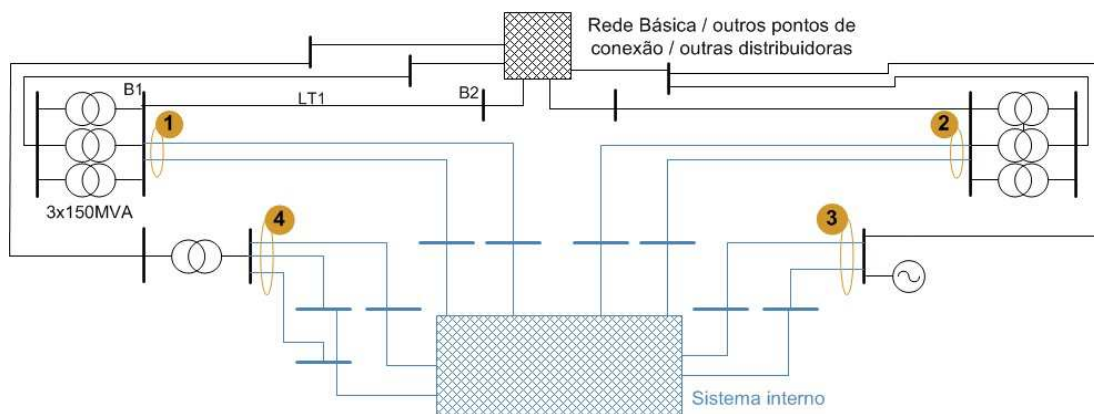


FIGURA 1 – Diagrama simplificado do sistema, com destaque para pontos de conexão sob estudo

O sistema de distribuição marcado em azul será chamado de *sistema interno* no restante deste documento. A representação, na Figura 1, do gerador na vizinhança direta do Ponto 3 justifica-se pela sua influência direta sobre os montantes contratados neste ponto – o que no entanto não significa que este é o único gerador na região de influência dos pontos de conexão. Há, também, elevada penetração de geração distribuída no sistema interno. A contratação do MUST foi feita, do estudo original, para o horizonte 2011-2014. Por simplicidade e concisão, os resultados discutidos neste documento se referirão apenas ao ano de 2011.

3.0 - METODOLOGIA E RESULTADOS

A metodologia empregada para a determinação dos valores de MUST a serem contratados baseia-se na constatação de que, devido às incertezas apontadas anteriormente, os valores de máxima demanda de potência nos pontos de conexão que ocorrerão no horizonte de contratação podem ser entendidos como variáveis estocásticas [3]. Os encargos totais associados à contratação do uso do sistema de transmissão são compostos pelos valores nominais de contratação e pelas penalidades incorridas. Enquanto a parcela dos valores nominais de contratação é essencialmente determinística e gerível pela distribuidora, a parcela das penalidades por sub ou sobrecontratação tem comportamento essencialmente estocástico, pois depende dos fluxos verificados durante a operação do sistema. Assim, o problema da contratação do MUST pode ser entendido como um problema de gestão de riscos, em que se deseja determinar o valor a ser contratado (parcela determinística dos custos de contratação) de forma a reduzir ou mesmo mitigar a exposição da distribuidora a elevados custos de penalidades.

² Uma discussão sobre a isonomia do esquema de penalização para distribuidoras com sistemas de características estruturais encontra-se em [2].

Os passos de um processo de determinação dos valores de MUST a serem contratados são listados abaixo e abordados, separadamente, nos itens 3.1 e 3.2 desta seção:

- i. Caracterização de cenários de fluxo de potência ativa que serão verificados em cada um dos pontos de conexão da distribuidora à Rede Básica no horizonte de contratação do MUST, através da determinação do montante de potência correspondente a cada cenário e de sua probabilidade de ocorrência;
- ii. Simulação dos encargos associados à contratação do MUST relacionados a estes cenários, para diferentes valores de MUST a serem informados ao ONS e nos termos da RN 399/2010, e decisão por um valor de MUST a ser contratado, por ponto de conexão, de modo a atender a um critério de risco determinado pela distribuidora.

3.1 Caracterização de cenários de fluxo de potência ativa nos pontos de conexão

O comportamento dos montantes máximo de potência importados por cada ponto de conexão com a Rede Básica é fortemente influenciado pelas incertezas na demanda de potência da distribuidora, à geração conectada à sua rede interna e à topologia e disponibilidade de equipamentos de sua rede elétrica. Deste modo, a obtenção dos cenários de fluxo deve basear-se em simulações que capturem cada uma destas incertezas. Além disto, para concessionárias fortemente afetadas pelas condições operativas da rede externa, incertezas hidrológicas e de topologia e disponibilidade de equipamentos da Rede Básica, que afetam a operação do SIN e consequentemente os fluxos de potência nos pontos de conexão, devem ser consideradas durante a execução das simulações.

Para esta tarefa foi utilizado o modelo de despacho hidrotérmico estocástico com restrições de transmissão SDDP, desenvolvido pela PSR. Desta forma, a metodologia empregada para a obtenção dos cenários de fluxo de potência baseia-se em simulações da operação eletro-energética do SIN, em que se representa em detalhes não apenas todos os circuitos da Rede Básica e o conjunto de todos os geradores despachados de forma centralizada pelo ONS, mas também a rede de distribuição da empresa sob estudo e os geradores a ela conectados. Determina-se inicialmente uma política operativa ótima do SIN, sob consideração de incertezas hidrológicas e com representação individualizada de todos os geradores de interesse, e empregando inicialmente um modelo de transportes simplificado para a representação da rede de transmissão. De posse das diretrizes desta política operativa, realiza-se simulações da operação do SIN no horizonte de análise, com a representação detalhada da rede de transmissão e da rede de distribuição (até no nível de distribuição em alta tensão) da distribuidora de interesse, através do modelo de fluxo de potência linearizado. Durante as simulações, modela-se explicitamente incertezas associadas a:

- i. Cenários de geração distribuída conectada à rede da concessionária: cenários de geração foram construídos com base em históricos disponíveis, comportamento sazonal por tipo de planta e informações de indisponibilidade forçada. As plantas são modeladas como injeções fixas (ao contrário das usinas despachadas de forma centralizada, cuja injeção é determinada pelo modelo de otimização);
- ii. Cenários de demanda da distribuidora: projeções mensais de carga de energia, por patamar, são consideradas. Cenários-base de demanda de potência por barra são obtidos pela desagregação desta carga de energia, tomando como base perfis típicos de demanda por barra fornecidos pela distribuidora. A variabilidade da demanda é capturada pelo sorteio de fatores multiplicativos³ a serem aplicados sobre o cenário-base. Os fatores são sorteados de uma distribuição uniforme (análises futuras deverão utilizar distribuição normal) cujos parâmetros são informados pela distribuidora;
- iii. Topologia e disponibilidade de instalações do sistema de distribuição em alta tensão: além da indisponibilidade forçada das instalações, modela-se também manobras operativas condicionadas, realizadas quando se verifica uma condição operativa específica (ex: se sobrecarga em X, então manobra Y);
- iv. Incertezas na operação do SIN: incertezas hidrológicas e disponibilidade da rede de transmissão.

As simulações são executadas em etapas mensais, sendo representados cinco patamares de carga, de forma a incluir as combinações possíveis entre os patamares de carga pesada, média e leve, e os postos de contratação de ponta e fora de ponta. Merece destaque o grande volume de dados necessários para a execução das simulações (com a representação explícita de mais de 800 geradores, 5200 barras e 7600 circuitos), e o grande volume de dados gerados nas simulações. Os cenários de fluxo gerados se referem a uma combinação de 800 cenários de eventos⁴, 48 etapas mensais e 5 patamares de carga, totalizando a análise de 192.000 estados do sistema.

3.1.1. Resultados para sistema considerado

³ A rede da distribuidora é segmentada em macro-regiões, e se assume correlação unitária entre as demandas de cada uma das barras de uma macro-região, e correlação nula entre macro-regiões. Estuda-se atualmente outras formas de representação da dependência espacial da demanda.

⁴ Os cenários de eventos referem-se a combinações de cenários de geração e demanda da distribuidora, condições hidrológicas (e consequentemente cenários de geração da rede externa) e topologia e disponibilidade de equipamentos da rede.

Neste item, apresenta-se alguns dos resultados obtidos para o conjunto de quatro pontos de conexão da Figura 1. Para a simulação dos encargos totais a serem contratados, são relevantes os máximos fluxos de potência nos pontos de conexão em cada etapa mensal (uma vez que as penalidades por subcontratação do MUST são mensais) e para cada uma das sequências sintéticas de eventos simuladas. Um modo possível de apresentar os resultados obtidos para os pontos de conexão seria através da construção de gráficos com funções de distribuição de probabilidade obtidas para cada mês do ano de 2011. Ainda que fosse escolhido somente um ponto de conexão e apenas um posto de contratação, isto implicaria na construção de 12 gráficos. De forma a compatibilizar a apresentação de resultados com os requisitos de espaço deste documento, opta-se por apresentar, na Figura 2, apenas as funções de distribuição de probabilidade dos máximos fluxos anuais para cada um dos pontos de conexão, para o período de ponta e para o ano de 2011. Os coeficientes de variação obtidos para os máximos fluxos anuais nos pontos de conexão são de 4,8%, 14,7%, 4,2% e 12,5%, respectivamente para os Pontos 1, 2, 3 e 4. Uma análise rápida, baseada no fato de que os coeficientes de variação obtidos para os Ponto 2 (14,7%) e 4 (12,5%) são superiores à banda de tolerância estabelecida pela RN 399/2010 para a contratação (10%) indica que não haverá valor de contratação do MUST para o qual a probabilidade de penalização seja nula, para estes pontos.

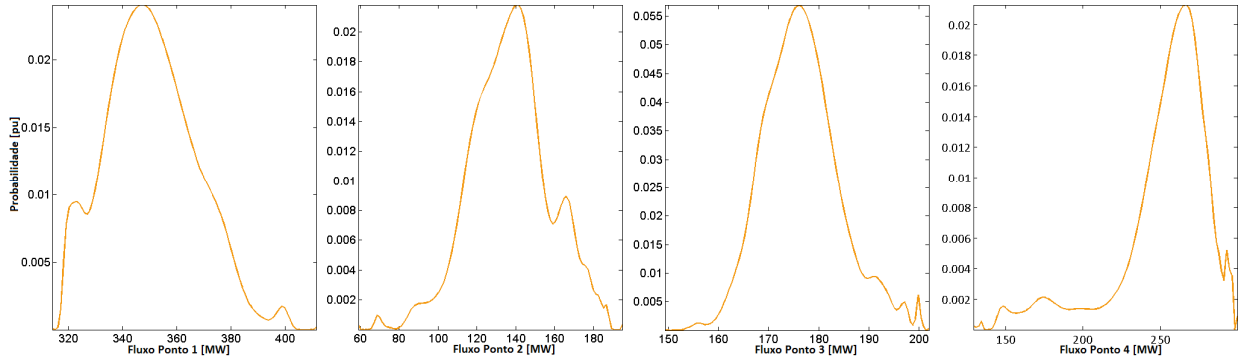


FIGURA 2 – Distribuição de probabilidade de máximos fluxos anuais dos pontos de conexão (per.: ponta; 2011)

Deve-se discutir se o número de cenários de eventos considerado (800) permite determinar uma contratação estatisticamente robusta. Reconhecendo que a metodologia aqui discutida constrói-se sobre o método de simulação Monte Carlo, e determinando como índice de interesse da simulação o valor de MUST a ser contratado, pode-se avaliar a convergência do processo através da evolução do coeficiente de variação deste índice [4] à medida que se aumenta o tamanho da amostra considerada⁵. As simulações indicaram que, para a maioria dos pontos considerados no estudo original, obtêm-se usualmente coeficientes de variação da ordem de 10^{-4} ou 10^{-3} , considerando 800 cenários de eventos. Tendo discutido a avaliação de convergência de um ponto de vista formal, apresenta-se resultados ilustrativos da evolução do comportamento das variáveis com o aumento do número de cenários considerados. A Figura 3 apresenta, para o Ponto 1: (a) a evolução do perfil da função distribuição de probabilidade dos máximos fluxos anuais no período de ponta, em 2011; e (b) a evolução do valor do MUST a ser contratado (considerando contratação individualizada e critério de minimização do valor esperado da soma dos custos nominais de contratação e penalidades), à medida que aumenta o tamanho da amostra.

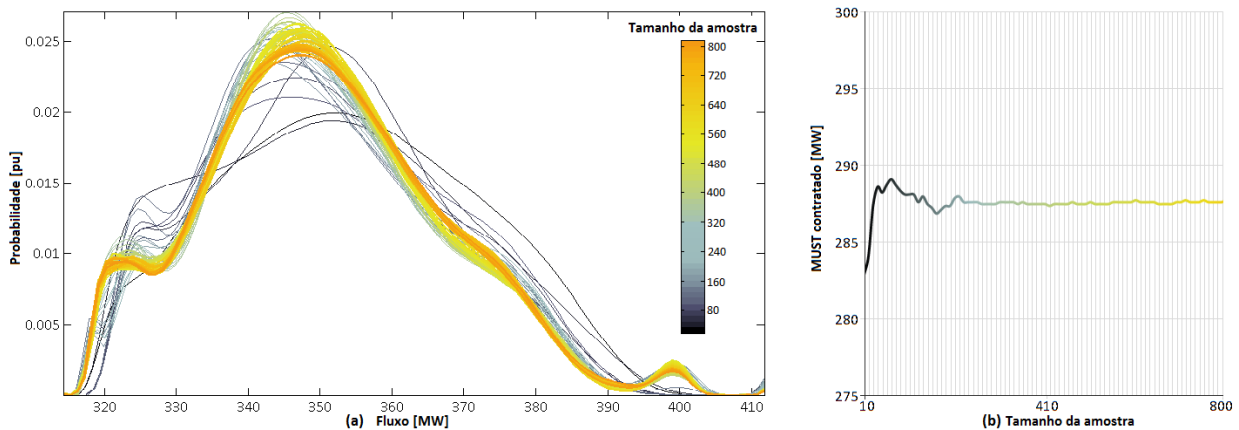


FIGURA 3 – Evolução do perfil da função distribuição de probabilidade dos máximos fluxos anuais (a) e do valor do MUST a ser contratado (b), em função do tamanho da amostra. Ponto 1, per.: ponta; ano: 2011

3.2 Simulação de encargos e determinação dos valores de MUST a serem contratados

⁵ Sendo a contratação do MUST a motivação das simulações, é natural a escolha da decisão da contratação do MUST como o índice do processo.

De posse dos cenários de fluxo de potência nos pontos de conexão, executa-se simulações dos encargos totais associados à contratação do MUST, sob modelagem das disposições da RN 399/2010, para diferentes montantes de potência ativa a serem contratados. Os valores dos montantes de potência ativa a serem contratados são as variáveis de decisão de um problema de otimização estocástica em que é incorporada toda a simulação financeira dos encargos associados à contratação. A função objetivo deste problema de minimização é afetada pela consideração de diferentes atributos e critérios de contratação pela distribuidora. A seguir, discute-se os efeitos destes diferentes critérios e atributos sobre os valores contratados, com enfoque na gestão de riscos.

3.2.1. Minimização dos custos totais de contratação vs. minimização de penalidades

Conforme discutido anteriormente, os custos totais associados à contratação do MUST são compostos por uma parcela essencialmente determinística (valores nominais de contratação) e uma parcela essencialmente estocástica (penalidades). Nesta seção, investiga-se os efeitos da adoção de um critério de contratação que vise minimizar exclusivamente o valor esperado das penalidades por sub e sobrecontratação a que a distribuidora é exposta, ou alternativamente um critério que busque a minimização do valor esperado dos custos totais de contratação, considerando as parcelas determinística e estocástica. Apresenta-se na Tabela 1 resultados de simulações da contratação, para o sistema de quatro pontos de conexão e apenas para o ano de 2011, considerando-se que o problema de otimização estocástica envolve: (i) a minimização do valor esperado dos custos totais de contratação; e (ii) a minimização do valor esperado das penalidades.

TABELA 1 – Contratação do MUST⁶ (minimização de custos totais de contratação vs. minimização de penalidades)

Identificação	Posto	Minimização de custos totais				Minimização de penalidades			
		MUST [MW]	VLN [MR\$]	E[Pen] [MR\$]	E[CtTt] [MR\$]	MUST [MW]	VLN [MR\$]	E[Pen] [MR\$]	E[CtTt] [MR\$]
Ponto 1	PT	287,6	8,867	0,558	9,425	353,8	10,910	0,002	10,912
Ponto 2	PT	96,4	4,050	0,819	4,868	131,2	5,507	0,142	5,650
Ponto 3	PT	146,2	8,544	0,500	9,044	177,2	10,355	0,002	10,357
Ponto 4	PT	166,7	4,924	1,449	6,373	243,7	7,198	0,167	7,364
Ponto 1	F.PT	217,4	6,420	0,645	7,066	278,3	8,218	0,013	8,230
Ponto 2	F.PT	82,4	2,363	0,686	3,050	117,5	3,371	0,196	3,567
Ponto 3	F.PT	141,7	5,850	0,409	6,259	173,0	7,142	0,004	7,146
Ponto 4	F.PT	148,0	8,303	1,345	9,648	198,0	11,104	0,139	11,243

Percebe-se que a contratação que considera exclusivamente a minimização do valor esperado de penalidades resulta em valores mais elevados. Assim, ao processar a indicação dos montantes de contratação informados por uma distribuidora que considerasse exclusivamente o critério de minimização de penalidades, o planejador do sistema poderia ser levado a um dimensionamento do sistema superior àquele obtido quando o valor nominal de contratação é também considerado. Por exemplo: referindo-se ao sistema da Figura 1, e levando em consideração que há cenários em que a potência na linha de transmissão LT1 flui de B1 para B2, nota-se que uma indicação de contratação de 354MW (minimização de penalidades) traz o sistema mais perto de um reforço da transformação de 3x150MVA do que a indicação de contratação de 288MW (minimização de custos totais de contratação).

Na Figura 4 são plotadas as curvas do valor nominal de contratação, do valor esperado das penalidades e do valor esperado dos custos totais de contratação, para diferentes valores de MUST a serem contratados. As curvas tornam evidente o comportamento de verificação de um montante de contratação maior para o caso em que se considera exclusivamente a minimização da exposição a penalidades.

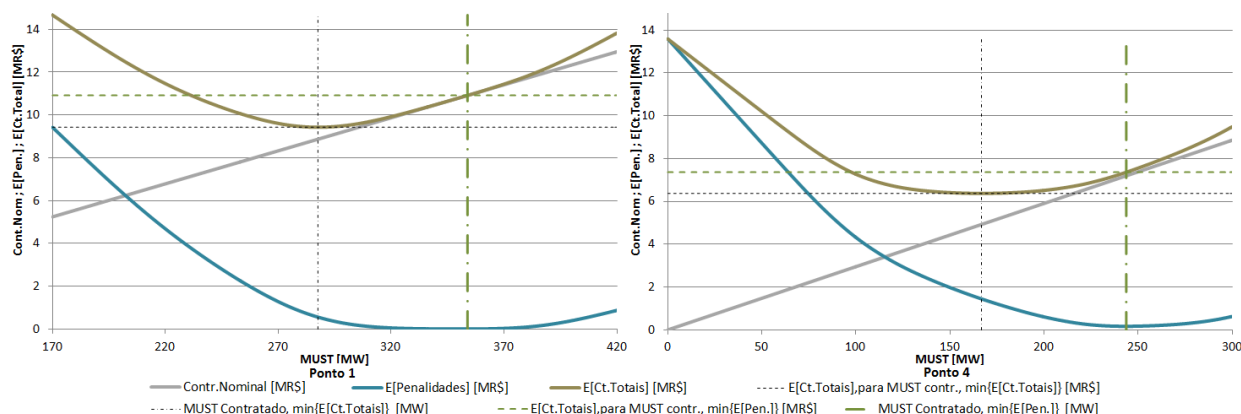


FIGURA 4 – Custos de contratação em função dos MUST contratados (Pontos 1 e 4; per.: ponta; ano: 2011)

⁶ As abreviações utilizadas nesta tabela e nas outras deste documento são: VLN = valor nominal; E[Pen] = valor esperado das penalidades; E[CtTt] = valor esperado dos custos totais de contratação; PT = período de ponta; F.PT = período fora de ponta.

3.2.2. Contratação considerando critério de risco

Um possível critério para a contratação do MUST é determinar os montantes a serem contratados de forma a minimizar as penalidades mais severas a que uma distribuidora estaria exposta. Nesta seção, serão mostrados os montantes de contratação obtidos para o sistema de quatro pontos, caso se deseje fazer a contratação de forma a minimizar o valor esperado das penalidades no conjunto dos 5% dos cenários que resultem nas penalidades mais severas para a distribuidora (critério *conditional value at risk 95%* ou CVaR95%). Na Tabela 2 compara-se os resultados obtidos sob este critério de contratação com aqueles obtidos anteriormente.

TABELA 2 – Contratação do MUST (sem consideração de critério de risco vs.CVaR95%)

Identificação	Posto	Sem critério de risco				Com critério de risco			
		MUST [MW]	VLN [MR\$]	E[Pen] [MR\$]	E[CtTt] [MR\$]	MUST [MW]	VLN [MR\$]	E[Pen] CVaR95% [MR\$]	E[CtTt] CVaR95% [MR\$]
Ponto 1	PT	287,6	8,867	0,558	9,425	307,9	9,495	0,576	10,071
Ponto 2	PT	96,4	4,050	0,819	4,868	118,9	4,991	1,230	6,221
Ponto 3	PT	146,2	8,544	0,500	9,044	155,6	9,090	0,550	9,640
Ponto 4	PT	166,7	4,924	1,449	6,373	207,6	6,129	1,392	7,522
Ponto 1	F.PT	217,4	6,420	0,645	7,066	234,0	6,911	0,879	7,790
Ponto 2	F.PT	82,4	2,363	0,686	3,050	103,6	2,973	1,197	4,170
Ponto 3	F.PT	141,7	5,850	0,409	6,259	149,7	6,180	0,512	6,692
Ponto 4	F.PT	148,0	8,303	1,345	9,648	171,6	9,623	1,725	11,348

De forma a examinar se o comportamento indicado na Tabela 2, de aumento do montante a ser contratado com a consideração de critérios de risco mais severos, é verificado também para a contratação sob outros critérios de risco, foi realizada uma análise mais aprofundada para os pontos de conexão 1 e 4. Nesta análise, foram determinados os montantes a serem contratados caso critérios de risco mais ou menos severos sejam considerados. Analisou-se também a sensibilidade dos valores de MUST contratados em relação à banda de tolerância considerada para a determinação de penalidades de sub e sobrecontratação: foram consideradas tolerâncias no intervalo $[0,02\text{pu}; 0,2\text{pu}]$, sendo que a banda fixada pela RN 399/2010 é de 10% (0,1pu). Os resultados da Figura 5 e da Figura 6 indicam como os valores de MUST tendem a variar com o aumento do critério de risco considerado e com a diminuição da banda de tolerância. Exceto para os resultados obtidos para análises sob critério CVaR80%, CVaR90% e CVaR95% do Ponto 4, verifica-se o comportamento de aumento do MUST contratado com o aumento da severidade do critério de risco. Possivelmente, este comportamento está associado a uma assimetria dos mecanismos de penalização, refletindo-se em penalidades mais severas associadas à subcontratação, em comparação às penalidades por sobrecontratação.

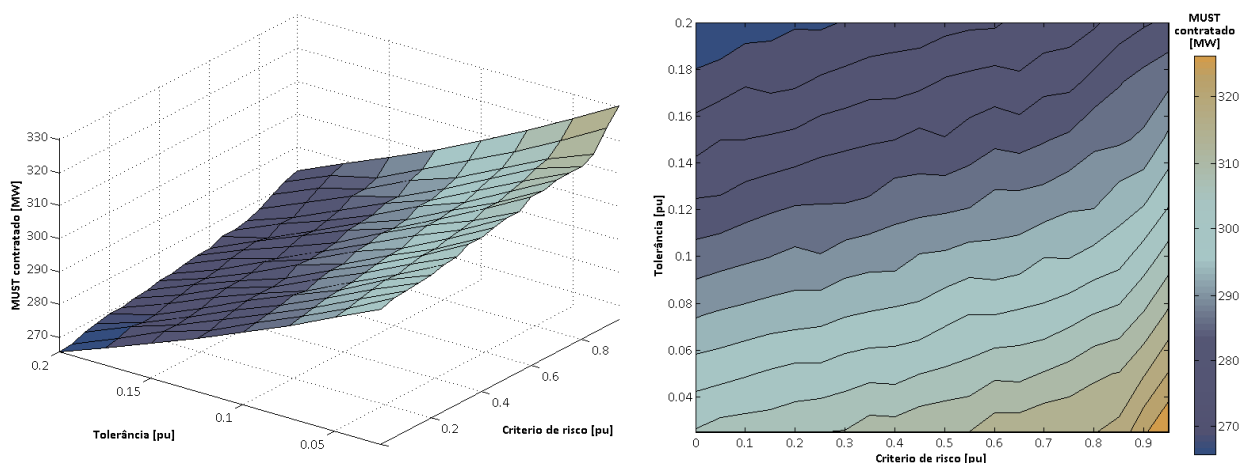


FIGURA 5 – Sensibilidade dos MUSTs contratados à banda de tolerância e a critério de risco. Ponto 1; per.: ponta.

Os resultados das Figuras 5 e 6 ilustram o fato de que a sensibilidade do montante a ser contratado em relação à banda de tolerância para sub e sobre contratação não é igual para todos os pontos. Quanto a estas diferenças, nota-se que os resultados das Figuras 5 e 6 refletem o comportamento das distribuições de probabilidade dos Pontos 1 e 4 (ver Figura 2). Nota-se que, para o Ponto 1, cuja contratação do MUST é comparativamente mais sensível às bandas de tolerância para penalização, o MUST a ser contratado considerando tolerância $\zeta=10\%$ e critério de risco $p=0\%$ ($p=0\%$ implica no cálculo do valor esperado das penalidades considerando *todos* os cenários de eventos) é virtualmente igual àquele obtido para $\zeta=18\%$ e $p=95\%$. Sendo concebível que muitas das distribuidoras considerem critérios de risco elevados para a contratação do MUST, parece ser adequado que a banda de tolerância seja calibrada para resultar em contratações aderentes às reais necessidades da rede⁷.

⁷ É inteiramente legítimo considerar critérios de riscos mais ou menos severos para a determinação das “reais” necessidades de reforços e

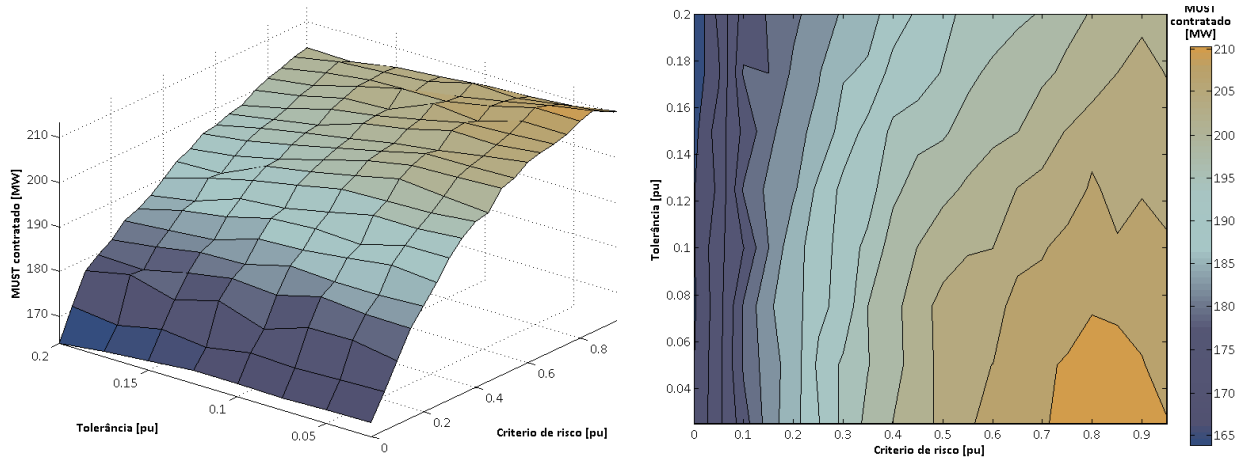


FIGURA 6 – Sensibilidade dos MUSTs contratados à banda de tolerância e a critério de risco. Ponto 4; per.: ponta.

3.2.3. Contratação individualizada vs. contratação integrada

Os resultados mostrados até agora foram obtidos de análises em que os MUST ótimos foram determinados considerando-se individualmente cada um dos pontos de conexão. No entanto, esta abordagem tem limitações importantes quando se considera distribuidoras com múltiplos pontos de conexão e sistema de distribuição em alta tensão malhado. Considere-se como exemplo a contratação sob critério CVaR95%. Ao considerar-se individualmente os pontos de conexão, não há garantia de que os 5% dos cenários de eventos que resultam nas penalidades mais severas para o Ponto 3 sejam os *mesmos* 5% dos cenários que resultam nas penalidades mais severas para o Ponto 4. Assim, pode ser que este esquema de contratação *individualizada* para cada ponto resulte em contratações demasiadamente conservadoras por parte da distribuidora, que estaria se protegendo *simultaneamente* dos piores cenários para o Ponto 3 e dos piores cenários do Ponto 4, sendo que tais cenários não poderiam ocorrer simultaneamente. Este caráter excessivamente conservador da contratação seria verificado quando a correlação entre as máximas demandas de potência dos Pontos 3 e 4 for negativa. A alternativa à contratação individualizada dos MUST seria uma contratação *integrada*, que determine, através da resolução de um só problema de otimização, um vetor de valores a serem contratados para todos os pontos de conexão, de forma a minimizar a exposição da distribuidora a elevados custos totais de contratação (valores nominais e penalidades) obtidos pela soma dos custos individuais de cada ponto.

A verificação, pela observação dos valores da Tabela 3, de que há valores negativos dentre os coeficientes de correlação cruzada entre as máximas demandas de potência para os quatro pontos de conexão do exemplo estudado sugere que uma contratação *integrada* pode ser interessante para o sistema sob análise⁸.

TABELA 3 – Coeficientes de correlação entre as máximas demandas de potência dos pontos analisados

Identificação	Coeficiente de correlação [-]			
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
Ponto 1	1,000	-0,326	0,000	0,104
Ponto 2	-0,326	1,000	0,113	-0,084
Ponto 3	0,000	0,113	1,000	-0,723
Ponto 4	0,104	-0,084	-0,723	1,000

Na Tabela 4, compara-se os resultados obtidos utilizando os procedimentos de contratação individualizada e integrada⁹, considerando para ambos os esquemas de contratação o critério de risco CVaR95%. Os valores de MUST indicados pelo esquema de contratação integrada são inferiores àqueles obtidos pela contratação individualizada. A Figura 7 mostra curvas de permanência da soma dos encargos totais de contratação (valores nominal e penalidades) verificados para todos os quatro pontos do subsistema analisado, para os esquemas de contratação individualizada e integrada. Nota-se que a diferença entre os valores esperados dos custos totais de contratação, que para os 5% dos piores cenários é da ordem de R\$500·10³, atinge valores máximos da ordem de R\$1.200·10³ quando se considera todos os cenários analisados. A interpretação da curva de permanência deve ser, no entanto, cautelosa, devendo-se lembrar que os valores foram gerados por contratação sob critério CVaR95%.

ampliações da rede de transmissão. Esta discussão foge, entretanto, ao escopo do presente artigo.

⁸ Os cenários de demanda utilizados para as simulações que geraram os dados deste estudo não consideraram a existência de correlações negativas entre as demandas da *rede interna* da distribuidora. As correlações negativas obtidas se devem principalmente à interação da rede de distribuição e o restante do SIN (lembrando que a distribuidora sob estudo está fortemente acoplada ao SIN e pode receber sua potência de diferentes pontos de conexão, dependendo das condições operativas). A consideração de correlações negativas entre as demandas das barras da distribuidora potencializaria o comportamento verificado.

⁹ Para a solução do problema de otimização estocástica multivariada associada ao esquema de contratação integrada, foram utilizadas metaheurísticas, chegando-se aos resultados mostrados. Os autores trabalham no desenvolvimento de solução baseada em otimização *tradicional*.

TABELA 4 – Contratação do MUST (contratação individualizada vs. contratação integrada)

Identificação	Posto	Contratação individualizada				Contratação integrada			
		MUST [MW]	VLN [MR\$]	E[Pen] CVar95% [MR\$]	E[CtTt] CVar95% [MR\$]	MUST [MW]	VLN [MR\$]	E[Pen] CVar95% [MR\$]	E[CtTt] CVar95% [MW]
Ponto 1	PT	307,9	9,495	2,322	32,028	292,1	9,006	3,367	31,527
Ponto 2	PT	118,9	4,991			106,9	4,489		
Ponto 3	PT	155,6	9,090			148,6	8,682		
Ponto 4	PT	207,6	6,129			202,6	5,983		
Ponto 1	F.PT	234,0	6,911	2,804	28,491	224,7	6,637	3,345	27,928
Ponto 2	F.PT	103,6	2,973			89,8	2,575		
Ponto 3	F.PT	149,7	6,180			144,7	5,973		
Ponto 4	F.PT	171,6	9,623			167,6	9,399		

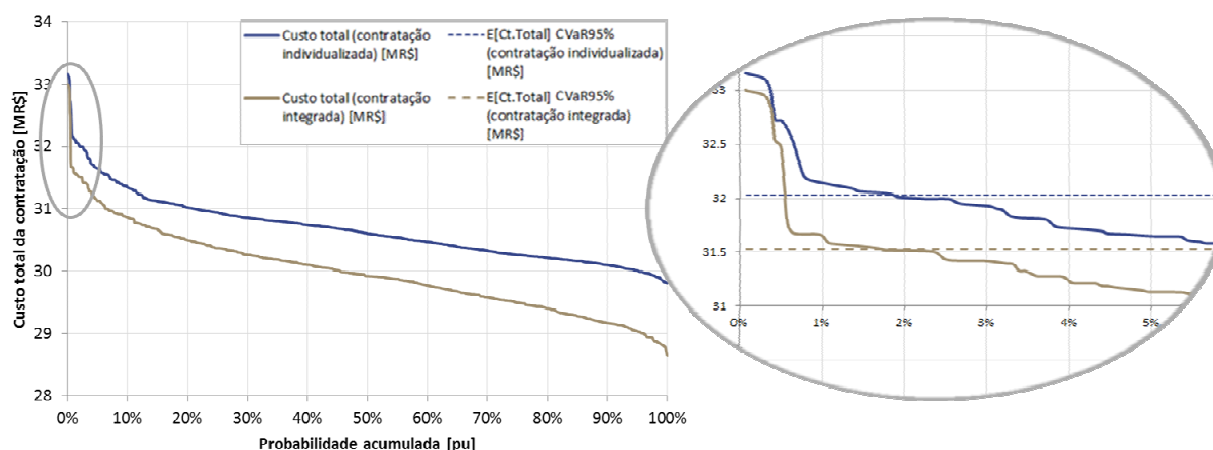


FIGURA 7 – Curva de permanência dos custos totais de contratação (contratação individualizada vs. integrada), referente a soma de custos totais de todos os pontos. Em destaque, trecho inicial da curva. Per.: ponta; ano: 2011

4.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se uma metodologia para a contratação do MUST por distribuidoras de grande porte, sistema malhado e múltiplos pontos de conexão com a Rede Básica, com enfoque nos métodos de representação de incertezas que afetam a contratação e nos procedimentos e critérios para a gestão do risco durante a determinação dos montantes contratados. Resultados da aplicação da metodologia foram apresentados, com base em um conjunto de quatro pontos de conexão, escolhidos dentre os pontos de um sistema real de grande porte.

Dentre os principais resultados apresentados, destacam-se: (a) a análise da adequação do montante de contratação ótimo como índice para avaliação da convergência da simulação Monte Carlo que serve como base do processo; (b) a comparação dos efeitos de contratação que vise a minimizar exclusivamente penalidades ou a minimizar *custos totais* sobre os montantes contratados e consequentemente sobre as indicações dadas para o planejamento da expansão da transmissão; (c) a comparação dos efeitos da consideração de critérios de risco sobre estes mesmos parâmetros; (d) a verificação da relação entre as bandas de tolerância para penalização, a severidade do critério de risco considerado para a contratação e os montantes contratados; e (e) a análise dos efeitos de se adotar um processo de contratação *integrado* para distribuidoras com múltiplos pontos de conexão à rede externa, em oposição a um processo de contratação que considere cada ponto *individualmente*. As conclusões acima foram enumeradas na mesma ordem em que os assuntos foram abordados no documento.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa nº 399, de 13 de abril de 2010. Brasil.
- (2) PSR. Market Report de Novembro de 2010, edição 47. Brasil. Disponível em www.psr-inc.com.
- (3) DA SILVA, A.M.L., COSTA, J.G.C.; MATTAR, C.M. A Probabilistic Approach for Determining the Optimal Amount of Transmission System Usage; Power Systems, IEEE Transactions on. Nov. 2006. EUA.
- (4) PEREIRA, M.V.F., BALU, N.J., Composite generation/transmission reliability evaluation. Proceedings of the IEEE. 1994, EUA.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rafael de Sá Ferreira é mestrando em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ e atua em estudos de transmissão na PSR.



Luiz Carlos da Costa Jr. é doutorando em Otimização pela COPPE/UFRJ e atua em desenvolvimento de modelos na PSR.



Martha Rosa Martins Carvalho é mestranda em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ e atua em estudos de transmissão na PSR.



Ricardo Cunha Perez é mestrando em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ e atua em estudos de transmissão na PSR.



Luiz Maurício Thomé é Engenheiro Eletricista graduado pela UFRJ, com créditos de pós-graduação e cursos de especialização na Alemanha, e coordenador da área de estudos de transmissão na PSR.



Fabio Rogério Zanfelize é mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos pela UNICAMP e gerente do Departamento de Planejamento da Gestão de Energia do Grupo CPFL Energia.