

Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico

GT Metodologia

Aprimoramento na Representação da Produtibilidade Hidroelétrica e Perdas Hidráulicas no Planejamento da Operação Energética de Curto Prazo

Sumário

Introdução	4
1. Sumário Executivo	5
2. Análise de resultados	6
2.1 Avaliação comparativa dos desvios médios totais impressos pelo DECOMP para cada modelo, em relação às suas respectivas funções de referência	6
2.2 Avaliação comparativa da acurácia da FPHA variável e constante em relação à melhor representação disponível para a realidade	10
2.3 Avaliação comparativa entre a geração calculada com dados das grades e a geração observada do histórico	11
2.4 Avaliação comparativa entre a geração obtida pela FPHA e a geração observada no histórico	14
3. Recomendações	19
4. Referências bibliográficas	21

LISTA DE SIGLAS

CPAMP	Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico
DECOMP	Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Curto Prazo
DECOMP	Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Curto Prazo
DESSEM	Modelo de Despacho Hidrotérmico de Curto Prazo
FPH	Função de produção hidroelétrica exata
FPHA	Função de produção hidroelétrica aproximada
GTDP	Grupo de Trabalho para Revisão dos Dados Cadastrais Utilizados para Cálculo da Produtibilidade Hidrelétrica
NEWAVE	Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazo

Introdução

Este relatório está inserido no contexto do Grupo de Trabalho de Metodologia da CPAMP – Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico, criada pela Resolução CNPE nº 01/2007 e regulamentada pela Portaria MME nº 47/2008, com a finalidade de garantir coerência e integração das metodologias e programas computacionais utilizados pelas instituições e agentes.

O Grupo de Trabalho de Metodologia da CPAMP é coordenado pela CCEE (representada pela Gerência Executiva de Preços, Modelos e Estudos Energéticos – GEPME) e conta com a participação do MME (representado pelas Secretarias de Energia Elétrica – SEE, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético – SPE e Assessoria Econômica - Assec), da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (representada pela Superintendência de Regulação da Geração – SRG), da EPE (representada pela Assessoria da Presidência e Superintendência de Planejamento da Geração – SGE) e do ONS (representado pelas Gerências Executivas de Planejamento Energético – PE e de Programação – PR). O grupo possui, ainda, a assessoria técnica do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL (representado pelo Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente).

Em outubro de 2019 foi concluído o primeiro ciclo de trabalho do Grupo de Trabalho para Revisão dos Dados Cadastrais Utilizados para Cálculo da Produtibilidade Hidrelétrica – GTDP (NT 0103-2019 - Consolidação das Atividades Realizadas pelo GTDP – Grupo de Trabalho de Avaliação dos Dados Cadastrais), cujo foco é aferir a qualidade das informações operativas e da representação dos aproveitamentos hidrelétricos nos modelos de otimização empregados nos estudos de planejamento energético de curto, médio e longo prazo. Os resultados obtidos neste trabalho também são utilizados no planejamento e programação da operação e formação do preço de curto prazo, PLD, em consonância com o modelo mercantil vigente.

Dentre os resultados contemplados neste primeiro ciclo de estudos estão as perdas de carga hidráulica do circuito e a produtividade específica médias das usinas. Embora essas grandezas tenham sido agora recalculadas através de metodologias detalhadas, pautadas em dados operativos históricos e informações criteriosas acerca das curvas colina das turbinas, dos rendimentos de geradores e dos arranjos dos circuitos hidráulicos específicos de cada usina, a consideração destas grandezas como sendo um único valor médio representativo constante, indiferentes às condições operativas de altura de queda e turbinamento, constitui uma simplificação.

Em vista deste aspecto, após a conclusão do primeiro ciclo de trabalho do GTDP foi proposto um novo aprimoramento com o objetivo de não somente aumentar a acurácia dos parâmetros de perdas hidráulicas e produtividade específica, mas a própria forma como estas grandezas são informadas aos modelos utilizados no planejamento da operação energética. Dadas as características naturais de ambos os parâmetros, foi proposta a representação das perdas hidráulicas em função da vazão turbinada e a produtividade específica em função tanto da vazão turbinada, quanto da altura de queda líquida.

Após a obtenção dos dados históricos referentes a estes aspectos, foi desenvolvida uma modelagem para representação destas curvas através de um modelo aditivo generalizado

(GAM). A partir destas curvas, pode-se construir uma grade de pontos que foi finalmente incorporada ao modelo DECOMP, especificamente no cálculo da Função de Produção Hidrelétrica Exata (FPH) e na modelagem da função de produção realizada pelo modelo (FPHA), substituindo os parâmetros até então constantes por funções da condição operativa de cada usina.

Devido à natureza das atividades propostas, visando o aprimoramento de metodologias atualmente em uso nos modelos de otimização, o presente estudo foi alocado no âmbito da Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico – CPAMP, no Grupo de Trabalho de Metodologias onde foi então criado o Subgrupo de Produtibilidade Hidroelétrica (SG-Prod).

A metodologia desenvolvida para determinação de representações variáveis para perda hidráulica e produtividade específica através de grades e a definição dos parâmetros envolvidos no processo foram analisadas pelo GT Metodologia, sendo as análises e resultados amplamente abordados no Relatório Técnico GT Metodologia CPAMP nº 03-2020. A atividade foi, então, objeto da Consulta Pública relativa aos temas de Volatilidade do CMO/PLD, Representação Hidrológica e Produtibilidade Hidroelétrica (Nº 103 de 13/01/2021), que esteve aberta para contribuições entre os dias 13/01/2021 e 26/02/2021.

O presente relatório é o segundo relatório no escopo do Subgrupo de Produtibilidade Hidroelétrica no que se diz respeito a representação variável para produtividade específica e perdas através de grades, e apresenta a continuidade dos estudos com apresentação das análises dos principais resultados e impactos desta representação.

1. Sumário Executivo

O Grupo de Trabalho para Avaliação dos Dados Cadastrais – GTDP finalizou em 2019 seu primeiro ciclo de trabalhos, culminando, dentre outras, coisas na aferição da qualidade das informações operativas e da representação dos aproveitamentos hidrelétricos através da atualização dos valores constantes de produtividade específica e perda de carga de diversas usinas contempladas pelos modelos da cadeia de planejamento energético NEWAVE, DECOMP e DESSEM.

Cabe destacar que no fim do primeiro ciclo do GTDP o ONS e demais entidades do setor elétrico entenderam como fundamental a atuação permanente do grupo. Desta forma, umas das propostas apresentadas, discutidas e aprovadas ainda no âmbito do GTDP foi a elaboração de uma metodologia para considerar informações sazonais para produtividade e perdas de carga.

Devido à natureza das atividades propostas foi então criado o SG-Prod no ciclo 2019/2021, cujo trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia para determinação de representações variáveis destes dois parâmetros, por usina, a partir de resultados do GTDP. Esta nova representação seria incorporada ao modelo DECOMP, especificamente no cálculo da Função de Produção Hidrelétrica Exata (FPH) e na modelagem da função de produção realizada pelo modelo (FPHA), substituindo os parâmetros até então constantes por funções da condição operativa de cada usina.

A aplicação desta nova metodologia levou a menores desvios médios por usina entre produtibilidades e perdas calculadas e seus pares no histórico observado quando comparado à alternativa de uso dos parâmetros constantes. De forma análoga, observam-se os desvios médios por usina entre geração hidráulica calculada e observada. A avaliação completa, observando cada ponto operativo individualmente no lugar da média, revela que na maioria das situações existe ganho significativo com uso das grades de produtividade e perdas. Deve ser notado que, embora haja majoritariamente ganho de representação com uso das grades e uma melhora significativa na comparação com as gerações observadas no histórico para diversos pontos, existe um conjunto menor de condições operativas onde há uma degradação significativa na comparação com as gerações observadas no histórico.

Análise semelhante foi realizada comparando-se os valores de geração históricos com aqueles calculados considerando a função de produção hidráulica linear por partes aproximada (FPHA) calculada pelo modelo DECOMP. Tal qual a comparação anterior entre uso de grades e histórico, onde se observa uma melhora significativa nos desvios médios e majoritária nos desvios pontuais, há também um conjunto menor de condições operativas nas quais ocorre deterioração da operação. Ressalta-se ainda que, no caso da FPHA, os ganhos observados com a adoção das produtibilidades e perdas variáveis em relação às perdas constantes é menor se comparado aos da FPH.

Apesar do bom desempenho observado da metodologia de produtividade e perdas variáveis, tanto para a função exata como para a aproximada, o GT-Metodologia concluiu que ainda há necessidade de maior aprofundamento para sua adoção oficial nos processos de programação e formação de preço. Deve ser analisado mais profundamente o conjunto de pontos onde foi observado aumento significativo dos desvios de geração ao utilizar a metodologia produtividade e perdas variáveis, com avaliação dos possíveis efeitos na operação do sistema.

2. Análise de resultados

2.1 Avaliação comparativa dos desvios médios totais impressos pelo DECOMP para cada modelo, em relação às suas respectivas funções de referência

O desvio relativo entre o ajuste da Função de Produção Hidráulica Aproximada (linear por partes) - FPHA - utilizada no modelo e a Função de Produção Hidráulica exata polinomial (não-linear) - FPH - para uma usina i e período t - $DESVIO_{i,t}$ - é dado por (3.1).

$$DESVIO_{i,t} = \frac{GH(FPHA)_{i,t} - GH(FPH)_{i,t}}{GH(FPH)_{i,t}} \quad (3.1)$$

Onde:

- $GH(FPHA)_{i,t}$ é a geração hidráulica obtida pelo modelo a partir da função de produção hidráulica aproximada;

- $GH(FPH)_{i,t}$ é a geração hidráulica da usina i no período t a partir da função de produção hidráulica exata.

O desvio médio absoluto é dado por (3.2):

$$DESUDIO_MEDIO = \frac{1}{NUSI \times NPER} \sum_{i=1}^{NUSI} \sum_{t=1}^{NPER} \sum_{s=1}^{NSC_t} |GH(FPHA)_{i,t} - GH(FPH)_{i,t}| \times p_{s,t} \quad (3.2)$$

Onde:

- $NUSI$ é o número de usinas hidráulicas do estudo;
- $NPER$ é o número de períodos do estudo;
- NSC_t é o número de cenários do período t ;
- $p_{s,t}$ é a probabilidade do cenário s no período t .

A Figura 2.1 apresenta a comparação entre a média dos módulos dos desvios absolutos (em MW) considerando todas as usinas, patamares de carga e períodos do estudo (considerando a probabilidade dos cenários do segundo mês) para os casos com produtibilidade e perdas fixas e variáveis. Nota-se que os desvios médios obtidos com a utilização de dados de produtibilidade e perdas variáveis foram superiores aos desvios para produtibilidade e perdas fixas para todos os 52 casos executados. Este resultado é esperado nesse tipo de comparação, uma vez que a FPH constante apresenta comportamento mais regular e convexo do que a FPH variável, o que faz com que a FPHA constante fique mais próxima da FPH constante do que a FPHA variável em relação a FPH variável. Para os meses de maio a agosto de 2019 o aumento percentual das médias dos desvios ao considerar os dados variáveis foi superior a 50%. Esta alta diferença percentual é proveniente dos baixos valores de desvio médio: como o desvio médio absoluto das funções aproximadas com relação a função exata é baixo, sendo inferior a 8MW para todos os decks, uma pequena variação neste valor já resulta em uma alta variação percentual.

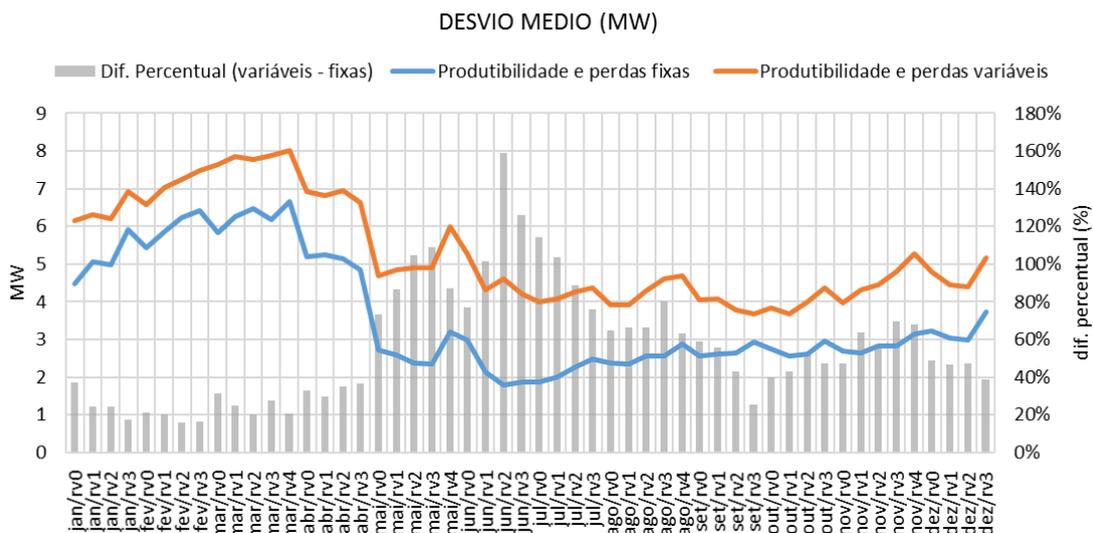


Figura 2.1 - Desvios médios absolutos entre a geração obtida pela função exata (FPH) e a obtida pelo modelo com a função de produção aproximada (FPHA) por usina em todos os períodos.

O desvio entre FPH e FPFA também pode ser observado em termos de desvio percentual total. A Figura 2.2 mostra o desvio total percentual para todos os decks executados para produtividade e perdas fixas e variáveis. Para os dados variáveis, ocorreram os maiores desvios totais, assim conforme observado anteriormente para o desvio médio. O desvio total percentual é calculado conforme (3.5).

$$DESVIOTOTAL(\%) = \sum_{t=1}^{NPER} \sum_{i=1}^{NUSI} \frac{\sum_{s=1}^{NSC_t} p_{s,t} \times \frac{Desvio_{i,t,s}}{GH(FPH)_{i,t,s}}}{\sum_{s=1}^{NSC_t} p_{s,t}} \quad (3.5)$$

Onde:

- $NUSI$ é o número de usinas hidráulicas do estudo;
- $NPER$ é o número de períodos do estudo;
- NSC_t é o número de cenários do período t ;
- $p_{s,t}$ é a probabilidade do cenário s no período t .

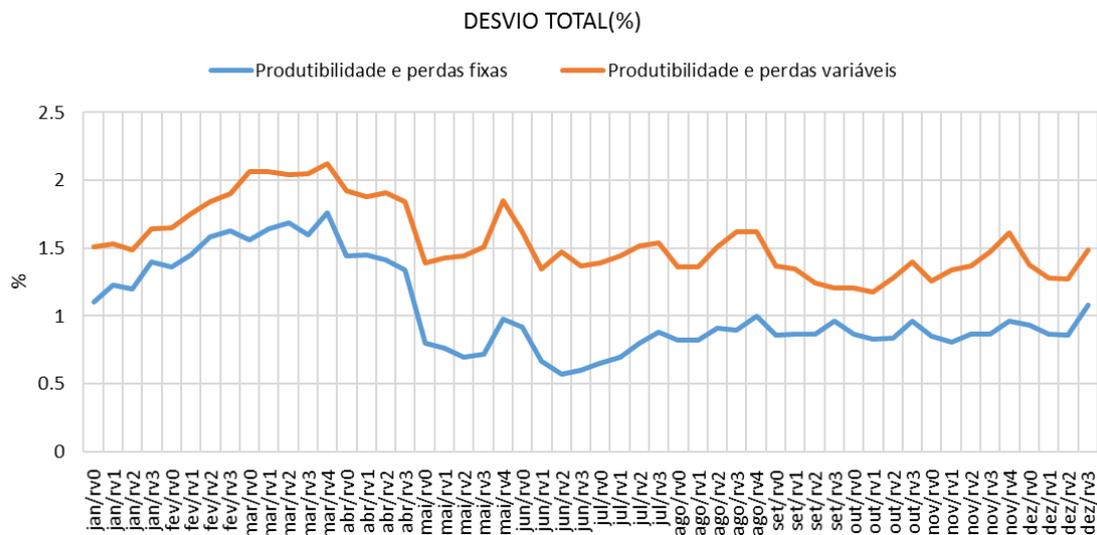


Figura 2.2 - Desvio total percentual entre a geração obtida pela função exata (FPH) e a obtida pelo modelo com a função de produção aproximada (FPFA) em todos os períodos.

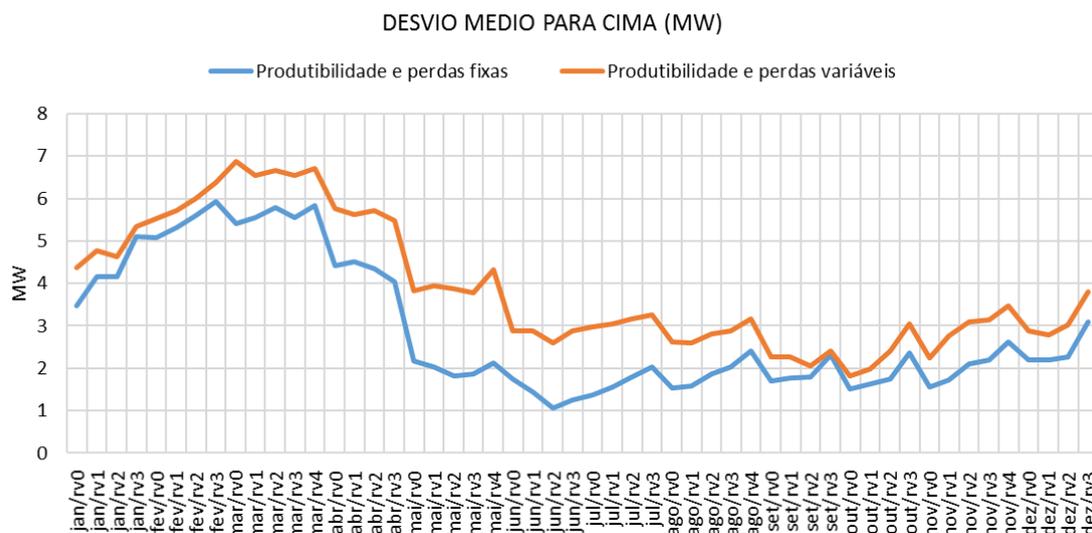


Figura 2.3 e a Figura 2.4 mostram os desvios médios para cima (positivos) ou para baixo (negativo). Em ambos os casos, conforme esperado, em todos os decks os desvios são superiores ao adotar produtividade e perdas variáveis. Entretanto, ao comparar os montantes de desvio médio para baixo e para cima, nota-se que, no geral, os desvios médios para cima são superiores aos desvios médios para baixo em ambas as considerações de produtividade e perdas (fixas ou variáveis). Estes resultados mostram uma maior tendência do modelo em promover gerações hidráulicas baseadas na função de produção aproximada que são superiores às gerações hidráulicas obtidas pela função de produção exata, gerando resultados mais otimistas de geração.

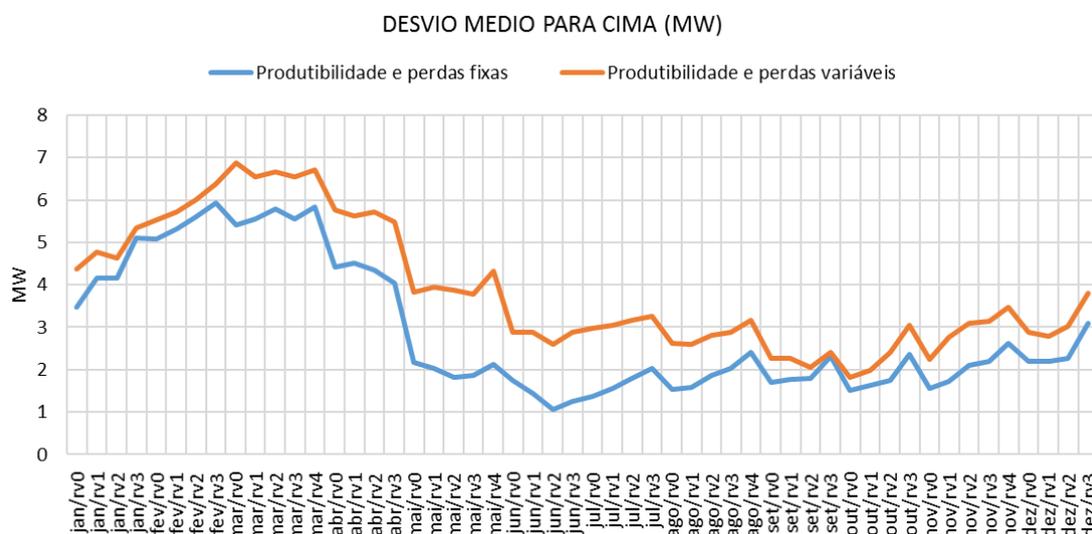


Figura 2.3 - Desvios médios absolutos para cima entre a geração obtida pela função exata (FPH) e a obtida pelo modelo com a função de produção aproximada (FPHA) por usina em todos os períodos.

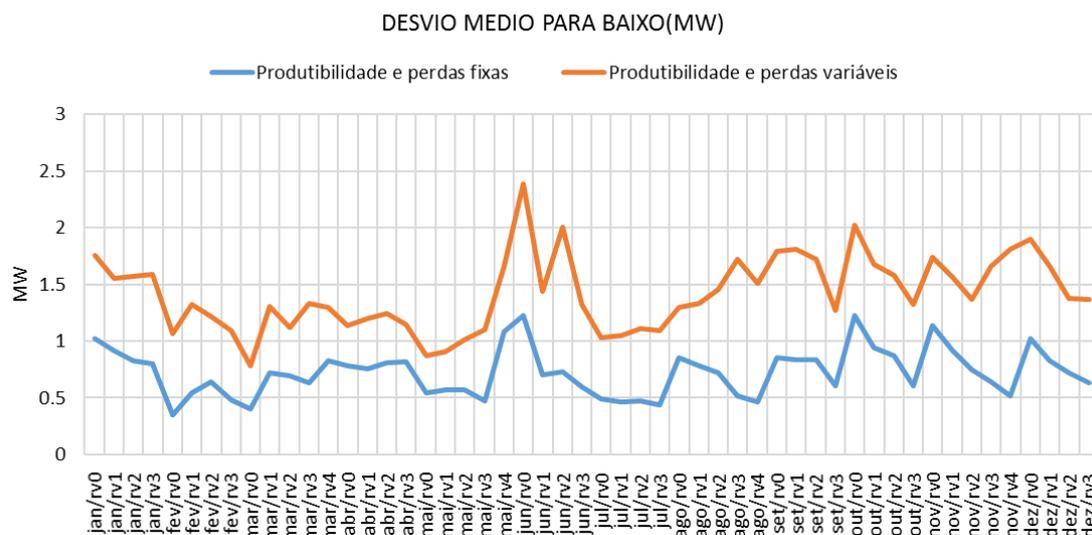


Figura 2.4 - Desvios médios absolutos para baixo entre a geração obtida pela função exata (FPH) e a obtida pelo modelo com a função de produção aproximada (FPHA) por usina em todos os períodos. Ressalta-se que a função de produtividade exata GH(FPH) tomada como referência não é a mesma para os modelos com produtividade e perdas constantes variáveis. Ou seja, a FPHA no caso da produtividade e perdas variáveis têm como referência, para fins de comparação, uma função FPH bem mais acurada em relação à função FPH com produtividade e perdas constantes, fruto do trabalho intenso do GTDP para obter dados mais acurados para as usinas (variáveis), ao invés de valores constantes. Desta forma, o objetivo desta seção não é avaliar a acurácia de cada modelo da FPHA em relação à melhor representação existente da realidade, mas sim verificar o grau de dificuldade de modelagem da FPHA em ambas as situações. A partir dos resultados desta seção, conclui-se que, de fato, é mais complexa a modelagem da função de produção quando se utilizam produtibilidades e perdas variáveis, em comparação com valores constantes.

2.2 Avaliação comparativa da acurácia da FPHA variável e constante em relação à melhor representação disponível para a realidade

Os dados históricos observados e tratados pelo GTDP, que serão objetos de análise nas próximas seções, consistem em valores que ocorreram na operação real do sistema. É com base nestes pontos que se calibram os polinômios que alimentam o cálculo da função de produção exata FPH, seja com produtividade e perdas variáveis ou constantes. Como os dados obtidos e processados pelo GTDP encontram-se no estado da arte, é importante avaliar o desempenho de ambas as funções (FPHA com produtividade e perdas variáveis ou constantes) tendo-se como *benchmark* os dados mais acurados de produtividade e perdas obtidos e tratados pelo GTDP, e que motivaram a construção da função exata da FPH com grade.

A Figura 2.5 mostra os desvios médios considerando todas as usinas, períodos e cenários e patamares, entre os desvios da FPHA com produtividade e perdas variáveis e constantes em relação à FPH com grade, que é a melhor modelagem conhecida para a função de produção exata. Como era esperado, a modelagem da FPHA com produtividade e perdas variáveis

(FPHA_var) apresentou melhor resultado que a modelagem com produtividade e perdas constantes, que ocorre em todos os 261 casos de PMO/PLD processados entre 2016 e 2020, com uma redução percentual do desvio médio superior a 30% em praticamente para todos os casos.

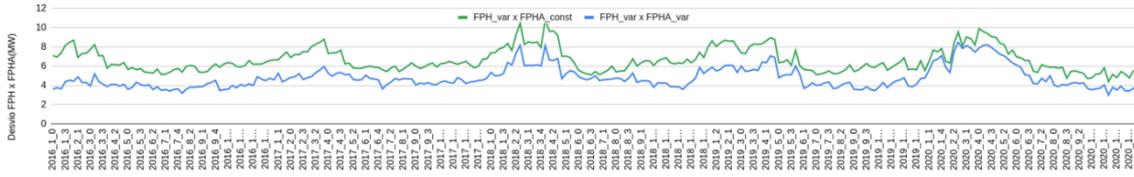


Figura 2.5 - Desvios entre a FPHA com adoção de produtividade e perdas constante e variável com relação a geração exata considerando produtividade e perdas variáveis (FPH(V,Q,S)).

2.3 Avaliação comparativa entre a geração calculada com dados das grades e a geração observada do histórico

Uma métrica de alta relevância na avaliação de qualidade dos ajustes realizados é a sua proximidade histórico. A avaliação apresentada nesta seção consiste na comparação dos desvios entre a energia gerada histórica, denominada GH_{Hist} , calculada pelo produto da queda líquida, vazão turbinada e produtividade históricas:

$$GH_{Hist} = (h_{mont_{Hist}} - h_{jus_{Hist}} - perda_{Hist}) \times Q_{Hist} \times \rho_{Hist} \quad (3.6)$$

e aquela obtida ao se substituir as perdas e produtibilidades observadas pelas grandezas interpoladas das grades a partir da vazão e níveis de montante e jusante observados no histórico, denotada por FPH' , definida em (3.7). A consulta às grades para cálculo da FPH' consiste na interpolação das perdas, cálculo da queda líquida e interpolação da produtividade para cálculo da energia.

$$FPH' = h_{liq}(Q_{Hist}) \times Q_{Hist} \times \rho(Q_{Hist}, h_{liq}(Q_{Hist})) \quad (3.7)$$

Onde:

$$h_{liq}(Q) = h_{mont_{Hist}} - h_{jus_{Hist}} - perda(Q) \quad (3.8)$$

A Figura 2.6 apresenta os desvios absolutos médios ao longo do histórico para cada uma das 90 usinas consideradas neste trabalho. É notável como, em média, não há deterioração significativa da representação da geração em nenhuma usina. Existem apenas 3 usinas em que o desvio médio com uso das grades é marginalmente superior àquele com uso das constantes.

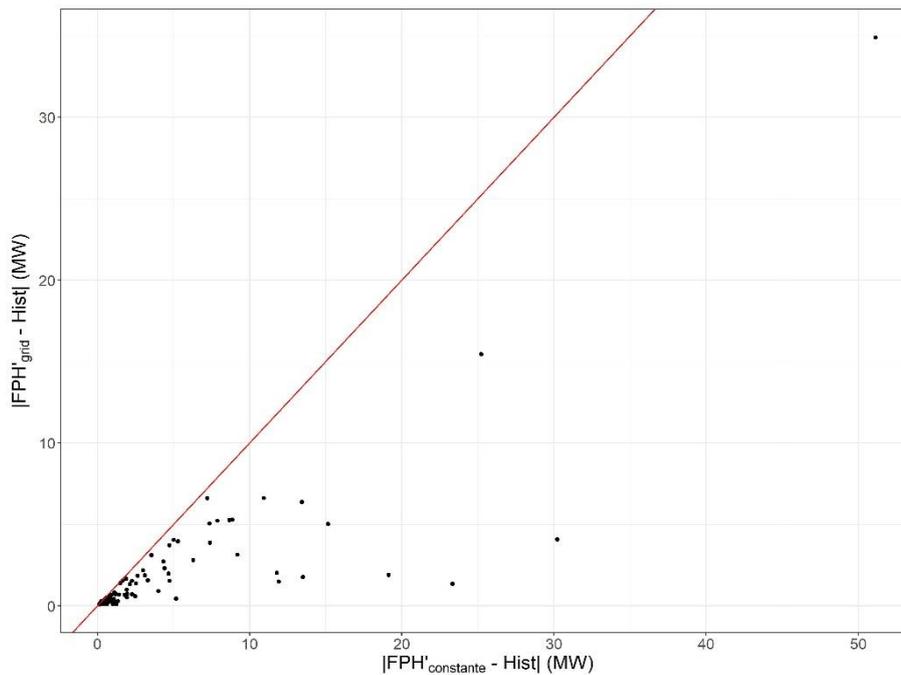


Figura 2.6 - Desvios absolutos médios entre FPH' e histórico por usina.

Além dos desvios médios é importante contemplar a dispersão pontual de cada usina. A avaliação apenas das médias pode ocultar tanto condições indesejáveis, quando o erro decorrente do uso das grades é significativamente superior àquele decorrente das constantes, como situações desejáveis, quando o erro decorrente do uso de valores variáveis é significativamente inferior àquele decorrente das constantes. Deve ser lembrado que as perdas e produtibilidades constantes foram obtidas a partir do mesmo conjunto de dados utilizado para ajuste das grades. Desta forma é esperado que haja alguma dispersão de desvios pontuais em torno da referência de 45 graus.

A Figura 2.7 e a Figura 2.8 apresentam a dispersão e boxplots (limitados ao máximo erro de 50 MW) de todos os desvios históricos (cerca de 500 pontos por usina) de cada uma das 90 usinas contempladas. É notável na dispersão como existe uma maior concentração de pontos abaixo da linha de referência e maior dispersão (distância da referência) evidenciando predominância de situações nas quais o uso das grades apresenta maior proximidade aos dados históricos e usualmente por uma margem considerável. Este aspecto é ainda confirmado pelos boxplots, através dos quais nota-se que o quantil 75% dos desvios com grades é comparável a mediana daqueles com constantes.

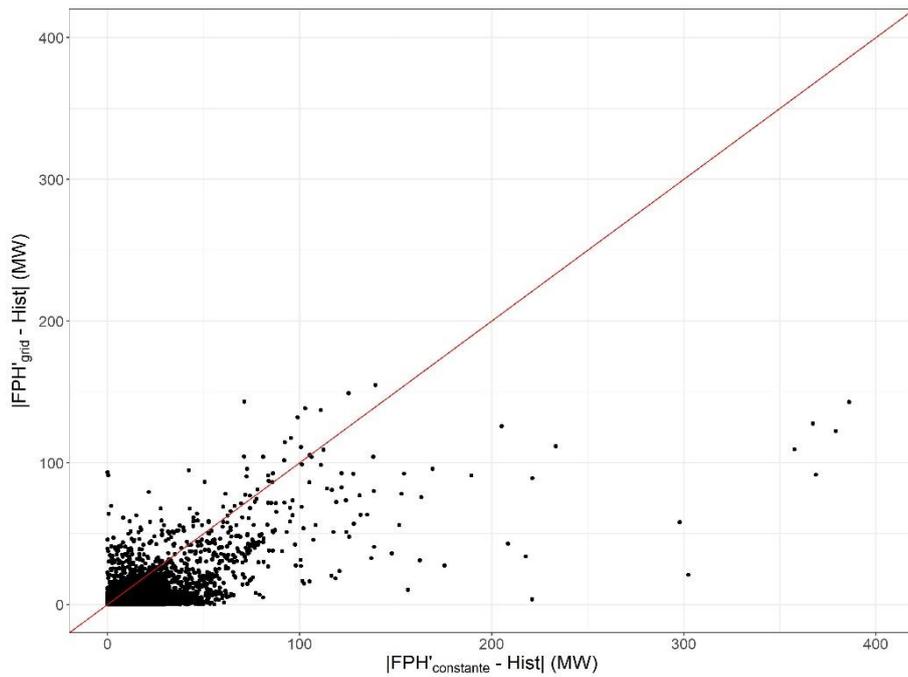


Figura 2.7 - Dispersão completa dos desvios absolutos entre FPH' e histórico.

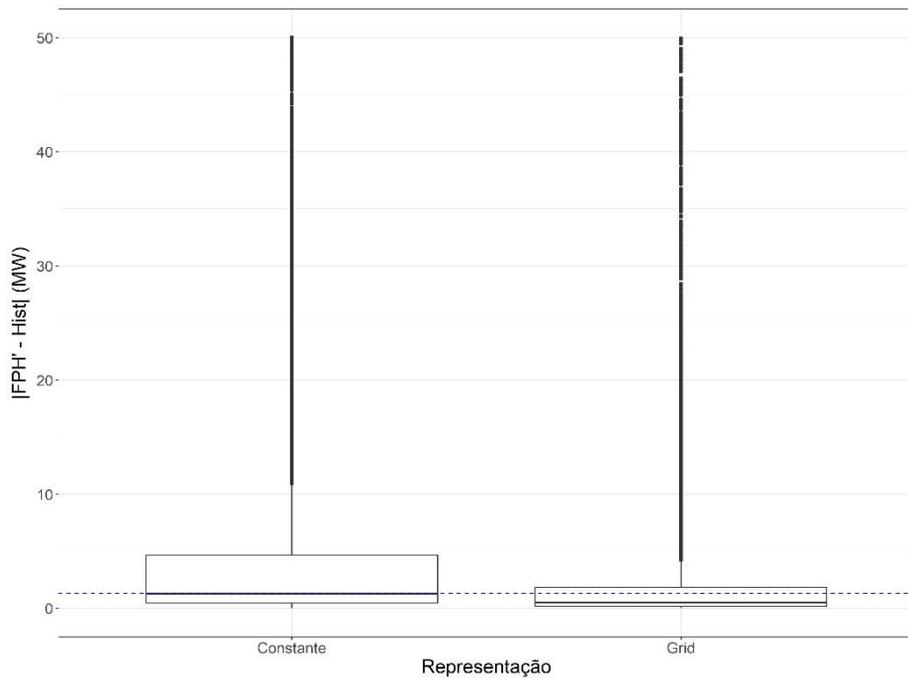


Figura 2.8 – Boxplot dos desvios absolutos pontuais entre FPH' e histórico.

A Tabela 2.1 apresenta um sumário da frequência com que os desvios de cada representação são maiores que n vezes aqueles da outra – isto é, a linha Grade na coluna $n = 2$ indica o percentual de pontos nos quais o desvio da grade é igual ou superior a duas vezes o desvio da constante.

Tabela 2.1 - Frequência de desvios n vezes maior.

$n =$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Grade	23.9%	10.9%	7.1%	5.3%	4.1%	3.4%	2.9%	2.6%	2.3%	2.1%
Constante	76.1%	54.5%	43.2%	36.1%	31.1%	27.4%	24.5%	22.0%	20.2%	18.5%

A análise da Tabela 2.1 evidencia o comportamento enunciado no Sumário Executivo. A cada coluna é visível como há maior frequência de melhoria ao se utilizar grades no lugar das constantes. Ainda como enunciado anteriormente, não se pode ignorar a frequência de pontos onde as grades performam significativamente inferior.

Vale ressaltar que os valores apresentados na Tabela 2.1 não contêm informação quanto ao valor em MW do desvio, isto é, caso a grade desvie do observado por 0,2 MW e a constante por 0,1 MW ou 200 MW e 100 MW, respectivamente, ambos os casos caem na coluna $n = 2$. Novamente se identifica a importância de avaliar mais profundamente o impacto destes casos de deterioração na operação do SIN, considerando em quais usinas eles ocorrem e a influência destas em respeito ao sistema como um todo.

Finalmente, esclarece-se que alguns desvios muito maiores para a modelagem de grade, observadas nas situações mostradas nas últimas colunas da Tabela 2.1, ocorrem independentemente da estratégia que for adotada para modelagem da função de produção no modelo DECOMP, visto que a comparação está sendo feita apenas com as funções de produção ditas “exatas”.

2.4 Avaliação comparativa entre a geração obtida pela FPHA e a geração observada no histórico

A análise a seguir visa comparar a geração obtida do histórico com a função de produção que será de fato utilizada pelo modelo DECOMP: a Função de Produção Hidráulica Aproximada (FPHA), construída através de aproximações lineares por parte da Função de Produção Hidráulica Polinomial (FPH).

A avaliação presente nesta seção consta na comparação dos desvios entre a geração obtida do histórico (GH_{Hist}) e a FPHA quando utilizados os parâmetros constantes ou variáveis de produtividade e perdas. Vale ressaltar que a FPHA é uma aproximação linear por partes e foi construída com base na geração dada pela FPH, que é o mais próximo da realidade que o modelo DECOMP enxerga. Entretanto, como a FPHA é a função que é efetivamente utilizada para a obtenção da operação ótima e despacho hidrotérmico no modelo, a comparação entre a FPHA e a geração obtida do histórico se torna uma métrica importante e necessária durante a avaliação da utilização das grades de produtividade e perdas. Quanto menores são os desvios observados entre a geração do histórico e a geração dada pelo modelo via FPHA, mais aderente o resultado do modelo é da realidade operativa.

A FPHA consiste em um modelo linear por partes dependente de volume, turbinamento e vertimento, e é obtido através de aproximação da Função de Produção Hidráulica (FPH), conforme descrito em [2] e [3]. O modelo linear por partes é dado pelo conjunto de inequações apresentado em (3.11).

$$(FPHA_i) \quad \begin{cases} GH_i^t \leq \gamma_{0_i}^k + \gamma_{V_i}^k V_i^t + \gamma_{Q_i}^k Q_i^t + \gamma_{S_i}^k S_i^t \\ t = 1, \dots, T, k = 1, \dots, NC_i \end{cases}, \quad (3.11)$$

onde $\gamma_{0_i}^k$, $\gamma_{V_i}^k$, $\gamma_{Q_i}^k$ e $\gamma_{S_i}^k$ são os coeficientes dessa função para cada corte k da usina i .

O modelo DECOMP constrói esta função a partir das seguintes etapas:

- Determinação de uma grade de discretização para os valores de V e Q ;
- Cálculo da função de produção hidráulica exata (FPH) em todos estes pontos;
- Cálculo de uma envoltória convexa para os pontos abaixo desta função exata, e construção de um modelo inicial linear por partes (FPHA₀) em V e Q ;
- Regressão para minimização das diferenças entre a FPH e FPHA₀;
- Aproximação secante para a função no eixo do vertimento.

Os valores médios semanais históricos são referentes ao período de 2005 a 2014, assim o histórico de gerações testado abrange dez anos de operação, variando entre condições de hidrologia mais ou menos favoráveis e níveis de armazenamento diversos. Por este motivo, ao utilizar cortes obtidos numa rodada regular do DECOMP, que são construídos com base em uma janela de 10% em torno do volume do reservatório no início do estudo, não é garantido que serão cobertas com acurácia todas as regiões do domínio do histórico testado. Para que a avaliação fosse mais próxima do que ocorreria na realidade do DECOMP, foi então desenvolvido um novo conjunto de cortes da FPHA com as seguintes premissas para cada tipo de usina:

- Usinas a fio d'água: como as usinas a fio d'água constroem suas FPHAs em torno de turbinamentos de zero até o máximo, para esta análise, foi adotada a FPHA construída com base no primeiro período do deck da revisão 0 de janeiro de 2020.
- Usinas reservatório: além do turbinamento, o qual foi adotada a mesma premissa das usinas a fio d'água, a FPHA depende do volume inicial do estudo. Dessa forma foram construídas 11 FPHAs para cada usina. Cada FPHA foi construída com a janela de volume centrada em 0, 10, 20, 30, ..., 90%, 100% do volume útil de cada uma, contemplando cada uma $\pm 10\%$ em torno do centro, e com 5 pontos de discretização.

Assim, para a obtenção das diversas faixas de FPHA dependendo do volume inicial, foram realizadas múltiplas execuções do modelo alterando o domínio da função de produção por uma janela móvel. Para o eixo de turbinamento, foi adotada a mesma discretização utilizada oficialmente, com turbinamento variando de zero até o turbinamento máximo, com 5 pontos. Este mesmo procedimento para construção e acesso à geração da FPHA foi realizado para o caso de produtividade e perdas constantes e o caso de produtividade e perdas variáveis.

A FPHA acessada por um dado ponto do histórico é aquela cuja construção foi realizada a partir de um ponto central mais próximo do volume referente ao do dado histórico. De posse da FPHA

a ser utilizada, ela é consultada com os valores de volume e turbinamento de determinado ponto do histórico.

Vale ressaltar que, como os dados de vertimento do histórico não são conhecidos, e foram desconsiderados nesta análise, essa aproximação pode causar um distanciamento dos resultados da FPHA em relação à GH_{Hist} uma vez que no dado histórico a usina poderia estar vertendo. Também foi feita uma aproximação no cálculo de V_{Hist} , que também é um dado não conhecido e foi obtido através do polinômio cota x volume da usina a partir da cota de montante observada ($hmont_{Hist}$). Usinas que são informadas ao DECOMP como fio d'água devem ter volume constante, e, portanto, nestes casos a cota de montante histórica é ignorada e é utilizado o volume de referência da usina.

Assim, a geração determinada pela FPHA para uma dada usina em determinado ponto do histórico, é dada pelo menor valor obtido ao acessar todos os cortes construídos, conforme (3.12).

$$GH_{FPHA}(V_{Hist}, Q_{Hist}) = \min(\gamma_0 + \gamma_V^k V_{Hist} + \gamma_Q^k Q_{Hist} \forall k = 1, \dots, NC) \quad (3.12)$$

A Figura 2.9 mostra o desvio médio absoluto obtido entre as gerações médias semanais históricas de cada usina e a geração obtida ao acessar a FPHA com as grandezas do histórico. A Figura 2.10 mostra os mesmos resultados com um recorte amplificado entre 0 e 70 MW, onde estão concentrados a maioria dos pontos de desvio. Cada um destes pontos representa o desvio médio de cada uma das 90 usinas que possuem dados de produtividade e perdas variáveis representados através das grades.

É possível observar que a diferença entre os desvios médios do caso com produtividade e perdas constantes e variáveis é pouco significativa para muitas usinas, com predominância de desvios médios mais elevados quando utilizada a representação constante. Dentre as 90 usinas, 34 usinas apresentaram desvio médio entre FPHA e histórico maior com a adoção de produtividade e perdas variáveis. Assim, aproximadamente para 38% das usinas ocorreram desvios médios inferiores ao considerar produtividade e perdas constantes, e para 62% das usinas ocorreram desvios médios inferiores ao considerar produtividade e perdas variáveis.

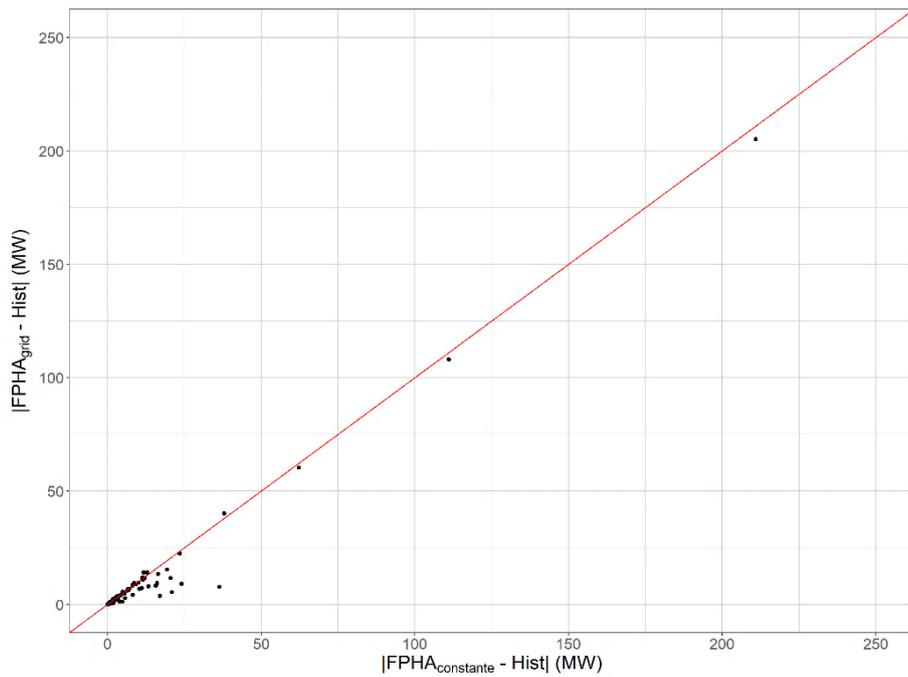


Figura 2.9 – Desvio médio por usina entre a FPFA com adoção de produtividade e perdas constante e variável com relação a geração obtida pelo histórico.

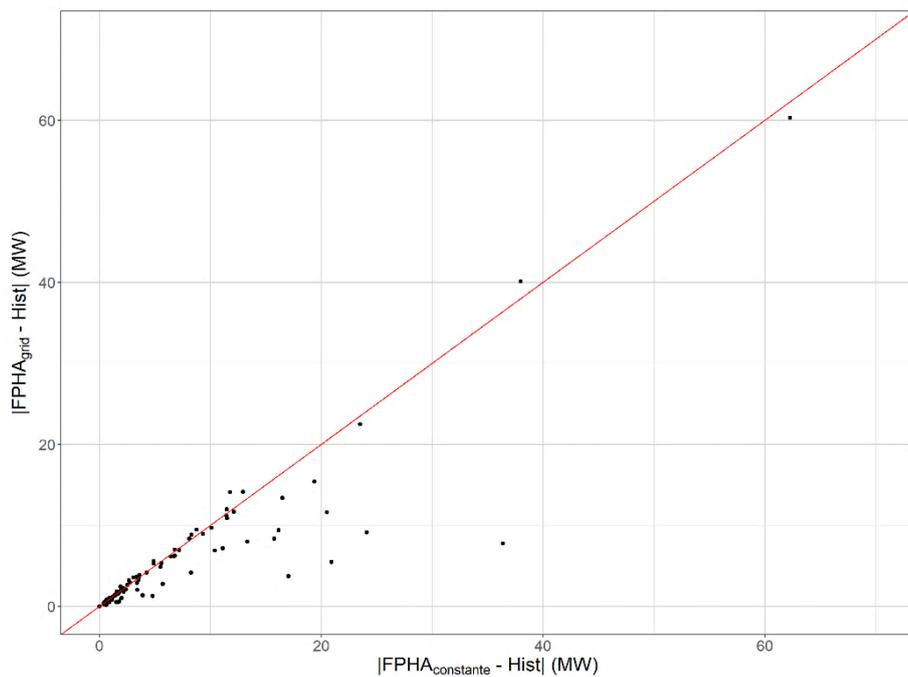


Figura 2.10 – Desvio médio por usina entre a FPFA com adoção de produtividade e perdas constante e variável com relação a geração obtida pelo histórico – recorte amplificado entre 0 e 70 MW.

Tal qual na seção anterior, a análise dos desvios médios pode mascarar ocorrência de alta dispersão e desvios elevados que sejam indesejados. Assim, a Figura 2.11 apresenta os resultados desagregados dos desvios absolutos. Cada ponto do gráfico representa o desvio obtido de um ponto do histórico de uma usina. A Figura 2.12 apresenta o mesmo gráfico, porém com um recorte ampliado entre 0 e 70 MW, onde estão concentradas a maior parte dos desvios.

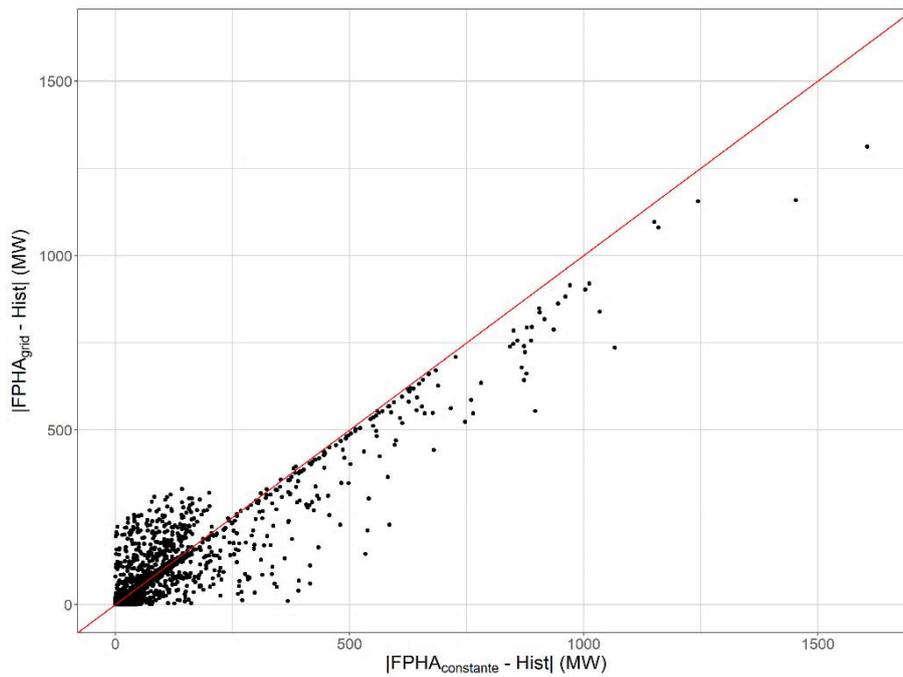


Figura 2.11 – Desvios entre a FPMA com adoção de produtividade e perdas constante e variável com relação a geração obtida pelo histórico.

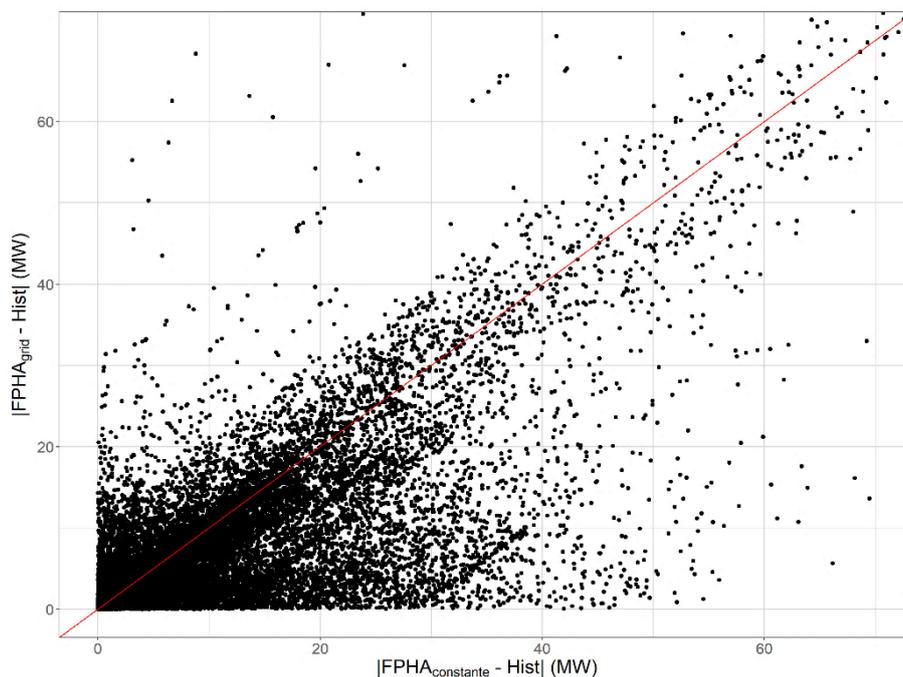


Figura 2.12 – Desvios entre a FPMA com adoção de produtividade e perdas constante e variável com relação a geração obtida pelo histórico – recorte amplificado entre 0 e 70 MW.

Como esperado, nota-se que existem valores abaixo e acima da reta de 45 graus, valores estes que compuseram as médias apresentadas no gráfico anterior (Figura 2.9). Entretanto, é possível notar que muitos desvios apresentaram grande dispersão com relação à média e, apesar da abordagem com produtividade e perdas variáveis apresentar uma aproximação significativa da

realidade operativa para diversos pontos, alguns desvios muito altos em alguns pontos ocorreram ao considerar produtividade e perdas variáveis, indicando um distanciamento com relação a realidade representada pelos dados de geração do histórico

Para aproximadamente 40% dos pontos do histórico ocorreram desvios inferiores ao considerar produtividade e perdas constantes, e para 60% dos dados ocorreram desvios inferiores ao considerar produtividade e perdas variáveis.

Aqui se nota, assim como nas análises da seção anterior, uma maioria de condições em que há melhora significativa com uso das grades, apesar da existência de deterioração em uma parcela dos pontos. Novamente, fica indicada a necessidade de investigações mais profundas dos efeitos e impactos na operação do sistema.

É importante ressaltar que, ao analisar todo o espectro de dados individuais das usinas, é esperado que surjam diversas situações onde há ganhos maiores para a função de produção constante, pois a própria aleatoriedade na localização dos pontos fará o modelo visitar regiões onde, casualmente, esta modelagem produza uma aproximação melhor. Já para os desvios médios é esperado, em princípio, que se tenha um ganho para todas as usinas, pois cada ponto no gráfico já é uma média de diversas diferenças, e torna-se mais difícil, desta forma, que a vantagem de uma modelagem sobre a outra (expressa por cada ponto) seja fruto da aleatoriedade dos dados.

3. Recomendações

A análise comparativa desempenhada na seção 2 aponta que a incorporação das grades leva em média a uma melhoria considerável na representação dos parâmetros de perda e produtividade. A avaliação pontual do histórico completo levanta situações que, embora pouco comuns, podem levar a um aumento significativo dos desvios de algumas usinas, tanto para as funções de produção ditas “exatas” (FPH) como para os modelos lineares por partes (FPHA) construído para aproximá-la. Sob esta ótica entende-se que é necessário aprofundar a análise do conjunto de pontos onde foi observado esse aumento dos desvios, avaliar porque isto ocorreu e se há potencial de efeitos colaterais na operação do sistema.

Ressalta-se que a versão do modelo DECOMP em validação pela CPAMP permite o tratamento simultâneo de algumas usinas com a produtividade e perdas variáveis e de outras com produtividade e perdas constantes. Para utilização de tal possibilidade, no entanto, é necessário que seja definido um critério objetivo para adoção de produtividade e perdas variáveis ou manutenção dos parâmetros constantes por usina. Tal critério poderia ser internalizado no modelo de modo que a escolha de representação seja automática e não subjetiva.

Com base nas análises apresentadas, o subgrupo de aprimoramento na representação da produtividade hidroelétrica e perdas hidráulicas no planejamento da operação energética de curto prazo do GT-Metodologia da CPAMP recomenda a continuidade dos estudos, e

consequentemente o adiamento da utilização da funcionalidade de produtividade hidroelétrica e perdas hidráulicas variáveis, para que sejam avaliados os pontos listados abaixo.

Próximos passos:

- Entender o que ocasionou os desvios maiores com produtividade e perdas variáveis para o conjunto de pontos mencionado anteriormente.
- Avaliar os impactos na operação.
- Estabelecer um critério objetivo, interno ao modelo DECOMP, para escolher quais usinas usariam produtividade e perdas variáveis e quais usinas usariam produtividade e perdas constantes.

Tabela 3.1 - Tabela de síntese das conclusões.

Conclusões
Apesar da melhoria média observada na representação das perdas e produtibilidades através das grades, a análise completa do histórico revela a necessidade de maiores investigações acerca das deteriorações pontuais e seus efeitos na operação.
Estabelecer um critério objetivo, interno ao modelo DECOMP, para escolher quais usinas usariam valores constantes ou variáveis

4. Referências bibliográficas

- [1] KHENAYFIS, L.S; BRAGA, R.S.; KLIGERMAN, A., Metodologia para Determinação de Curvas Vazão-Nível de Jusante em Aproveitamentos Hidrelétricos Brasileiros. 2019.
- [2] .L. Diniz, M.E.P. Maceira, “A four-dimensional model of hydro generation for the short-term hydrothermal dispatch problem considering head and spillage effects”, *IEEE Trans. Power Syst.*, v. 23, n.3, pp. 1298-1308, 2008
- [3] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, “Manual de metodologia do modelo DESSEM”, Abril/2020 (disponível em http://srvlumis02.cepel.br/pt_br/sala-de-imprensa/noticias/documentacao-tecnica-das-metodologias-e-modelos-de-otimizacao-energetica-do-cepel.htm)