

7

Avaliação dos Cenários Hidrológicos Gerados

7.1.

Considerações Iniciais

O objetivo neste capítulo é avaliar a qualidade dos cenários hidrológicos gerados aplicando-se os métodos propostos neste trabalho. Primeiramente é avaliado o tamanho da amostra de ruídos utilizada no processo de agregação. Após a definição do tamanho desta amostra é analisada as amostras de ruídos geradas para construção dos cenários hidrológicos utilizados nos passos forward e backward. São realizados testes de aderência, análise das estimativas de média, desvio padrão e correlação espacial. Finalmente, são avaliados os cenários hidrológicos. São realizados testes estatísticos condicionados, para o caso dos cenários do passo backward, testes estatísticos não condicionados e testes de seqüência negativa para os cenários do passo forward.

Para verificar a acurácia da geração da árvore de cenários é utilizado o Programa Mensal de Operação de janeiro de 2008. A configuração hidroelétrica utilizada neste estudo é composta por 145 usinas hidroelétricas. Estas usinas são agregadas em quatro subsistemas equivalentes de energia (Sudeste/Centro-Oeste, Sul, Nordeste e Norte). Além disso, fazem parte do parque gerador do SIN 112 usinas termoeletricas. O horizonte de planejamento é de cinco anos divididos em estágios mensais e mais um período de pós-estudo com cinco anos, totalizando 120 períodos.

Como o modelo estatístico utilizado para geração dos cenários sintéticos de energia é o PAR(p), a energia natural afluente de um período depende das p afluências passadas. Atualmente a ordem máxima considerada para o modelo é igual a seis ($p \leq 6$). A tendência hidrológica recente adotada neste estudo é mostrada na Figura 46 em percentual da MLT (média de longo termo mensal). Nota-se que a situação hidrológica recente não é favorável para os subsistemas Nordeste e Norte (abaixo de 50% MLT), está um pouco abaixo da média para o subsistema Sudeste e é favorável para o subsistema Sul. Desta forma, a média dos cenários gerados para os primeiros meses do horizonte de estudo devem

estar abaixo da MLT para os subsistemas Nordeste e Norte, acima da média histórica para o subsistema Sul e um pouco abaixo para o subsistema Sudeste. O efeito condicionante ao passado recente vai se atenuando ao longo dos períodos e praticamente não é mais verificado após os primeiros meses.

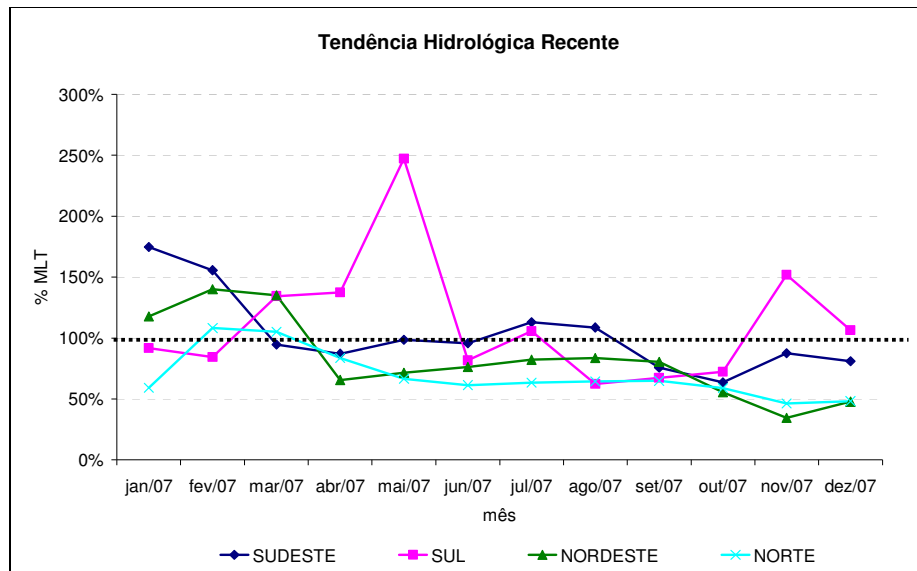


Figura 46: Tendência Hidrológica Recente (%MLT)

7.2.

Análise da amostra de ruídos

7.2.1.

Amostra de ruídos utilizada no processo de agregação

A amostra considerada no processo de agregação é formada por um número pré-definido de vetores de ruídos, onde cada posição do vetor representa um ruído sorteado da distribuição normal padrão para um dos subsistemas considerados na representação do SIN. Vale lembrar que neste ponto os vetores de ruídos não apresentam correlação espacial. Neste item são avaliadas amostras com tamanho variando de 2 mil a 100 mil vetores de ruídos, totalizando um total de 9 casos.

Para cada período do horizonte de estudo é gerada uma amostra de ruídos e calculados a média, o desvio-padrão para cada subsistema e a distribuição de frequência multivariada. No final, são calculadas a média e o intervalo de confiança para as estimativas da média e do desvio-padrão. A distribuição multivariada estimada é comparada com a distribuição multivariada teórica.

A distribuição da estimativa da média é dada por (7.1), onde os parâmetros μ e σ^2 são iguais a zero e um, respectivamente. O valor de n é igual ao número

de períodos vezes o tamanho da amostra. Na Figura 47 são apresentados a estimativa para média (gráfico de barras) e o intervalo de confiança (gráfico de linha) considerando um nível de significância de 5%. O resultado obtido é satisfatório para cada caso analisado (exceto para os casos com amostra de 5 mil no subsistema Sul e com amostra 75 mil para o subsistema Norte).

$$\bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right) \quad (7.1)$$

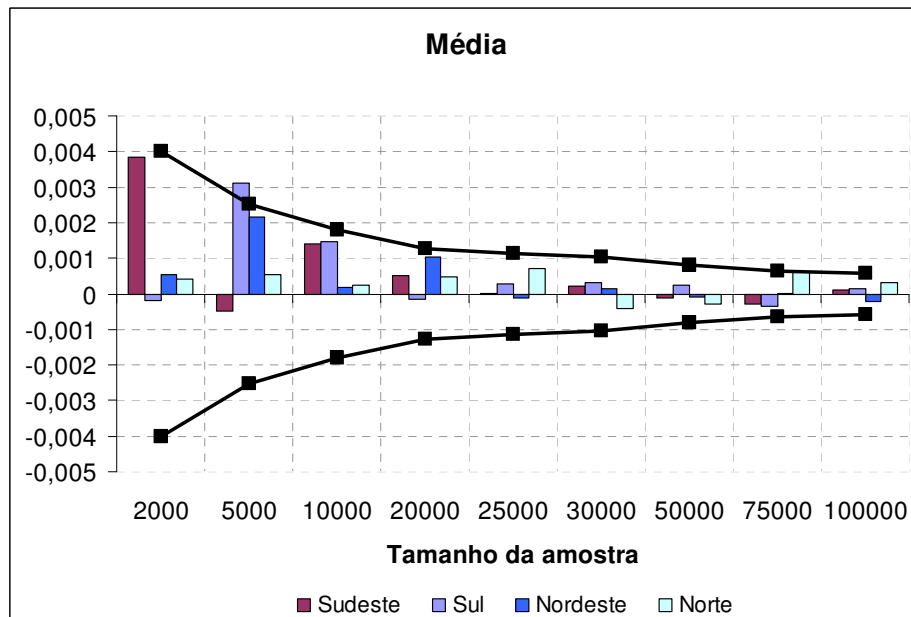


Figura 47: Estimativa Média (amostra de ruídos)

Na Figura 48 é mostrado o desvio-padrão médio para cada subsistema (gráfico de barras) e um intervalo de confiança (gráfico de linha), considerando um nível de significância de 5%, para esta estimativa. A distribuição do desvio-padrão, no caso de variáveis com distribuição normal padrão, é dada por (7.2). Novamente, pode-se observar que os resultados são satisfatórios para todos os casos analisados, com exceção da amostra de tamanho 5 mil, para o subsistema Nordeste.

$$(n-1) \frac{S^2}{\sigma^2} \sim \chi_{n-1}^2 \quad (7.2)$$

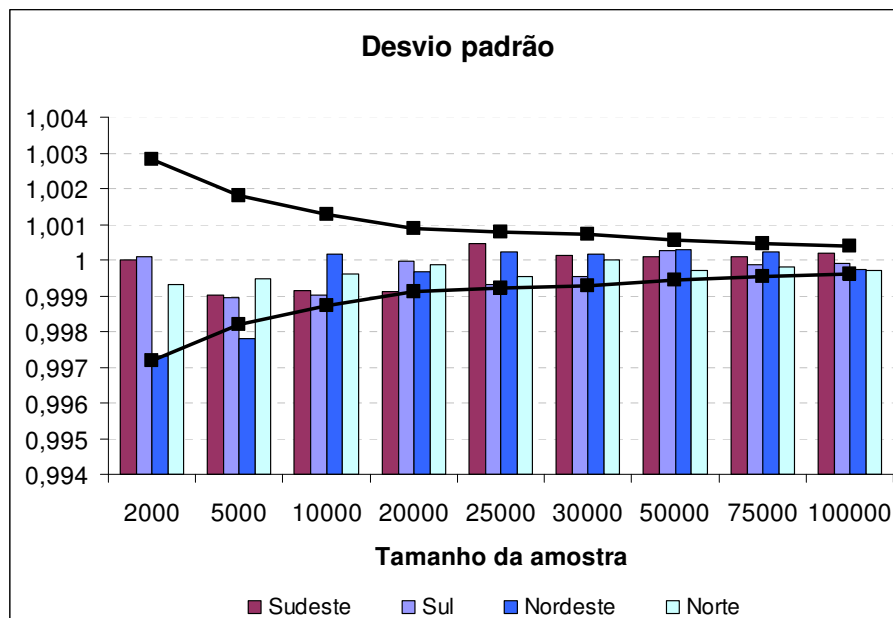


Figura 48: Estimativa Desvio-Padrão (amostra de ruídos)

Na Figura 49 é apresentado o número de rejeições para os testes estatísticos da média e desvio-padrão. Considerando para cada caso analisado um conjunto de 480 testes (120 períodos x 4 subsistemas) e supondo um nível de significância de 5%, é admissível que 24 testes sejam reprovados. Este limite é ultrapassado nos casos com amostras de tamanho 5 mil, 10mil e 75 mil. O número de rejeições do caso 5 mil é compatível com um nível de significância de aproximadamente 7%.

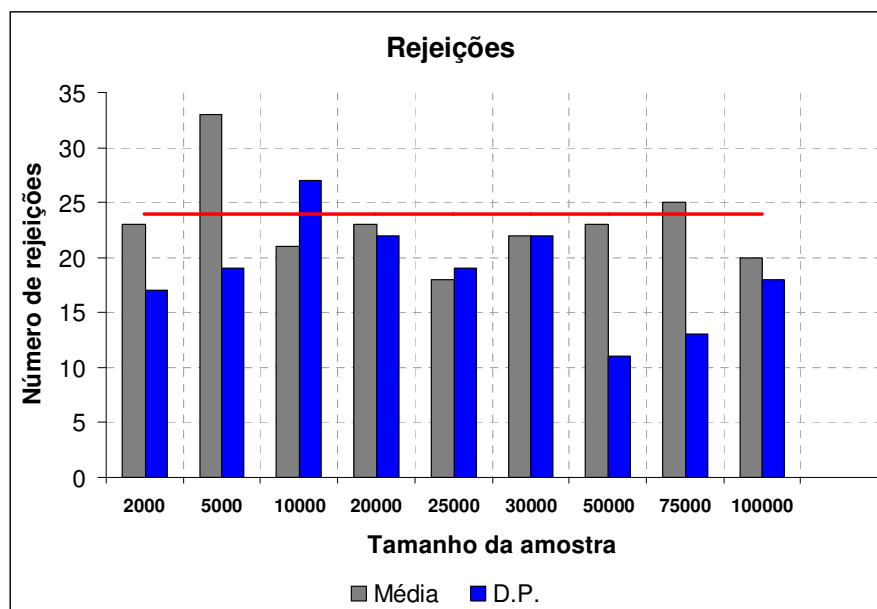


Figura 49: Número de Rejeições (amostra de ruídos)

A distribuição multivariada é calculada dividindo-se a distribuição univariada normal padrão de cada subsistema em três intervalos e então é feita a combinação dos intervalos de cada um dos quatro subsistemas. Desta forma, são definidas 81 classes ($3^4 = 81$ classes). Para este estudo, a distribuição univariada é dividida em 3 intervalos com probabilidades iguais a 0,25; 0,50 e 0,25 (quantis da distribuição), respectivamente, de acordo com a Figura 50.

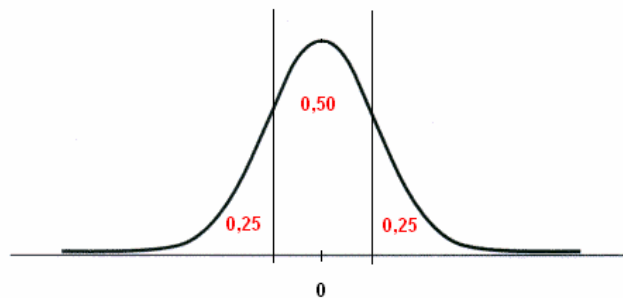


Figura 50: Intervalos da Distribuição Univariada

Na Figura 51 é ilustrada a classe 34, isto é, o ruído dos subsistemas Sudeste e Norte devem estar contidos no segundo intervalo enquanto os ruídos do Sul e do Nordeste devem pertencer ao terceiro e primeiro intervalos, respectivamente. A probabilidade teórica da classe 34 é igual a $P(-0,6745 < SE < 0,6745) * P(0,6745 < SE < \infty) * P(-\infty < NE < -0,6745) * P(-0,6745 < N < 0,6745) = 0,5 * 0,25 * 0,25 * 0,5 = 0,015625$

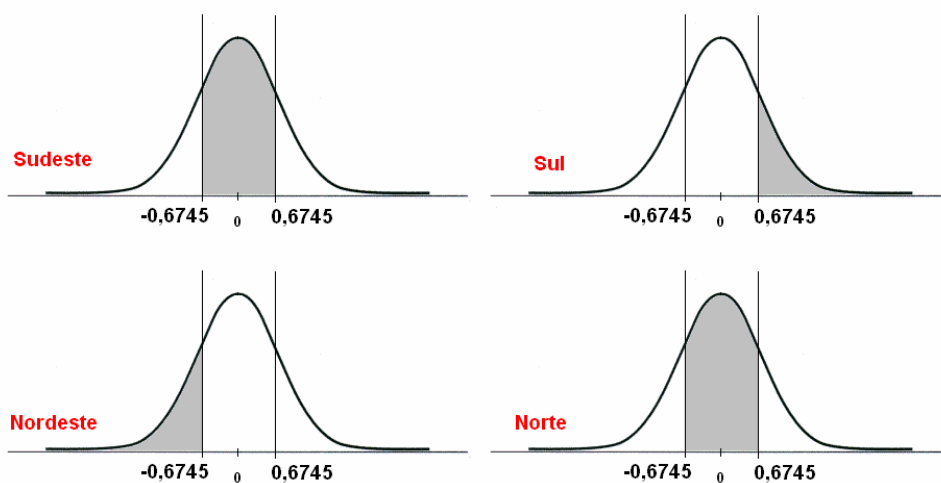
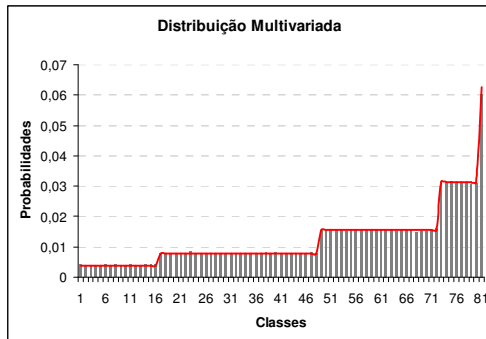
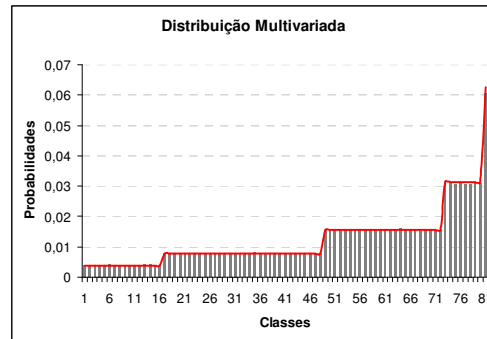


Figura 51: Exemplificação Classe 34

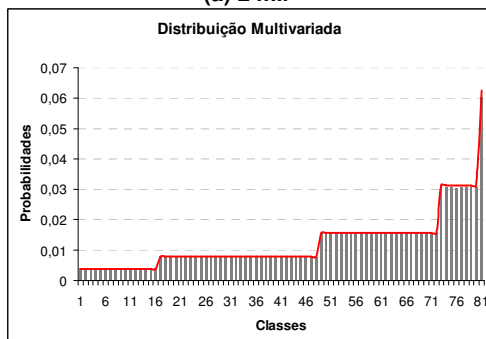
Para facilitar a visualização da distribuição multivariada, as classes são ordenadas de acordo com sua probabilidade teórica. Da Figura 52a até a Figura 52i são ilustradas as distribuições multivariadas médias para os casos considerando amostras de tamanho 2 mil a 100 mil. A linha contínua indica a probabilidade teórica da classe.



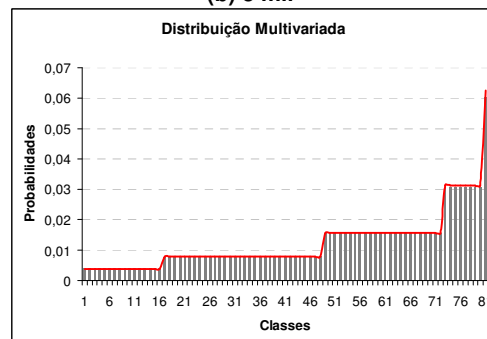
(a) 2 mil



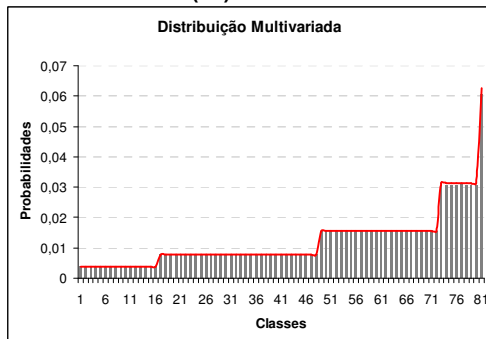
(b) 5 mil



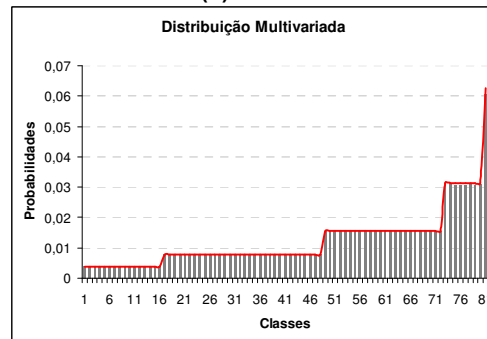
(ac) 10 mil



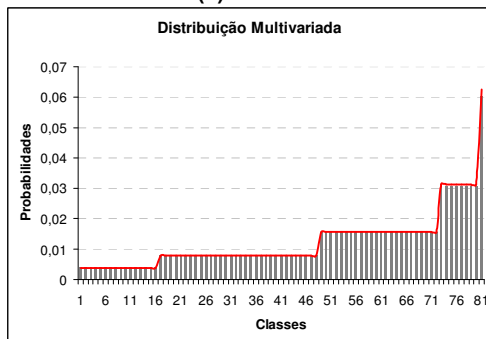
(d) 20 mil



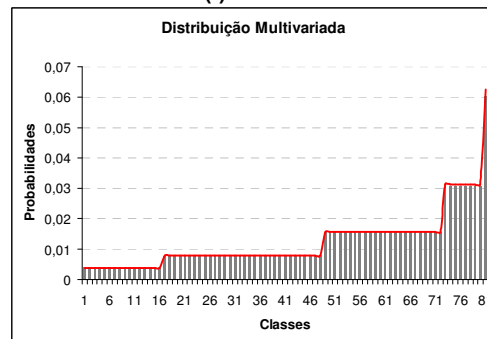
(e) 25 mil



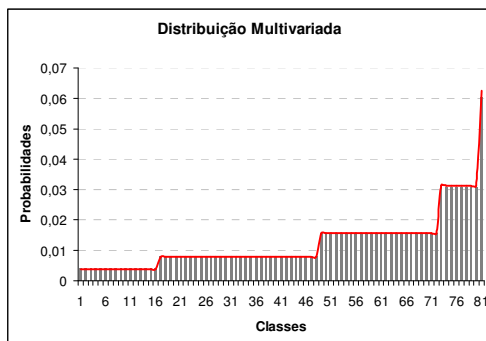
(f) 30 mil



(g) 50 mil



(h) 75 mil



(i) 100 mil

Figura 52: Distribuição Multivariada – Amostra com Tamanho 2 mil a 100 mil

Pode-se observar que a distribuição multivariada teórica é preservada satisfatoriamente independente do caso analisado.

O tempo computacional gasto durante o processo de agregação aumenta consideravelmente à medida que o número de elementos da amostra de ruídos cresce. Por exemplo, para gerar e agregar 120 amostras com tamanho 2 mil são necessários, em um micro computador Pentium duo-core 1GHz, 2 minutos. Para gerar e agregar 120 amostras com tamanho 100 mil são necessárias aproximadamente 4 horas.

De acordo com o exposto neste item, doravante é considerada a amostra de tamanho 2 mil para as demais análises realizadas neste capítulo.

7.2.2.

Amostra de ruídos utilizada na geração dos cenários do passo forward

Neste item são avaliadas as amostras de ruídos que são utilizadas para gerar os cenários hidrológicos do passo forward. São apresentados testes estatísticos para média e desvio-padrão, bem como testes de aderência e a distribuição multivariada de frequências. São testadas todas as opções de construção de árvore propostas neste trabalho, além das duas opções existentes atualmente no modelo NEWAVE. Também é testada a amostra forward resultante do processo de agregação e que dá origem à amostra forward utilizada nas opções 2 a 4.

Nesta análise é considerada uma amostra de ruídos para passo forward com tamanho igual a 200 e para passo backward igual a 20. Lembre-se que nas opções Atual e 0 a amostra de ruídos forward é proveniente de uma amostra de ruídos backward. A amostra inicial utilizada no processo de agregação é formada por 2000 vetores de ruídos.

Neste trabalho, é definido como estatística t o desvio relativo de uma estatística $\hat{\theta}$ (média, desvio padrão etc), isto é, a diferença entre a estimativa e o seu valor esperado dividido pelo desvio padrão da estimativa, conforme (7.3):

$$\frac{\hat{\theta} - \mu_{\theta}}{\sigma_{\theta}} \sim t_n \quad (7.3)$$

As estatísticas t para as estimativas da média e do desvio-padrão são apresentadas na Figura 53 e na Figura 54, respectivamente. As linhas tracejadas são os limites relativos a um nível de significância de 5%. Para cada opção analisada são considerados 480 valores (120 períodos x 4 subsistemas).

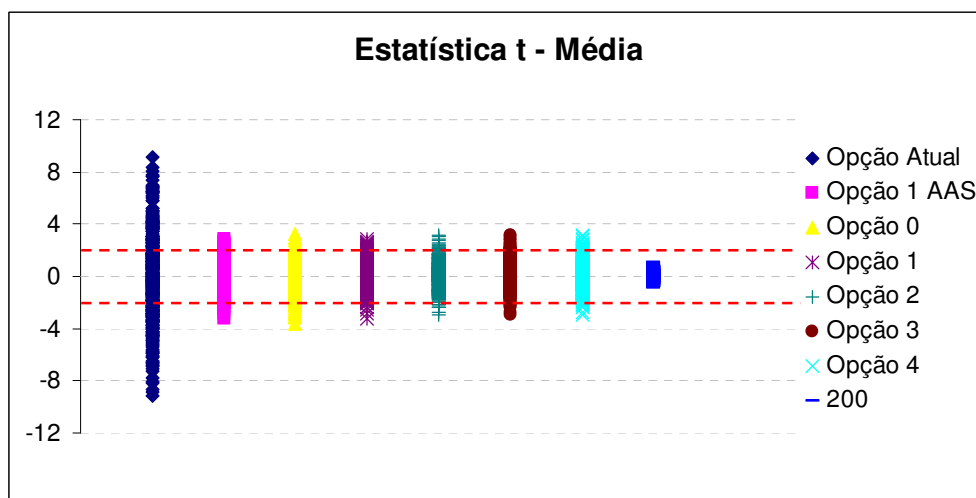


Figura 53: Estatística t – Média – Amostra Forward (ruído)

Note que a opção atual é aquela que apresenta maior dispersão com relação aos valores de população (zero no caso da média e um no caso do desvio-padrão). Isto ocorre, pois a amostra do passo forward é sorteada de uma amostra backward de tamanho reduzido, neste caso igual a 20, obtida por amostragem aleatória simples. Note que a adoção do processo de agregação para obtenção da amostra backward (opção 0) já é suficiente para reduzir essa dispersão. Todavia, pode-se notar uma tendência em gerar desvios-padrão menores do que o valor de população.

A degradação na representação do desvio-padrão ocorre, porém em menor escala, com todas as opções que utilizam o processo de agregação para obtenção, direta ou indireta, da amostra forward, conforme pode ser observado na Figura 54.

As amostras forward das opções 2 a 4 são idênticas e são obtidas a partir de um sorteio condicionado da amostra 200 (última opção apresentada na Figura 53 e na Figura 54). Como esperado, há um aumento na dispersão das estimativas, uma vez que a amostra resultante do sorteio condicionado possui menos informação.

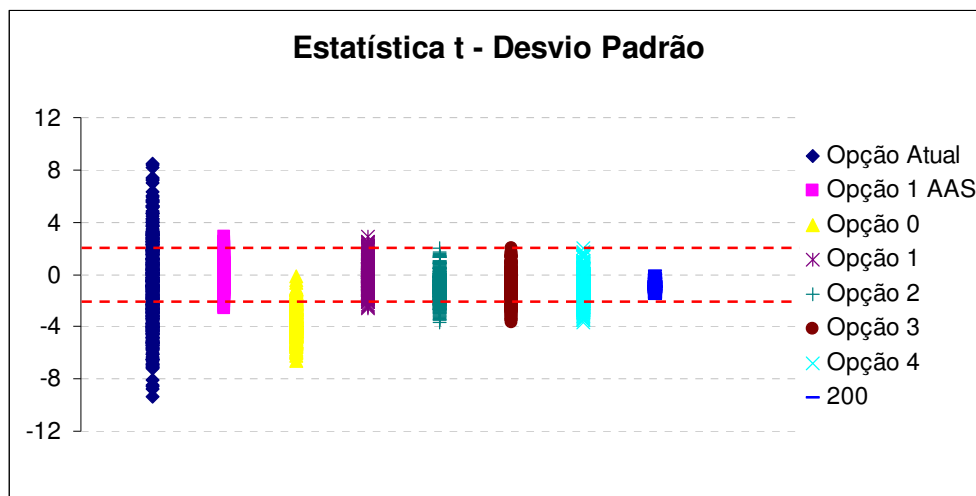
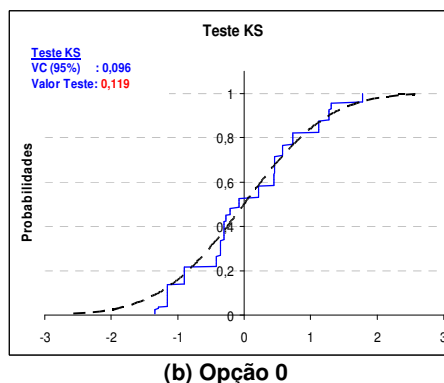
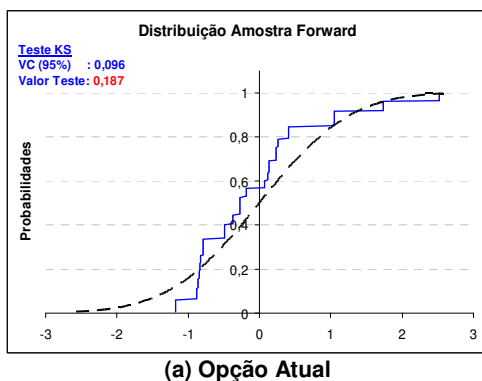


Figura 54: Estatística t – Desvio-padrão – Amostra Forward (ruído)

O teste de aderência Kolmogorov-Smirnov (Stephens, 1974) é apresentado para a distribuição univariada somente do subsistema Sudeste. Os resultados obtidos para os demais subsistemas são semelhantes. Da Figura 55a até a Figura 55e estão ilustradas as distribuições acumuladas da normal padrão (linha pontilhada) e da amostra forward (linha contínua) obtida considerando as opções em análise. O nível de significância adotado para o teste é de 5% e nos gráficos são apresentados o valor crítico e o valor obtido do teste.



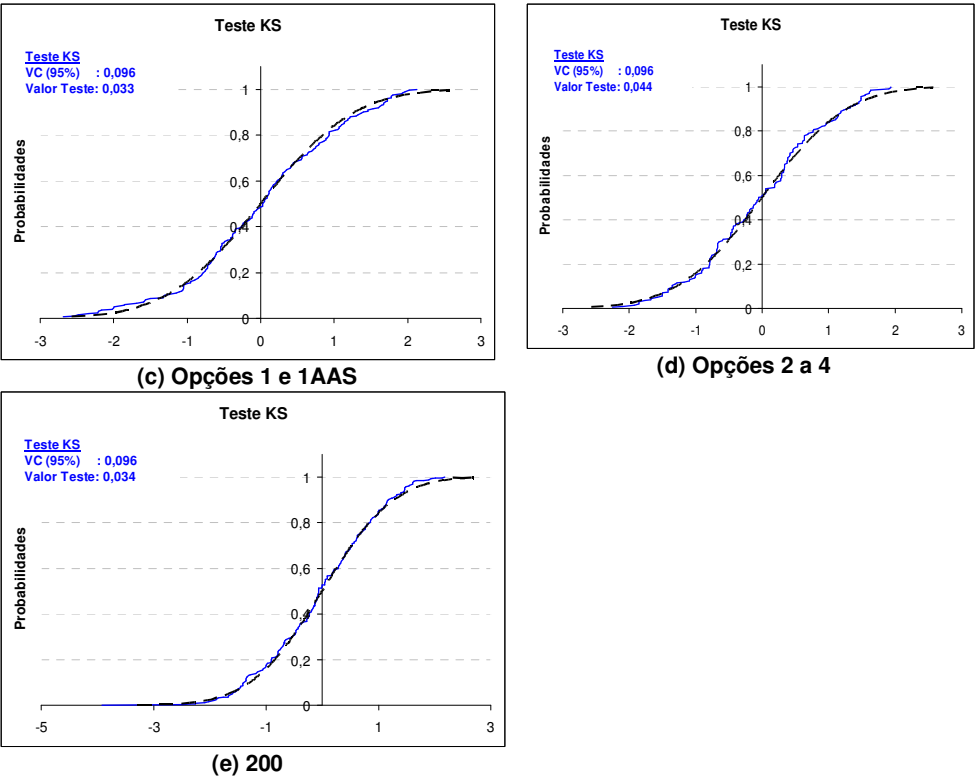
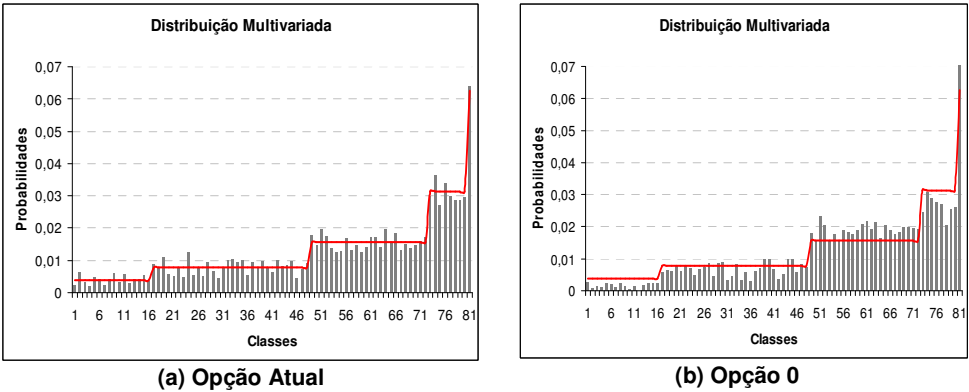


Figura 55: Teste de Aderência – Amostra Forward (ruído)

Pode-se observar que as opções Atual e 0 degradam excessivamente a distribuição da amostra forward. Nas demais opções, a distribuição normal padrão univariada é bem preservada.

Complementando, é feita uma análise da distribuição multivariada seguindo o mesmo procedimento utilizado anteriormente. Da Figura 56a até a Figura 56e são apresentadas as distribuições multivariadas para todas as opções. Novamente, nota-se uma pior representação desta distribuição no caso das opções Atual e 0, com relação às demais opções.



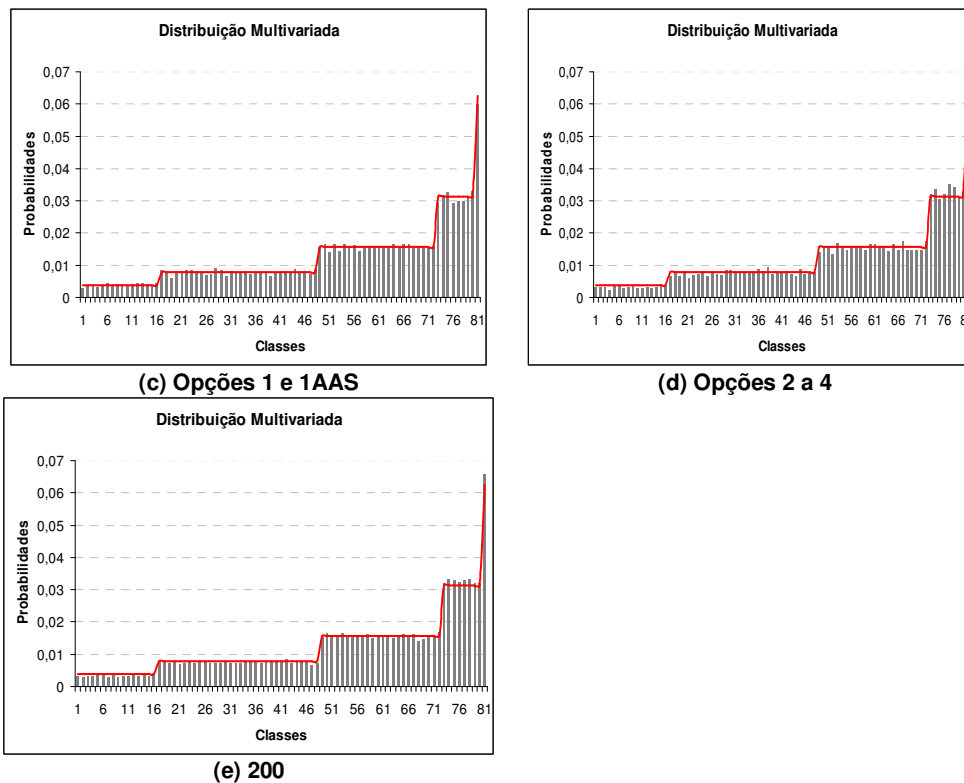


Figura 56: Distribuição Multivariada – Amostra Forward (ruído)

7.2.3.

Amostra de ruídos utilizada na geração dos cenários do passo backward

Para avaliar as amostras de ruídos que são utilizadas para gerar os cenários hidrológicos do passo backward são apresentados testes estatísticos para média e desvio-padrão, bem como testes de aderência para a distribuição univariada. A distribuição multivariada de frequências também é avaliada. São testadas todas as opções de construção de árvore propostas neste trabalho, além das duas opções existentes atualmente no modelo NEWAVE. Vale ressaltar que o procedimento para obtenção da amostra backward é o mesmo para as opções Atual e 0, logo as amostras são iguais. Nas opções 1, 0 e 4 as amostras obtidas são idênticas. Para todas as opções é analisada uma amostra de ruído backward com tamanho igual a 20.

Na Figura 57 e na Figura 58 são apresentadas as estatísticas t para a estimativa da média e do desvio-padrão. O intervalo de confiança representado pelas linhas tracejadas é calculado considerando-se um nível de significância de 5%. As opções que utilizam o processo de agregação apresentam uma dispersão menor com relação aos valores da população.

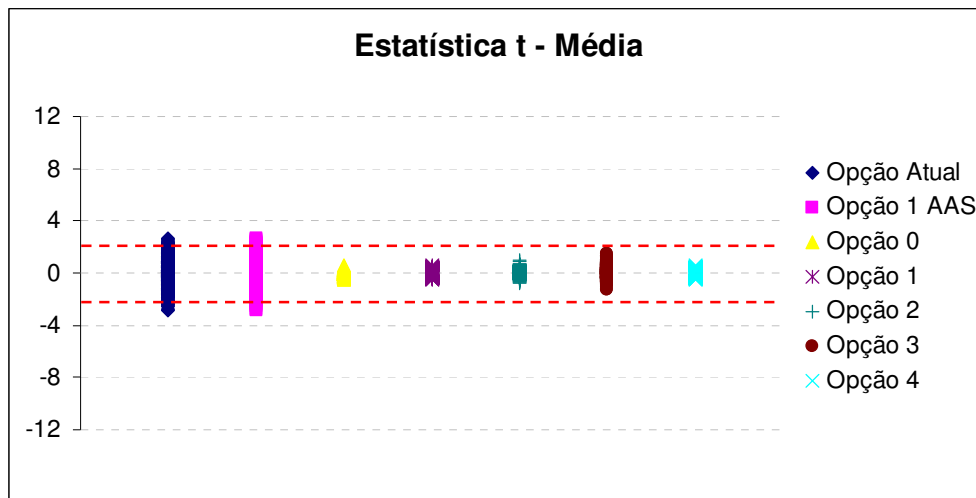


Figura 57: Estatística t – Desvio-padrão Média – Amostra Backward (ruído)

Como já observado para as amostras de ruídos forward, aqui também há uma pequena degradação no desvio-padrão quando é aplicado o processo de agregação. Há uma tendência em gerar desvios menores do que o valor desejado (igual a 1).

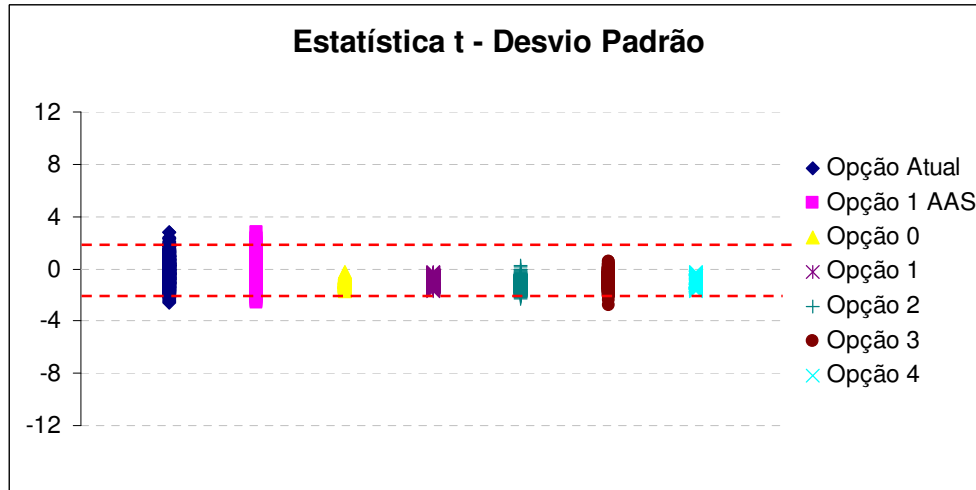
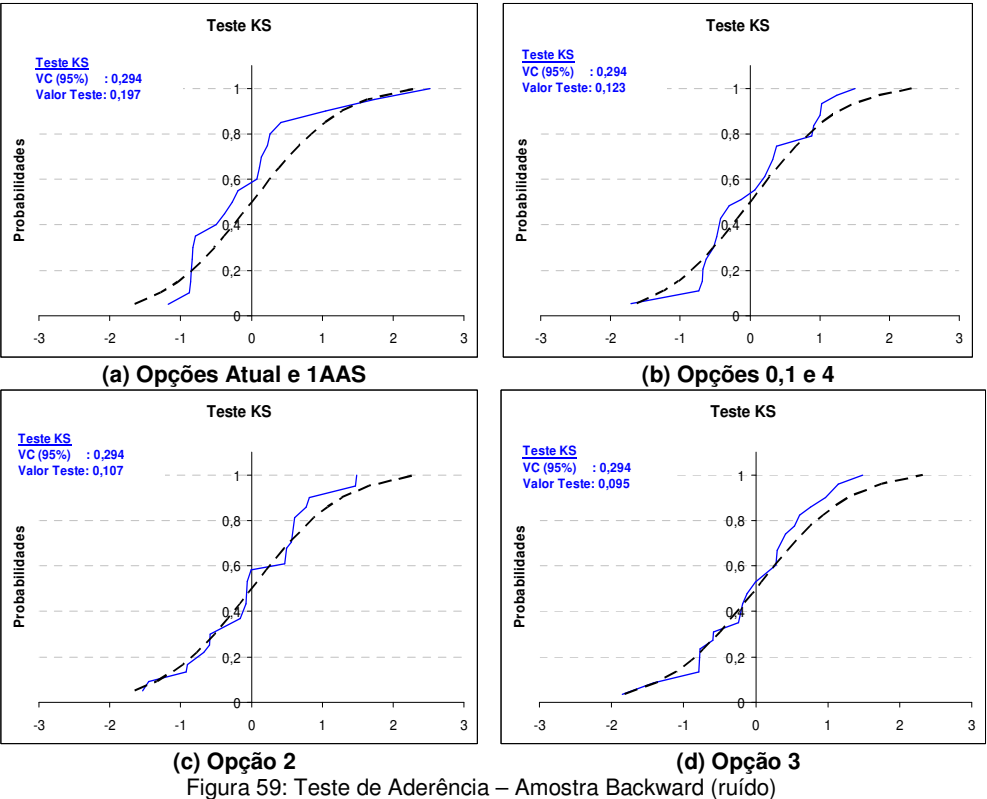


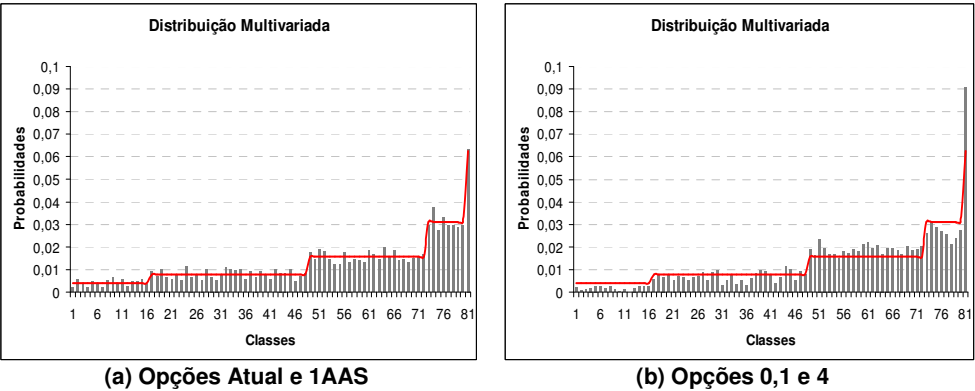
Figura 58: Estatística t – Desvio-padrão – Amostra Backward (ruído)

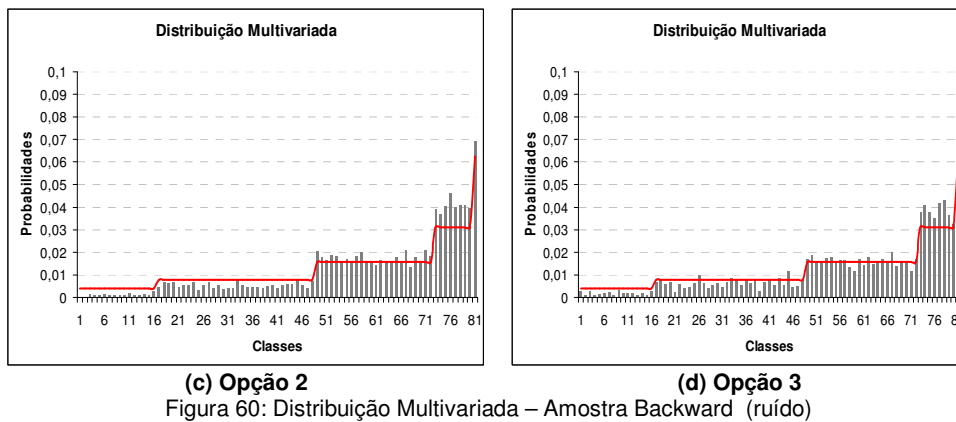
A seguir é utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov para medir a aderência entre a distribuição univariada da amostra backward e a distribuição normal padrão. Da Figura 59a até a Figura 59d são apresentadas as distribuições acumuladas de frequência para o subsistema Sudeste e os resultados do teste de aderência. Resultados semelhantes foram obtidos para os demais subsistemas.



Conforme pode ser observado na Figura 59, todas as opções analisadas passam no teste de aderência, porém pode-se verificar visualmente uma melhor aderência entre as distribuições nas opções que utilizam processo de agregação direta ou indiretamente para gerar a amostra backward.

Da Figura 60a até a Figura 60d são apresentadas as distribuições multivariadas, calculadas considerando o procedimento de cálculo já descrito nos itens anteriores.





Neste caso, as opções que preservam melhor a distribuição multivariada são as opções Atual e 1 AAS, que utilizam a amostragem aleatória simples para gerar a amostra de ruídos da backward. Contudo, à medida que o tamanho da amostra backward cresce, as distribuições multivariadas de todas as opções tendem ao valor teórico. Essas avaliações são apresentadas no próximo item.

7.2.4.

Variando o tamanho da amostra de ruídos forward e backward

Nos itens anteriores são analisadas as amostras de ruídos forward e backward com tamanho fixo, iguais a 200 e 20, respectivamente. Neste item, são analisadas amostras com diferentes tamanhos a fim de verificar a robustez das opções propostas.

7.2.4.1.

Variando o tamanho da amostra forward

São testadas variações no tamanho da amostra forward para as opções Atual, 0 e 4. A amostra forward para opção 1 AAS é idêntica à amostra da opção Atual e as amostras forward das opções 2 e 3 são idênticas à amostra da opção 4. São apresentadas avaliações somente para a amostra forward, uma vez que a geração da amostra backward não é influenciada pela amostra forward nas opções analisadas neste item.

Na Figura 61 e na Figura 62 são apresentadas as estatísticas t para as estimativas da média e desvio padrão das amostras de ruídos forward com tamanho igual a 200, 250 e 300. Mesmo aumentando o tamanho da amostra forward, os resultados obtidos para a opção Atual são bastante dispersos e a tendência observada na estimativa do desvio-padrão para opção 0 não se altera.

Já a pequena degradação no desvio-padrão verificada na opção 4 se reduz à medida que o tamanho da amostra aumenta.

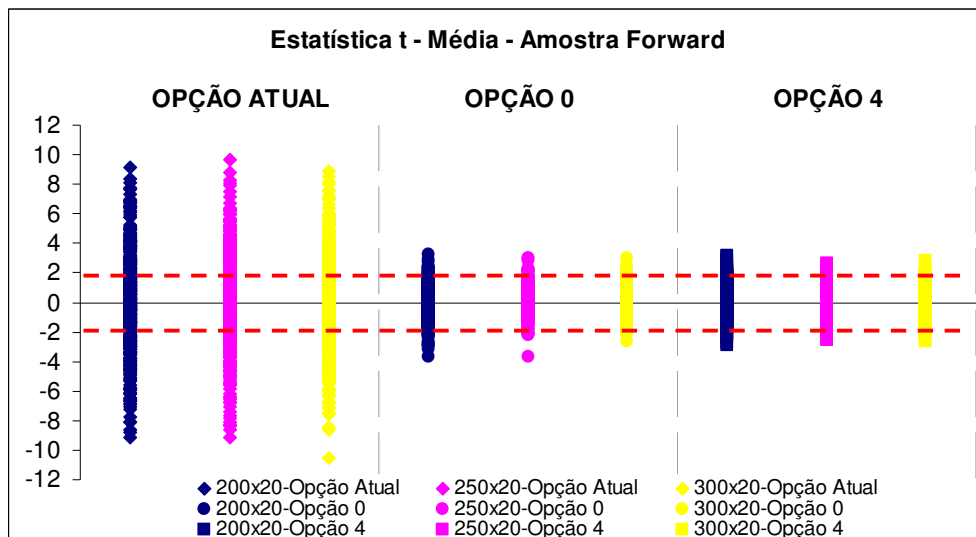


Figura 61: Estatística t – Média – Amostra Forward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Forward

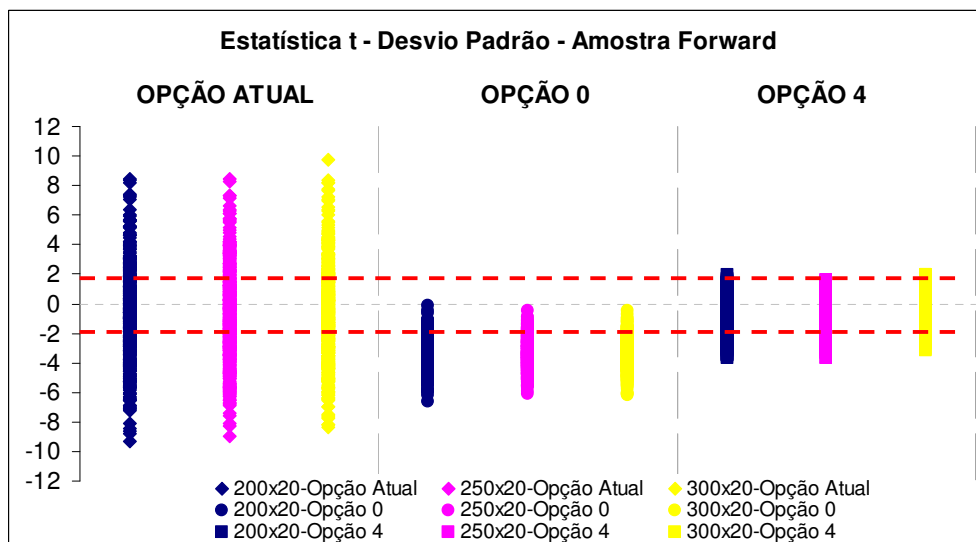


Figura 62: – Estatística t – Desvio-Padrão – Amostra Forward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Forward

Na Figura 63 e na Figura 64 são apresentadas as distribuição univariada para o subsistema Sudeste, o resultado do teste de aderência e a distribuição multivariada para opção Atual, considerando amostras forward com tamanho 250 e 300, respectivamente. Conforme o esperado, pode-se observar que o aumento do tamanho da amostra forward não traz melhoria na representatividade desta amostra, isto ocorre, pois a amostra backward, da qual é sorteada a amostra forward, permanece inalterada.

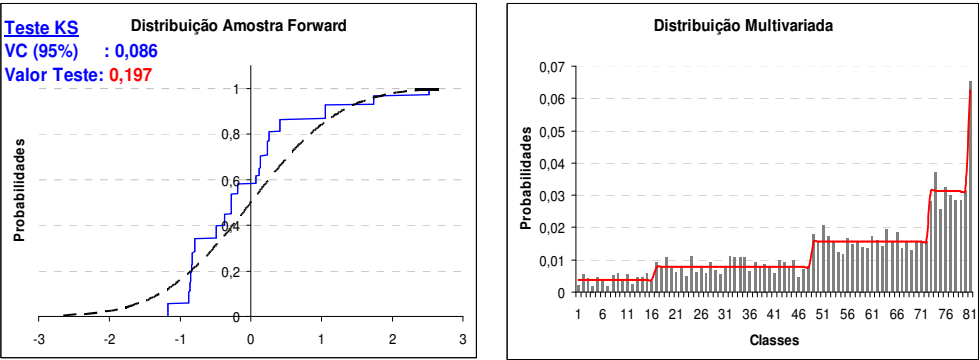


Figura 63: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 250x20 – Opção Atual

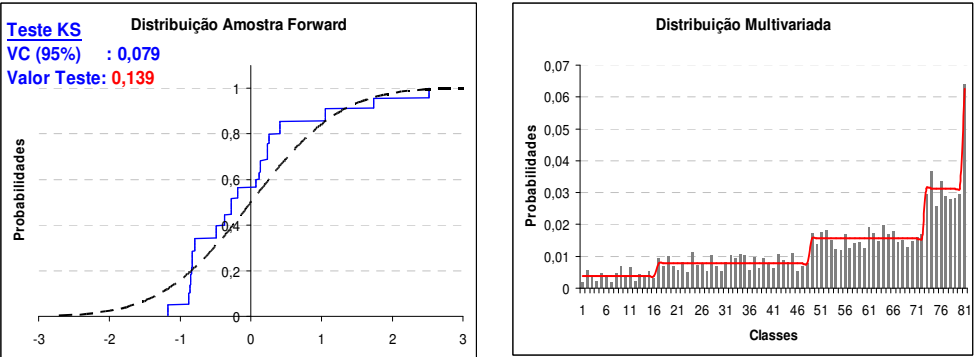


Figura 64: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 300x20 – Opção Atual

O mesmo pode ser observado na Figura 65 e na Figura 66, onde são apresentados os mesmos resultados, porém considerando-se a opção 0.

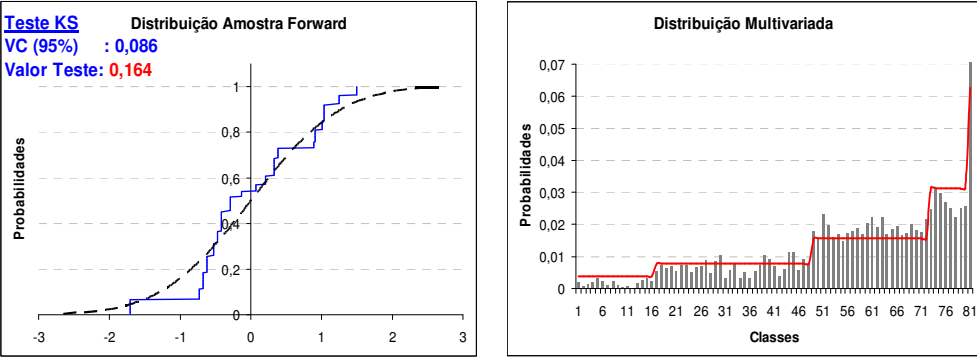


Figura 65: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 250x20 – Opção 0

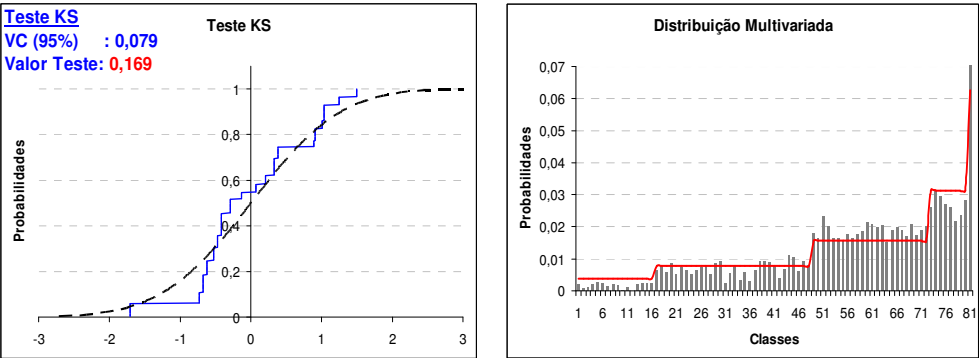


Figura 66: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 300x20 – Opção 0

Na Figura 67 e na Figura 70 são apresentadas as distribuição univariada para o subsistema Sudeste, o resultado do teste de aderência e a distribuição multivariada para opção 4, considerando amostras forward com tamanho 250 e 300, respectivamente. Observa-se o aumento do tamanho da amostra forward traz melhoria na representatividade desta amostra.

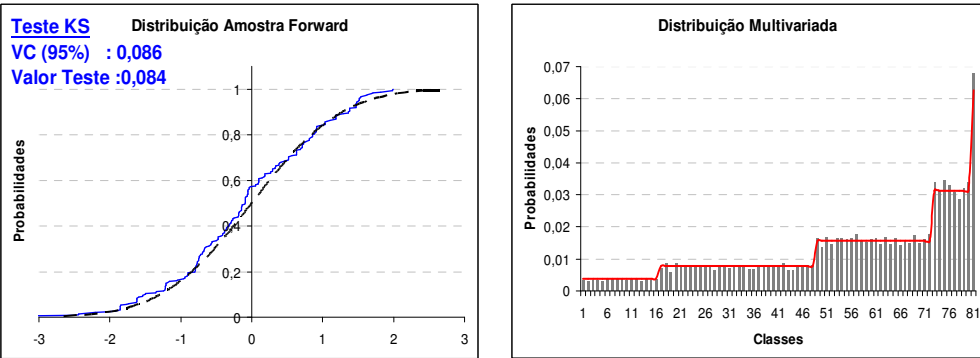


Figura 67: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 250x20 – Opção 4

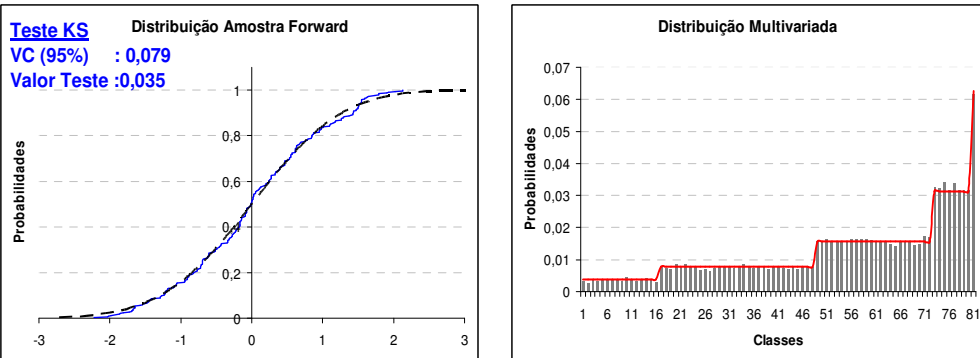


Figura 68: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – 300x20 – Opção 4

7.2.4.2.

Variando o tamanho da amostra backward

Agora são avaliadas variações no tamanho da amostra backward para as opções Atual, 0 e 4. Como a geração da amostra backward influencia na geração da amostra forward, no caso das opções Atual e 0, as análises são realizadas tanto para as amostras backward quanto forward. Vale lembrar que para esta análise o tamanho da amostra forward permanece fixo e igual a 200.

Na Figura 69 e na Figura 70 são apresentadas as estatísticas t para as estimativas da média e desvio-padrão para amostras backward com tamanho iguais a 20, 50 100. A amostra backward das opções 0 e 4 são idênticas. Observe que para todas as opções há uma redução na dispersão das estimativas à medida que o tamanho da amostra backward aumenta.

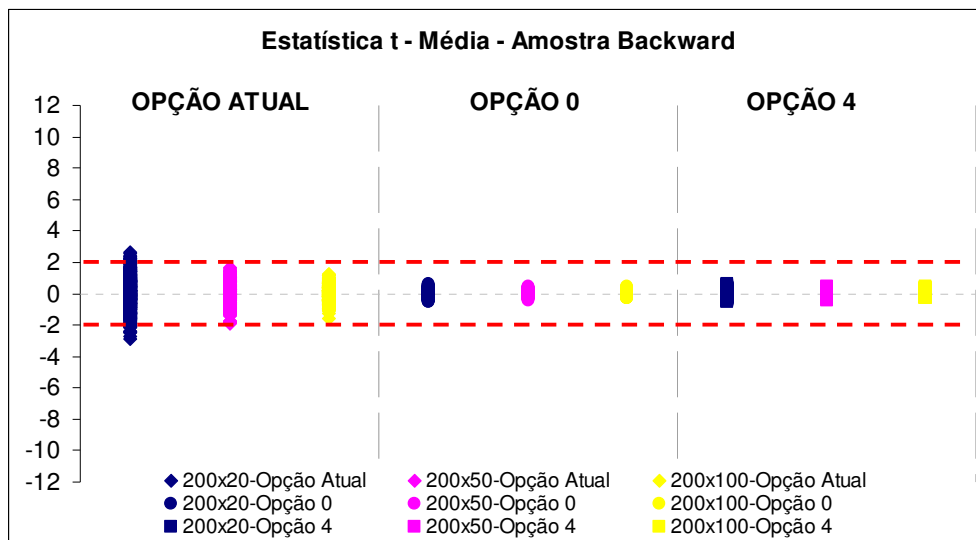


Figura 69: Estatística t –Média – Amostra Backward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Backward

Esse ganho é bastante significativo com relação ao desvio-padrão, note que a degradação com relação ao valor de população se reduz para as opções que utilizam o processo de agregação.

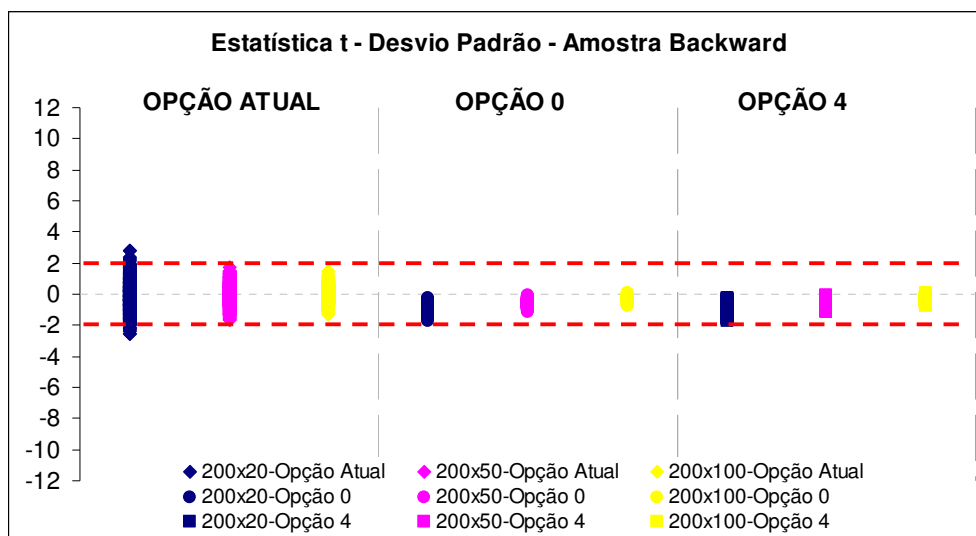


Figura 70: Estatística t –Desvio-Padrão – Amostra Backward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Backward

Na Figura 71 e na Figura 72 são apresentados resultados das mesmas análises, porém considerando as amostras de ruído forward. Para a opção Atual há uma redução na dispersão das estimativas uma vez que a amostra backward que dá origem à amostra forward fica mais robusta. Com relação à opção 4, conforme o esperado, não se verifica nenhum ganho ao aumentar o tamanho da amostra backward, pois a amostra forward é obtida de forma independente.

A estimativa média praticamente não se altera para opção 0, indicando que uma amostra com 20 valores obtidos com agregação fornece a mesma representatividade que uma amostra com 100 valores também obtida pelo processo de agregação. Porém, há ganho na representação da estimativa do desvio-padrão, o que era esperado pois quanto maior a amostra resultante de um mesmo processo de agregação, menor é a degradação do desvio-padrão.

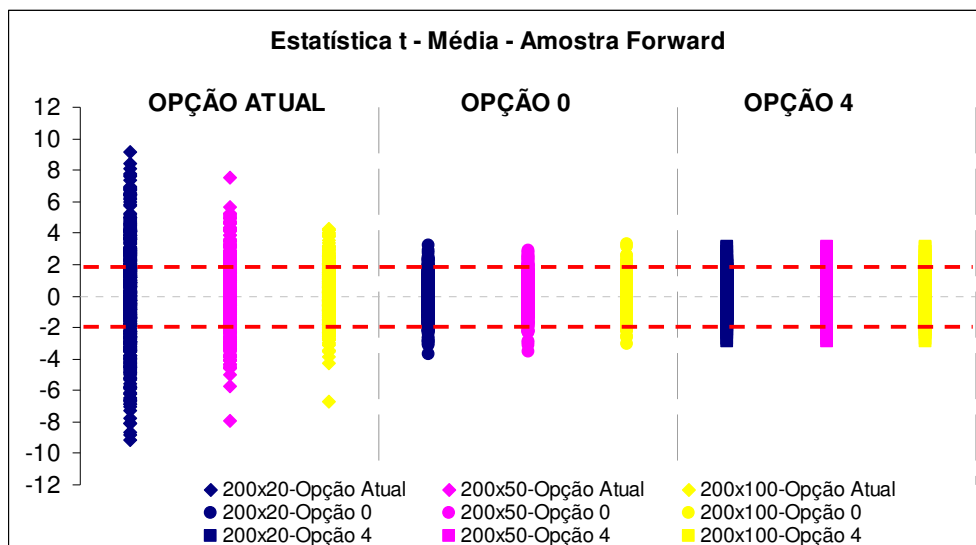


Figura 71: Estatística t –Média – Amostra Forward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Backward

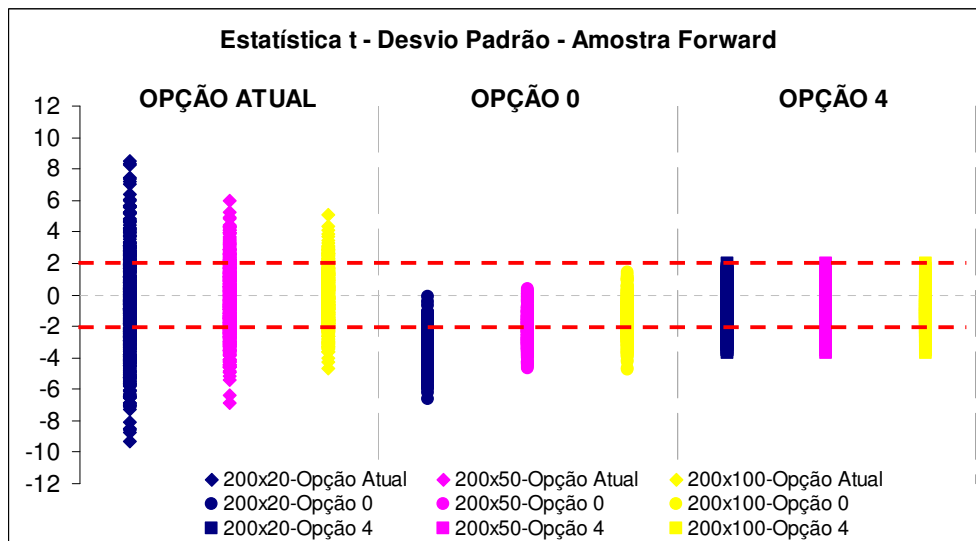


Figura 72: Estatística t –Desvio-Padrão – Amostra Forward (ruído) – Variando Tamanho Amostra Backward

Na Figura 73 e na Figura 74 são apresentadas as distribuição univariada para o subsistema Sudeste, o resultado do teste de aderência e a distribuição multivariada para opção Atual, considerando amostras backward com tamanho 50 e 100, respectivamente. Pode-se observar uma melhor aderência entre as distribuições teórica e calculada à medida que o tamanho da amostra backward aumenta.

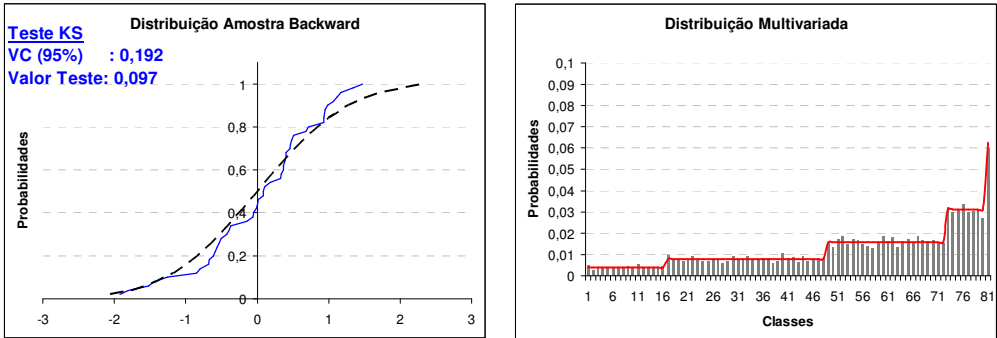


Figura 73: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – 200x50 – Opção Atual

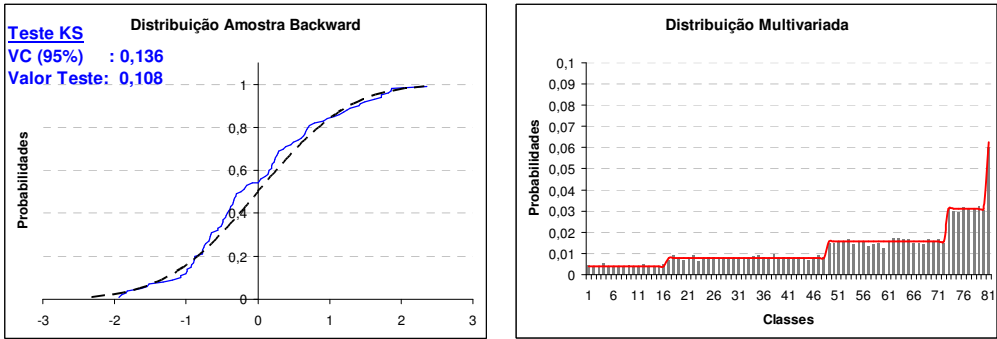


Figura 74: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – 200x100 – Opção Atual

O mesmo pode ser verificado na Figura 75 e na Figura 76, onde são apresentados os mesmos resultados, porém considerando-se as opções 0 e 4. Pode-se observar que a distribuição univariada da amostra obtida utilizando processo de agregação continua sendo mais aderente à distribuição teórica.

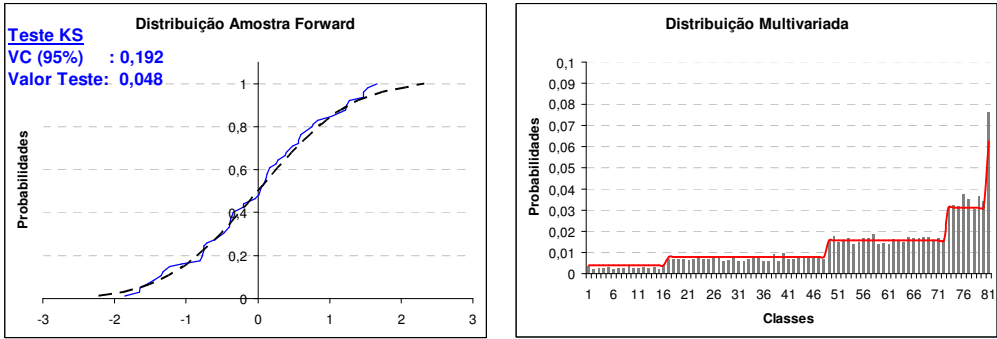


Figura 75: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – 200x50 – Opção 0 e 4

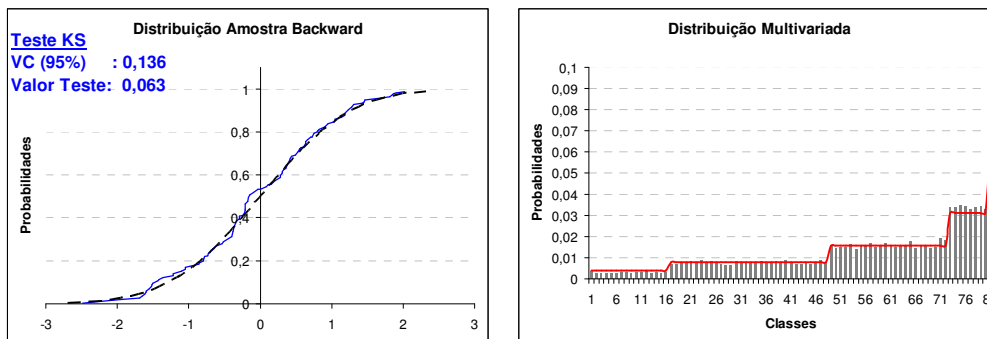


Figura 76: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – 200x100 – Opção 0 e 4

7.2.5.

Amostra de ruídos utilizando LHC e AD

Neste item são comparados os resultados obtidos empregando os métodos de amostragem AAS, LHC e AD no processo de geração das amostras de ruídos backward e forward. O tamanho das amostras são fixos e iguais a 200 para forward e 20 para backward.

Na Figura 77 e na Figura 78 são apresentadas as estimativas para média e desvio-padrão, assim como um intervalo de confiança construído considerando um nível de significância de 5%, para a amostra forward. Como era esperado, os métodos LHC e AD apresentam uma menor dispersão com relação aos valores de população.

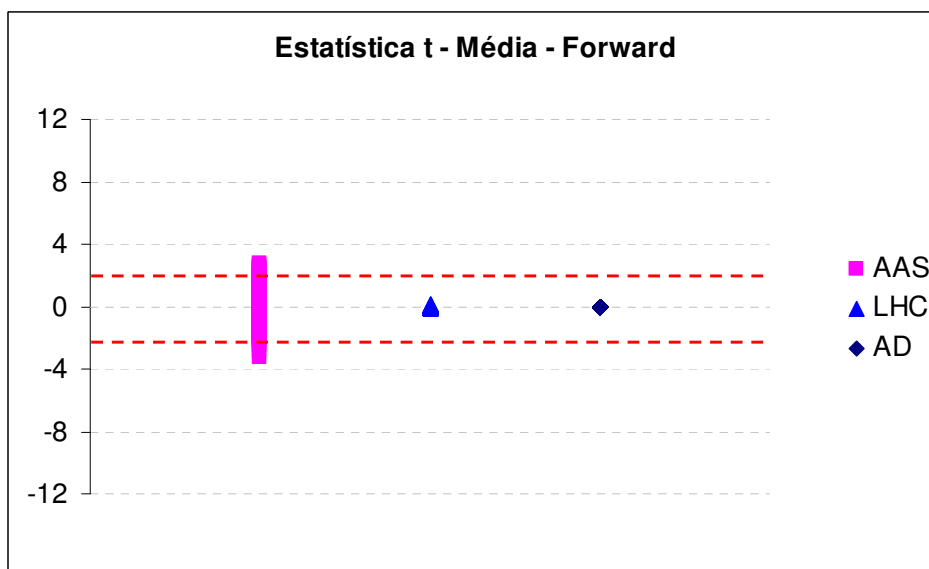


Figura 77: Estatística t – Média – Amostra Forward (ruído) – Variando Método Amostragem

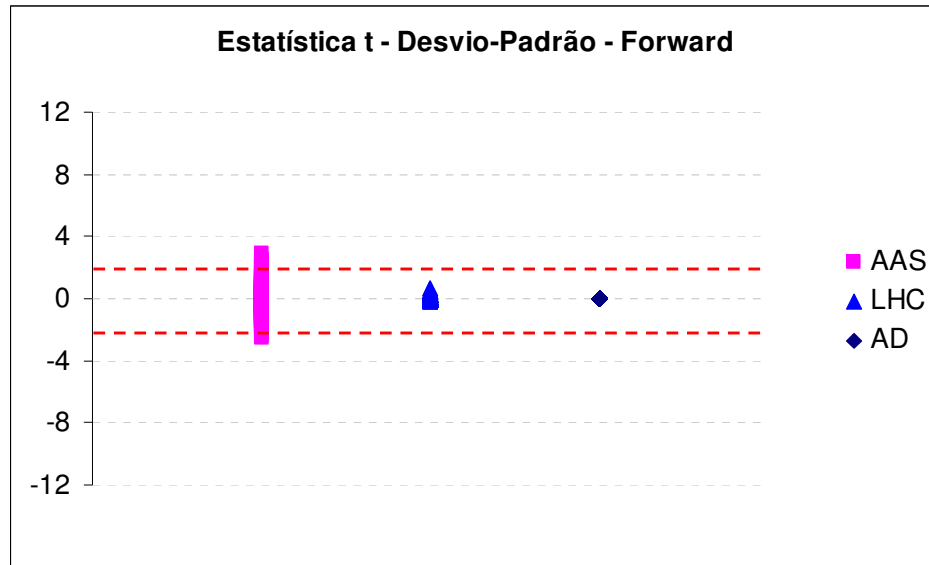


Figura 78: Estatística t – DP – Amostra Forward (ruído) – Variando Método Amostragem

Análise semelhante é realizada para amostra backward e mostrada na Figura 79 e na Figura 80. Novamente a dispersão das estimativas com relação aos valores de população são maiores no caso AAS.

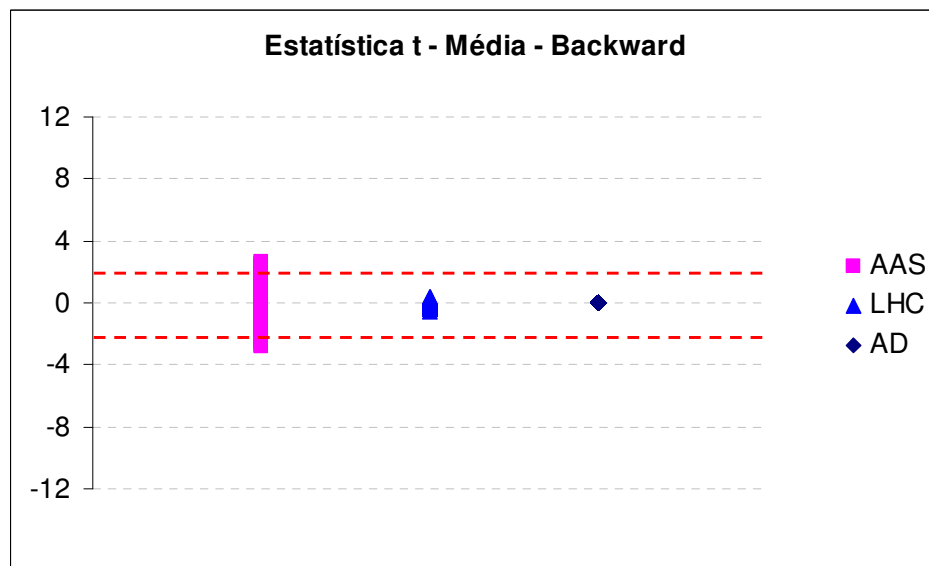


Figura 79: Estatística t – Média – Amostra Backward (ruído) – Variando Método Amostragem

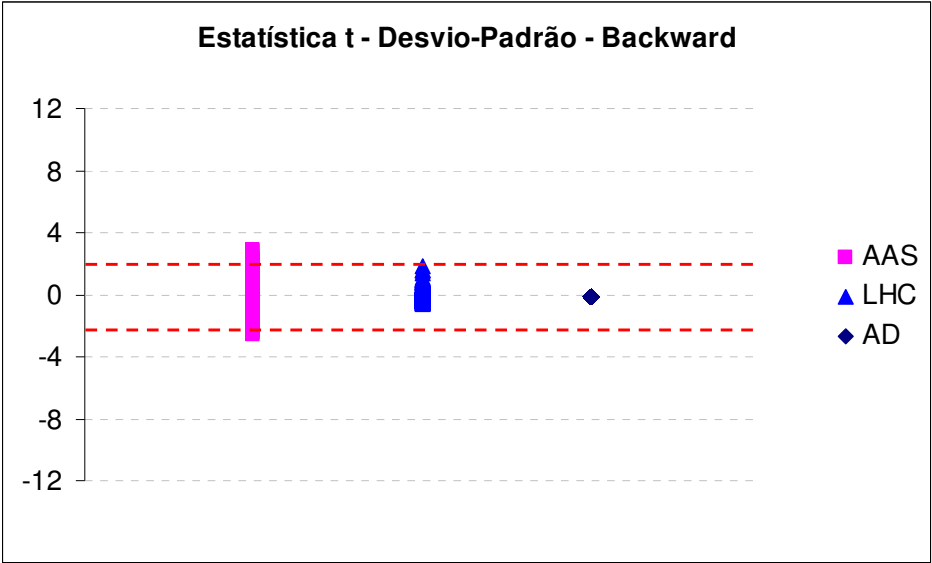


Figura 80: Estatística t – DP – Amostra Backward (ruído) – Variando Método Amostragem

As distribuições univariadas e multivariadas e o teste de aderência para as amostras forward e backward, considerando LHC e AD, são apresentadas da Figura 81 até a Figura 84. As distribuições univariadas das amostras forward geradas com as opções LHC e AD são tão aderentes quanto a amostra gerada com AAS (Figuras 55c e 56c), porém para as amostras backward, os métodos LHC e AD apresentam uma aderência bem superior àquela obtida com AAS (Figuras 59a e 60a). As distribuições multivariadas são preservadas de forma satisfatória nos três métodos de amostragem analisados.

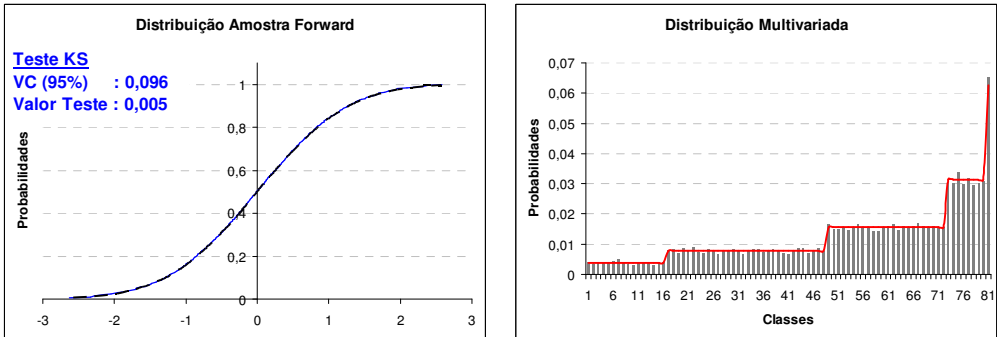


Figura 81: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – LHC

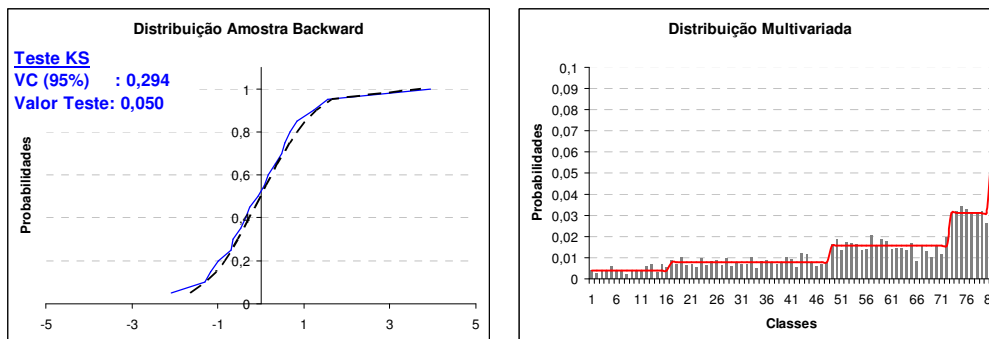


Figura 82: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – LHC

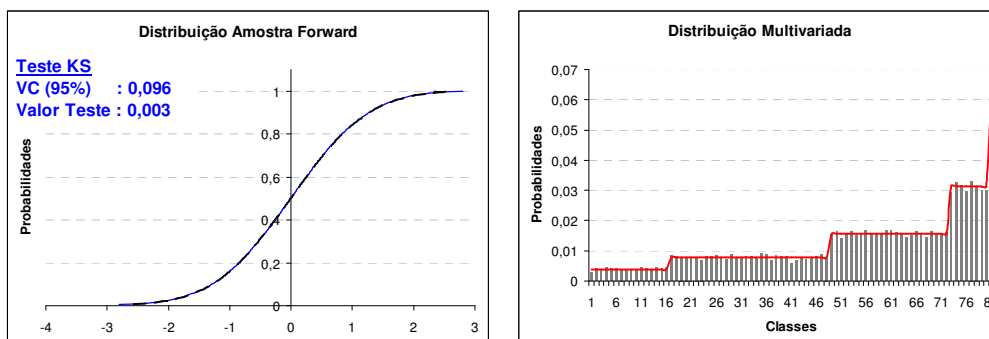


Figura 83: Distribuição – Amostra Forward (ruído) – AD

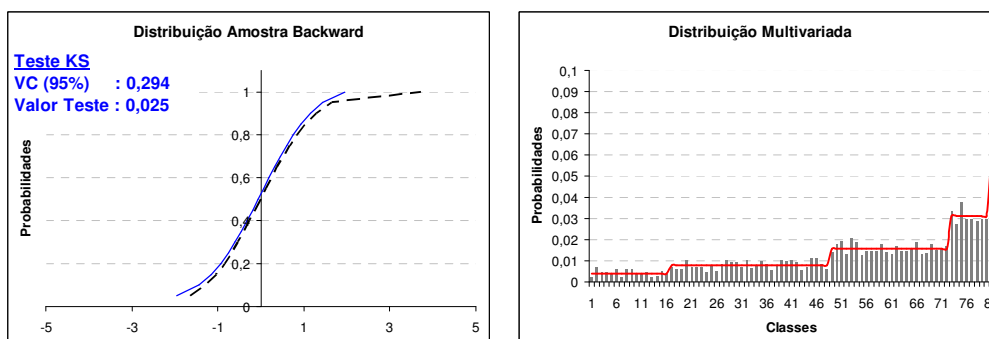


Figura 84: Distribuição – Amostra Backward (ruído) – AD

7.3.

Análise dos Cenários Gerados para Passo Forward

Neste item é apresentada uma avaliação dos cenários hidrológicos obtidos para o passo forward a partir da utilização das opções descritas no trabalho, além dos métodos de amostragem LHC e AD. Nesta análise são considerados 200 cenários forward e 20 cenários backward, e para o processo de agregação é fornecida uma amostra de 2000 vetores de ruídos.

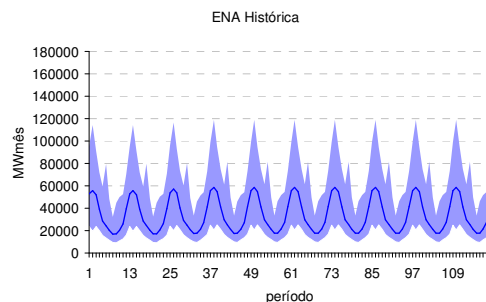
São utilizados testes não condicionados para a avaliação da capacidade de preservação das estatísticas média, desvio-padrão e correlação cruzada, e testes para verificação da aderência entre as distribuições gerada e histórica.

Inicialmente é realizada uma comparação entre as envoltórias dos cenários hidrológicos históricos e gerados com todas as opções descritas.

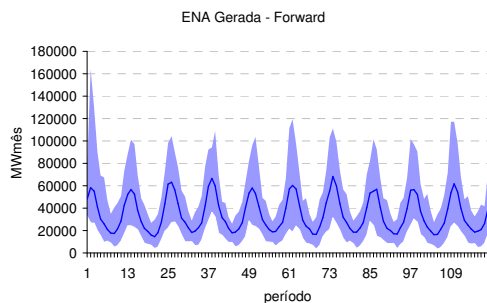
7.3.1.

Envoltória dos Cenários

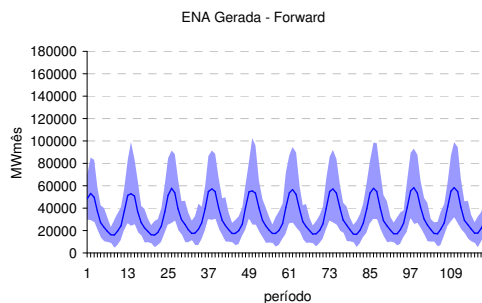
Na Figura 85b até a Figura 85g são mostradas as envoltórias e os valores médios dos 200 cenários gerados de energia natural afluente para o subsistema Sudeste. A envoltória da série histórica é apresentada na Figura 85a. Observa-se que todas as opções de geração avaliadas são capazes de reproduzir bem o histórico. As opções Atual e LHC apresentam um valor máximo bem maior que o histórico para o mês de fevereiro do primeiro e sexto anos, respectivamente. Por se tratar de apenas um cenário atípico, o valor da média não é muito afetado.



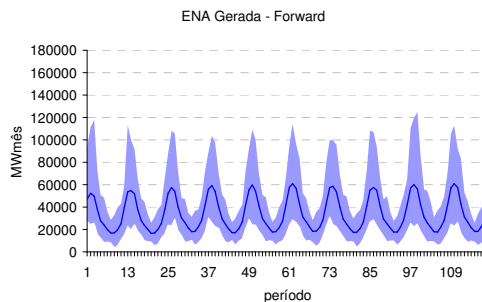
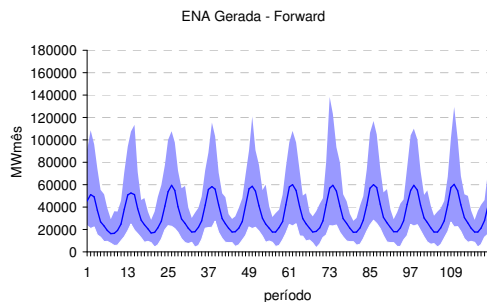
(a) Histórico

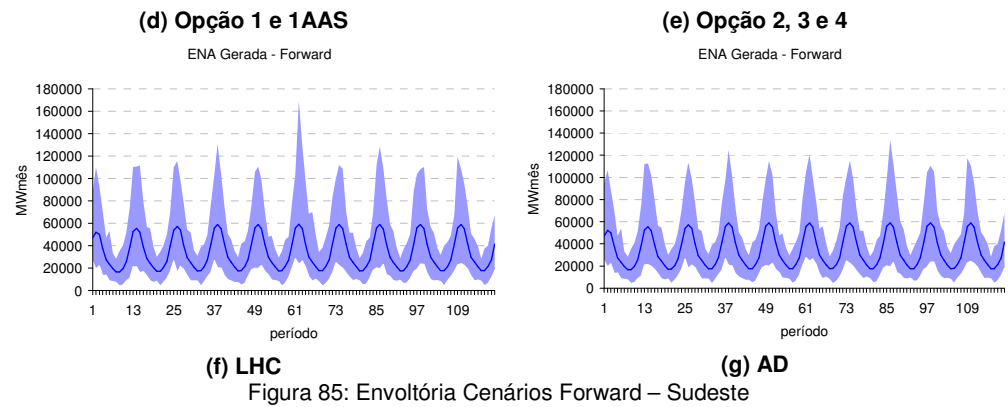


(b) Opção Atual



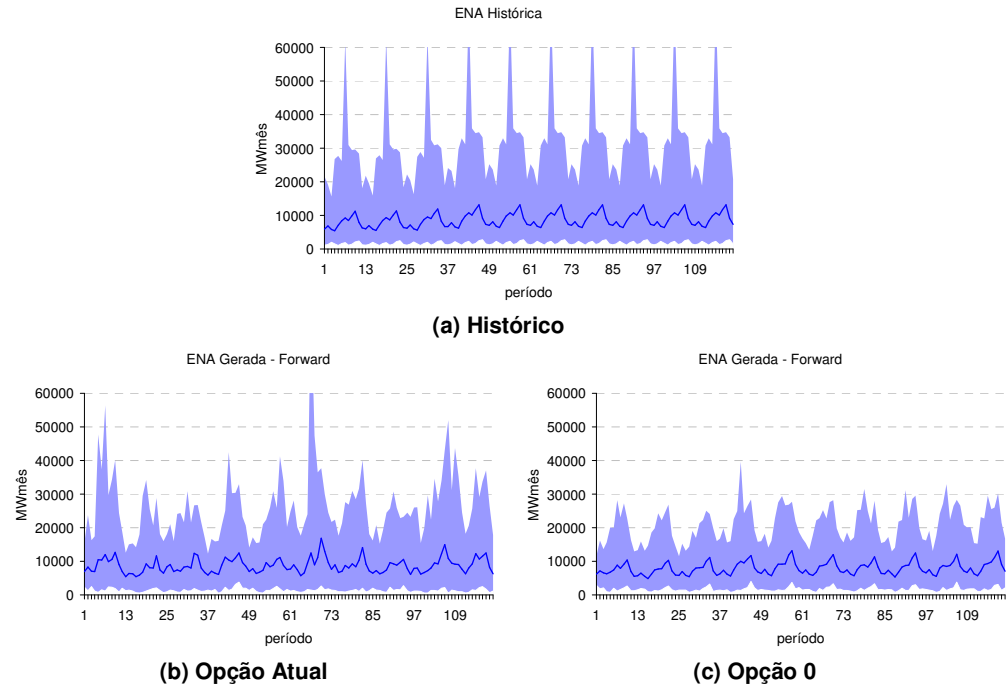
(c) Opção 0





Na Figura 86b até a Figura 86g são apresentadas as envoltórias e os valores médios para o subsistema Sul, assim como seu valor histórico, Figura 86a. O Sul é o subsistema que apresenta maior variabilidade no seu comportamento hidrológico, seu coeficiente de variação mensal é bem próximo de um. O valor máximo de ENA observado no Sul foi no mês de julho de 1983, quando ocorreu uma grande cheia na região. Excluindo o valor máximo de julho, pode-se observar que as opções 2, 3, 4, LHC e AD são as que mais se aproximam da envoltória histórica.

Note que o valor médio dos cenários gerados não é preservado de maneira satisfatória pela Opção Atual.



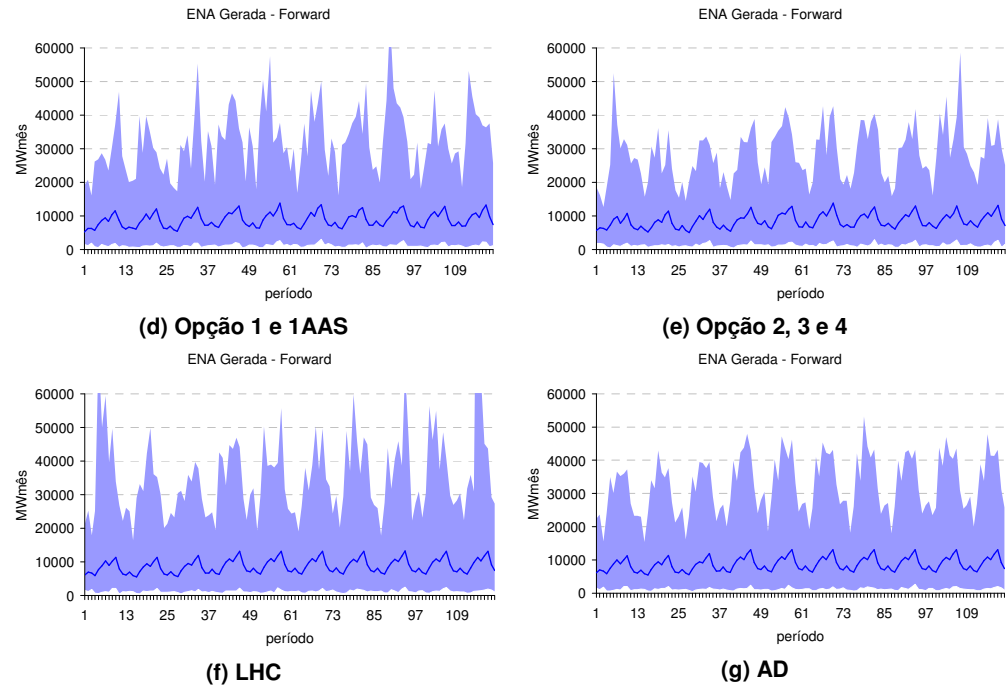
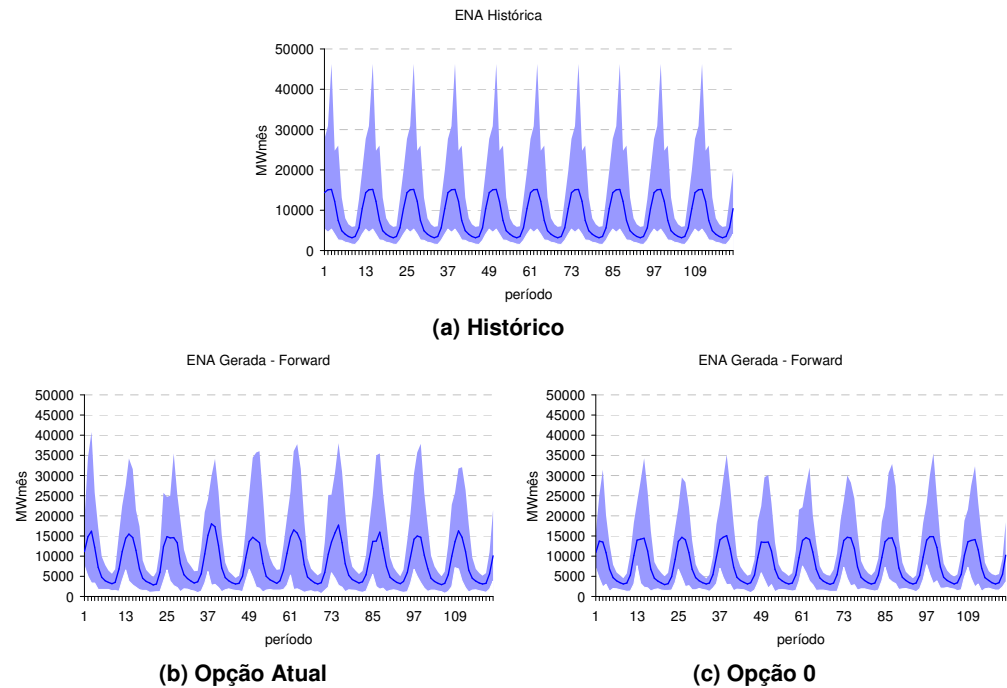


Figura 86: Envoltória Cenários Forward – Sul

A mesma análise é realizada para o subsistema Nordeste, Figura 87a até a Figura 87g. Todas as opções analisadas preservam de forma satisfatória a envoltória histórica. A opção 0 apresenta dificuldade em preservar valores mais elevados.



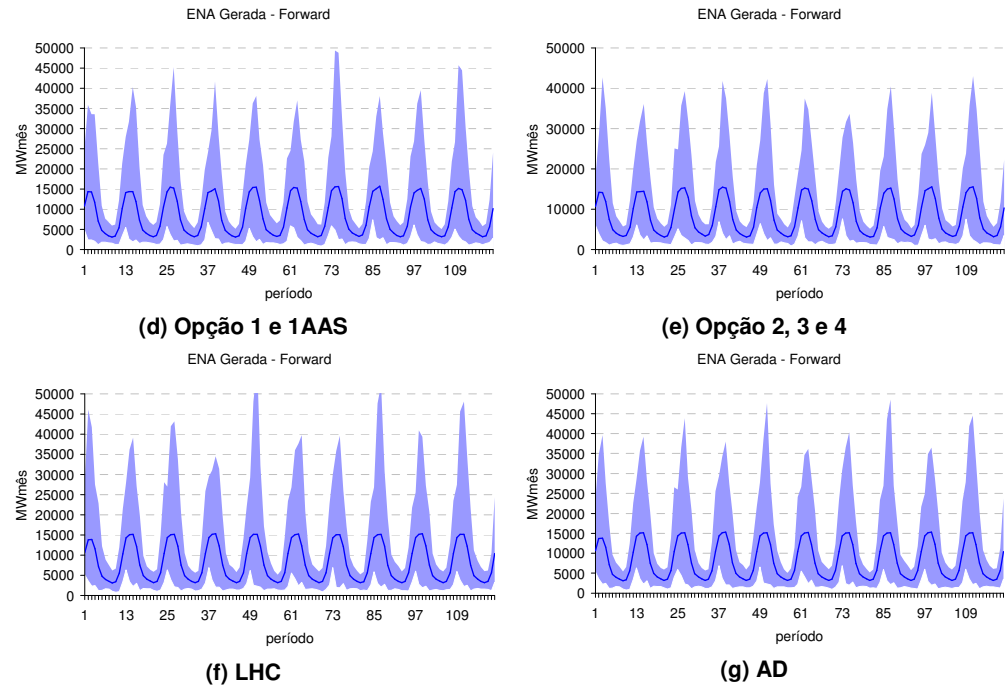
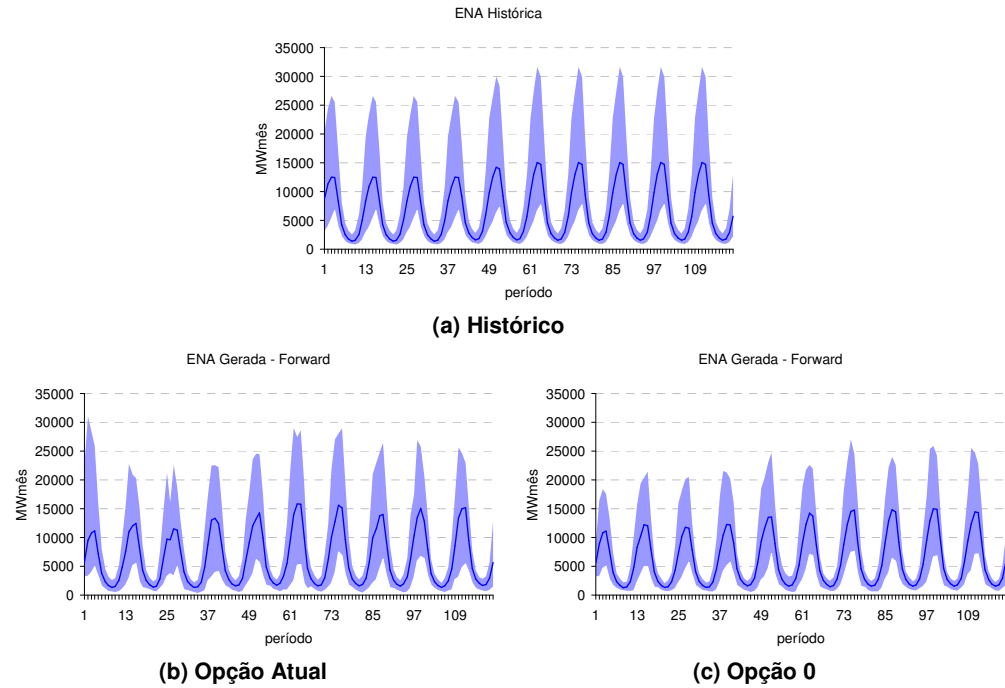


Figura 87: Envoltória Cenários Forward – Nordeste

Novamente, todas as opções analisadas são capazes de reproduzir satisfatoriamente a envoltória histórica do subsistema Norte, Figura 88a até Figura 88g, exceto a opção 0 com relação a valores superiores a 25000 MWmês.



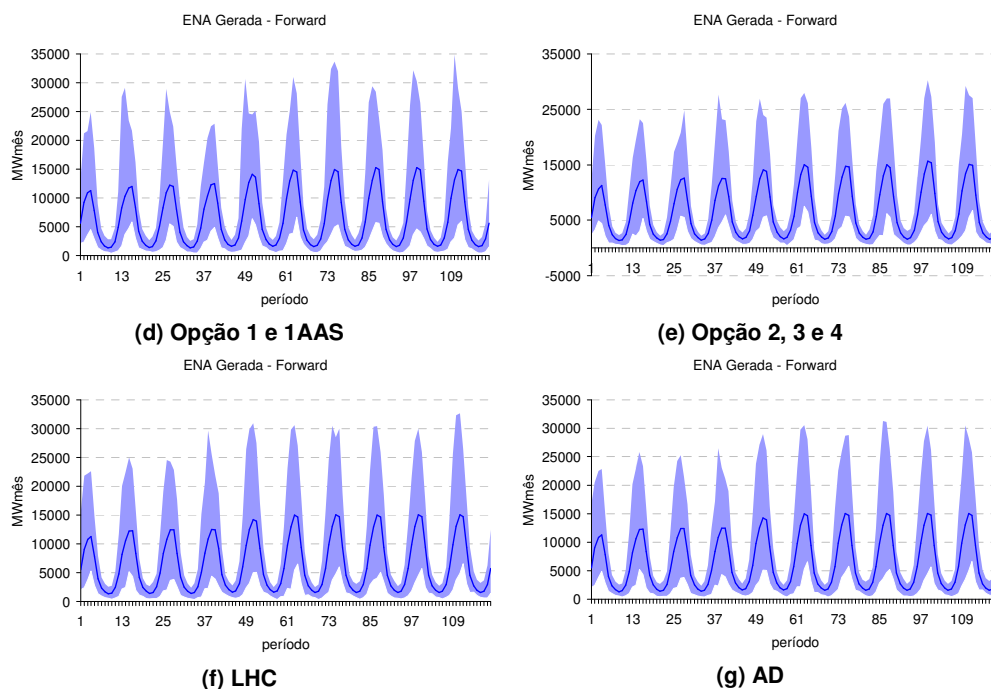


Figura 88: Envolvória Cenários Forward – Norte

7.3.2.

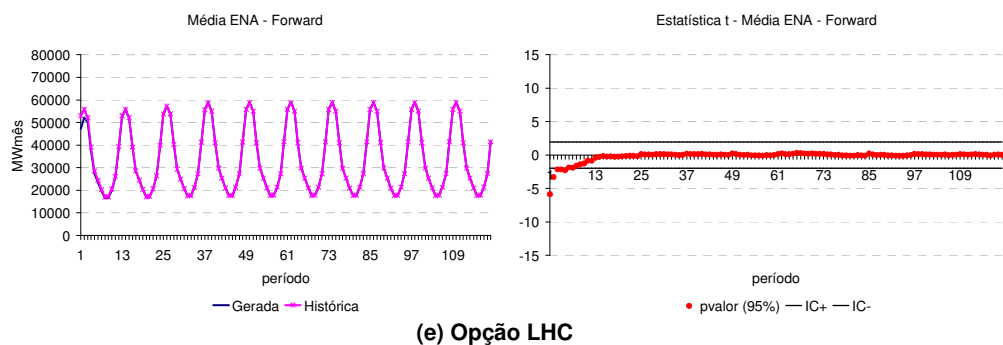
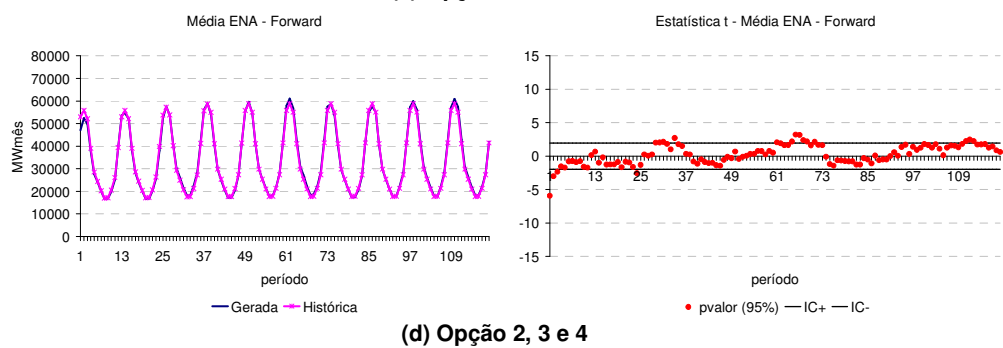
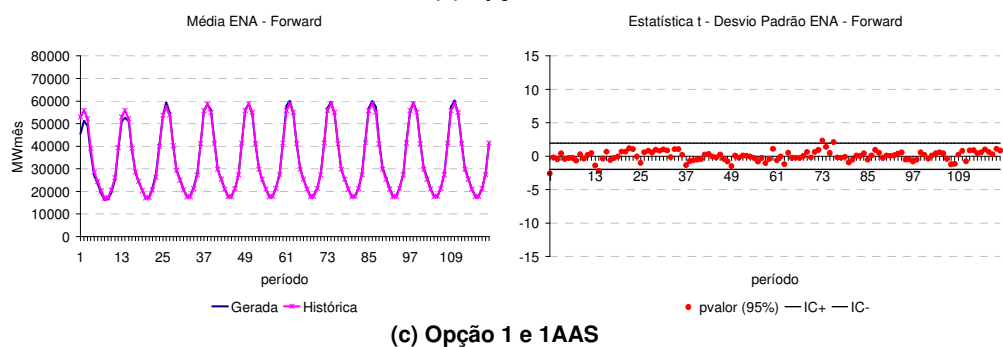
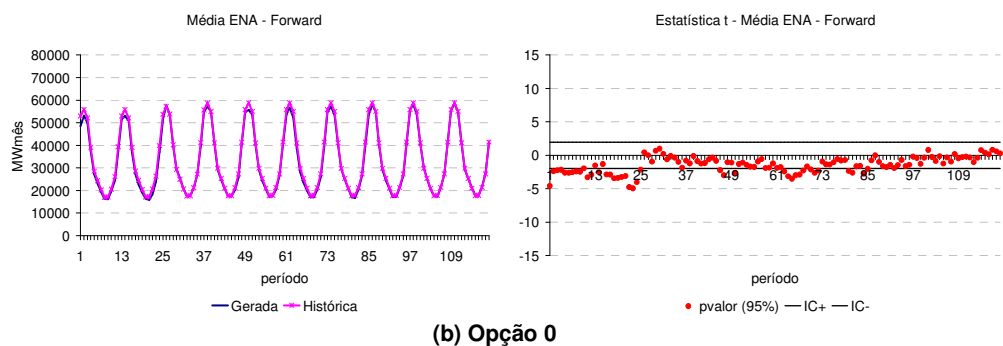
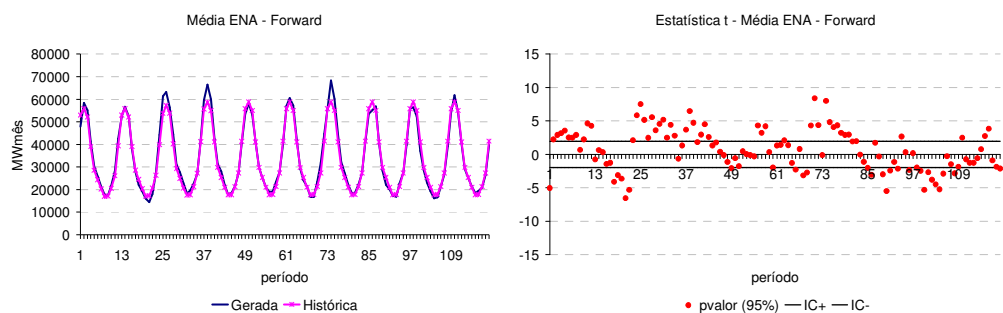
Média dos Cenários

Neste item é realizada uma análise mais detalhada da média dos cenários hidrológicos. O nível de significância do teste é de 5% e como parâmetros de população são considerados os valores históricos (testes não condicionados). Na Figura 89 são apresentadas a evolução temporal da média histórica e dos cenários gerados e a estatística t desta estimativa, para o subsistema Sudeste.

Os cenários gerados para os primeiros períodos são fortemente condicionados ao passado recente (tendência hidrológica recente). Desta forma, as médias dos primeiros períodos diferem do valor histórico, uma vez que o passado recente é diferente da MLT, conforme mostrado na Figura 46.

Analisando a Figura 89a, observa-se que a Opção Atual é aquela que apresenta maior variabilidade com relação à média. Essa variabilidade é reduzida quando se aplica técnicas de agregação tanto na obtenção da amostra backward (opção 0), quanto na obtenção da amostra forward (opções 2,3 e 4). Figura 89b e Figura 89d.

Comparando as opções 1/1AAS, LHC e AD, verifica-se que as técnicas de amostragem estratificadas reduzem de sobremaneira a variabilidade da estimativa da média.



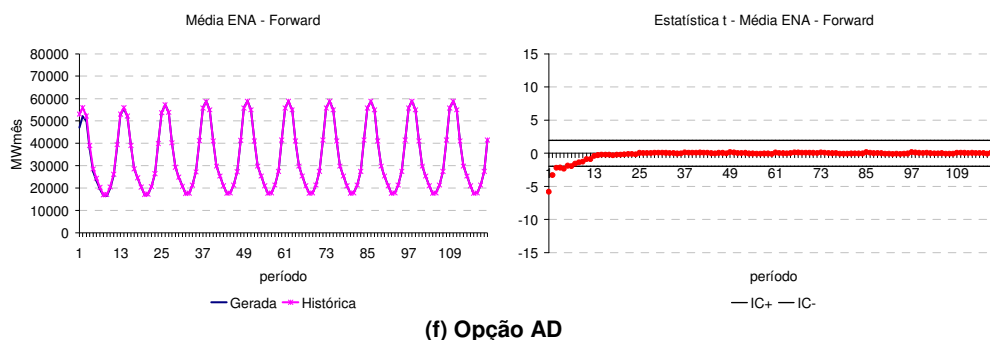


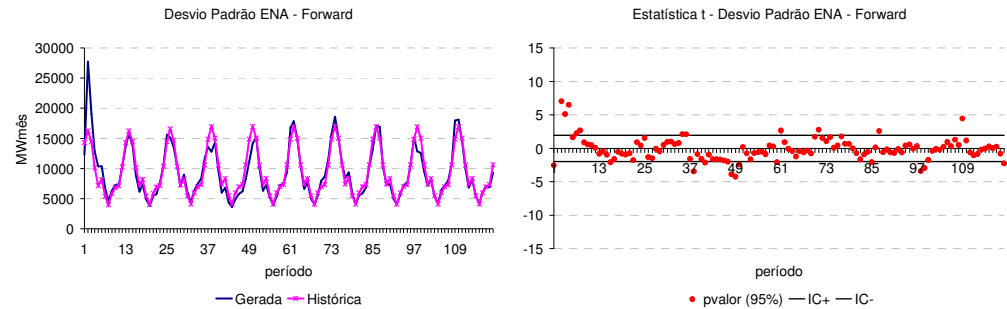
Figura 89: Média Cenários Forward – Sudeste

O comportamento observado para os demais subsistemas é bastante semelhante. Os resultados obtidos para os demais subsistemas são apresentados no Anexo B.

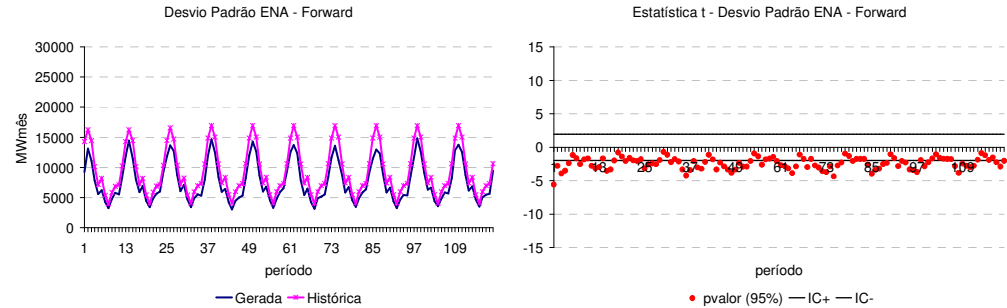
7.3.3. Desvio-padrão dos Cenários

Na Figura 90 é avaliada a estimativa do desvio-padrão para o subsistema Sudeste, com relação ao desvio-padrão histórico. A estimativa do desvio-padrão nos primeiros meses do estudo está muito condicionada ao passado recente, assim como ocorre com a estimativa da média.

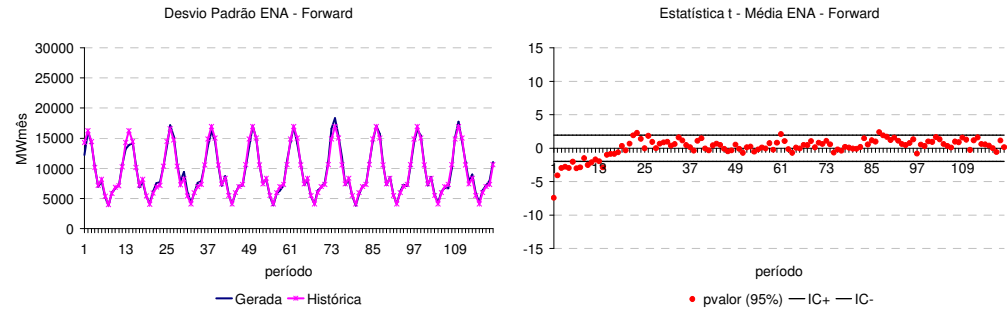
Pode-se observar que as opções Atual e 0 apresentam uma maior variabilidade para a estimativa do desvio-padrão, isto ocorre pois a amostra forward é gerada a partir de uma amostra de tamanho bem reduzido, no caso analisado a amostra backward tem tamanho igual a 20. Além disso, observa-se que a opção 0 degrada bastante o desvio-padrão com relação ao valor histórico. As opções 2, 3 e 4 que utilizam o processo de agregação para obtenção da amostra forward representam de forma satisfatória o desvio padrão, porém pode-se notar uma pequena tendência de redução deste valor. A preservação do desvio histórico é alcançada pela opção 1/1AAS, com exceção dos primeiros meses. As opções LHC e AD apresentam uma variabilidade menor para a estimativa do desvio-padrão do que a observada na opção 1/1AAS.



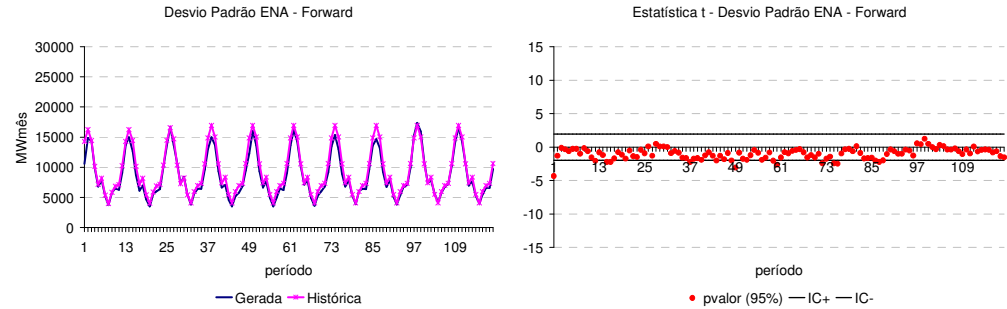
(a) Opção Atual



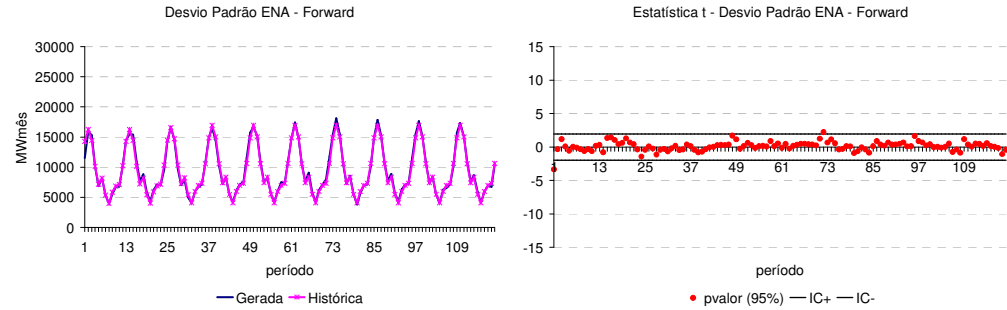
(b) Opção 0



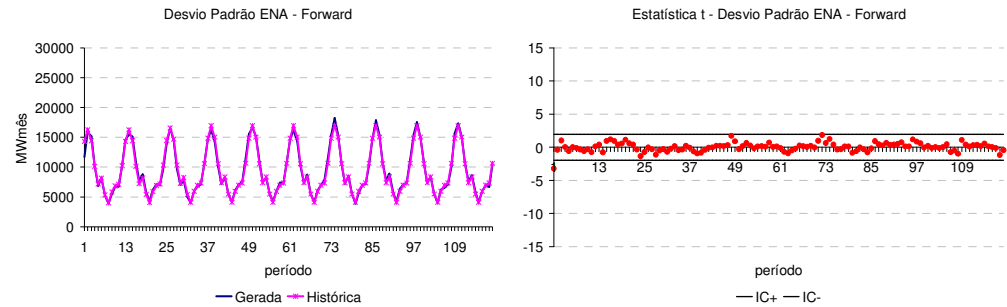
(c) Opção 1 e 1AAS



(d) Opção 2, 3 e 4



(e) Opção LHC



(f) Opção AD

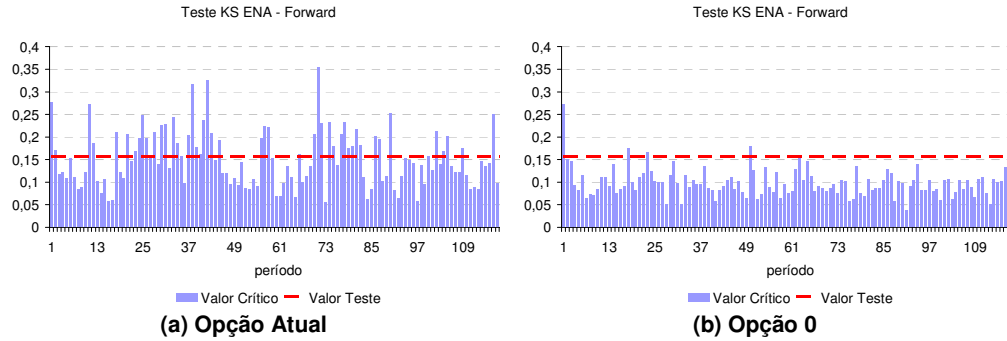
Figura 90: Desvio-Padrão Cenários Forward – Sudeste

Novamente, o comportamento observado para os demais subsistema é similar ao comportamento observado para o subsistema Sudeste. Esses resultados podem ser conferidos no Anexo B.

7.3.4. Distribuição Univariada dos Cenários

Na próxima análise é aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a aderência entre as distribuições histórica e gerada a cada período do horizonte de estudo. O nível de significância adotado é de 5% e o valor crítico do teste é representado por uma linha tracejada nas figuras a seguir.

Da Figura 91a até a Figura 91f são apresentados os resultados deste teste para os cenários hidrológicos do subsistema Sudeste. Pode-se destacar o grande número de testes rejeitados quando se utiliza a opção Atual. As melhores representações da distribuição univariada do subsistema Sudeste são obtidas com as opções LHC e AD. As demais opções apresentam um comportamento satisfatório.



(a) Opção Atual

(b) Opção 0

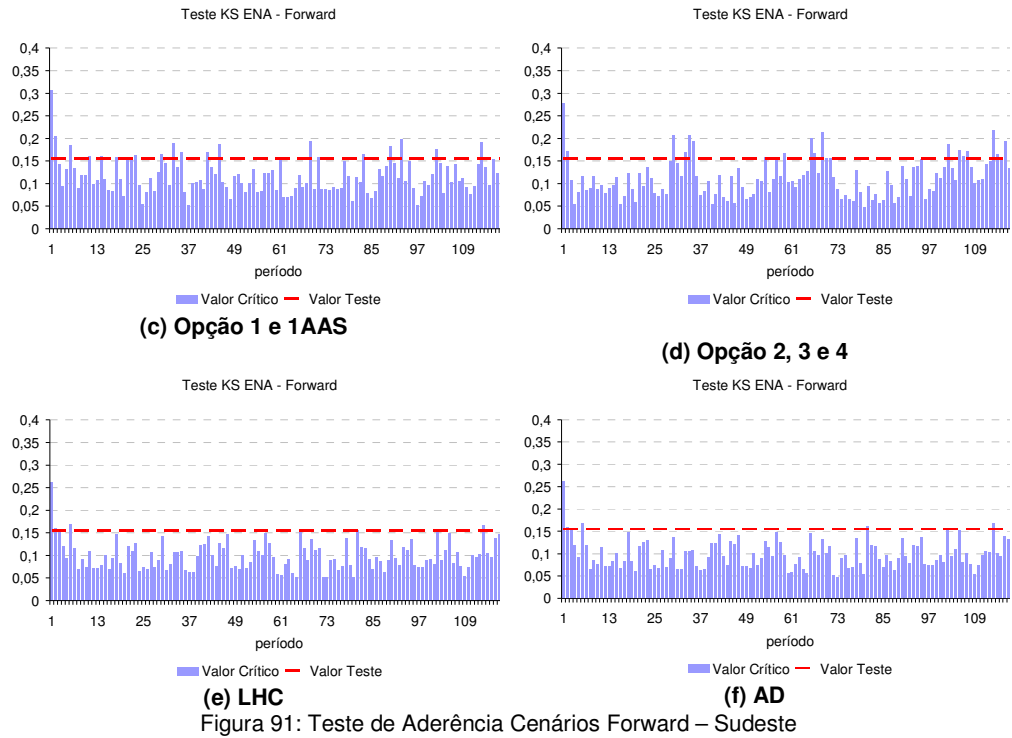
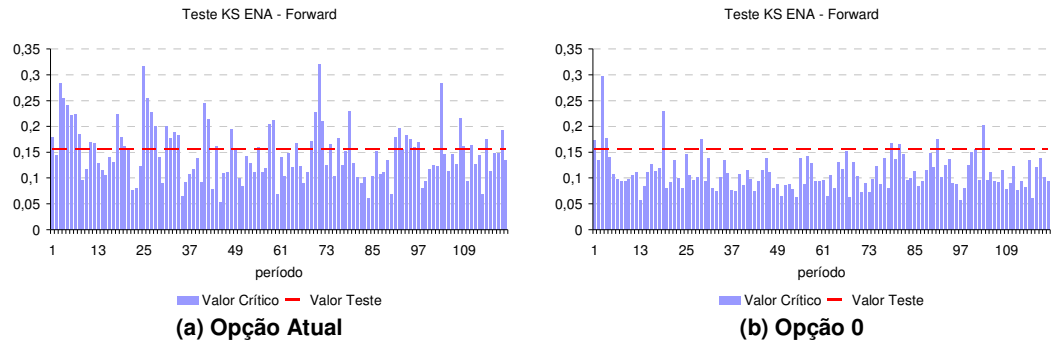


Figura 91: Teste de Aderência Cenários Forward – Sudeste

Os resultados obtidos com a aplicação do teste KS para a distribuição univariada de energia natural afluyente do Sul são apresentados da Figura 92a até a Figura 92f. Conforme observado anteriormente, a opção Atual tem um grande número de rejeições, porém ao aplicar as técnicas de agregação para obter a amostra backward, a partir da qual é gerada a amostra forward (opção 0), a aderência entre as distribuições histórica e gerada é alcançada. As demais opções apresentam um bom comportamento com relação ao teste de aderência.



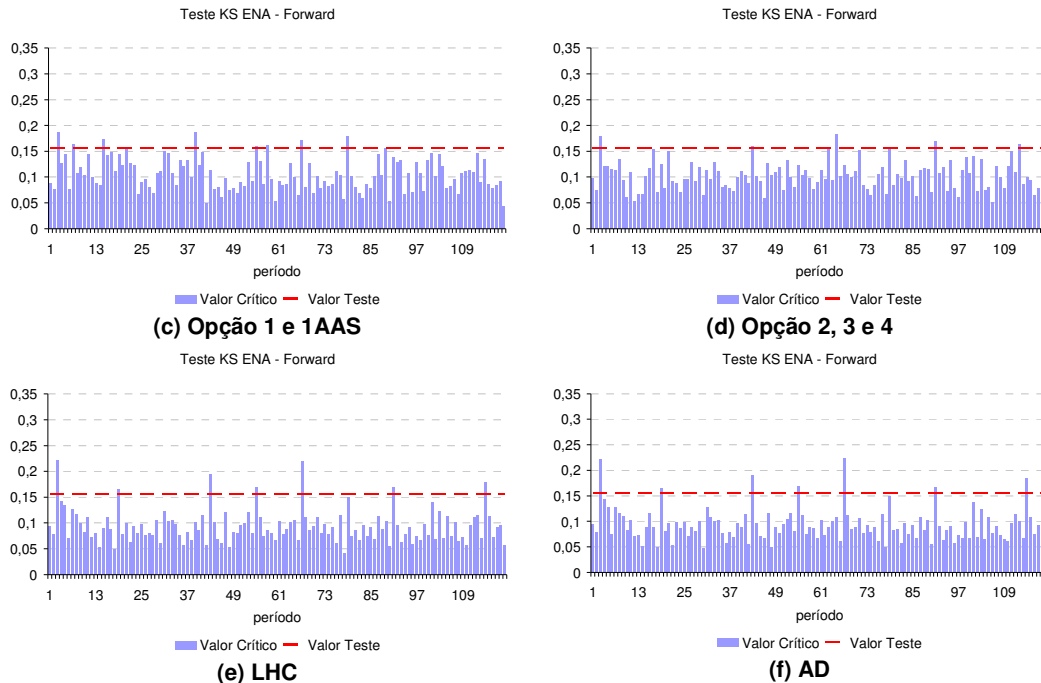
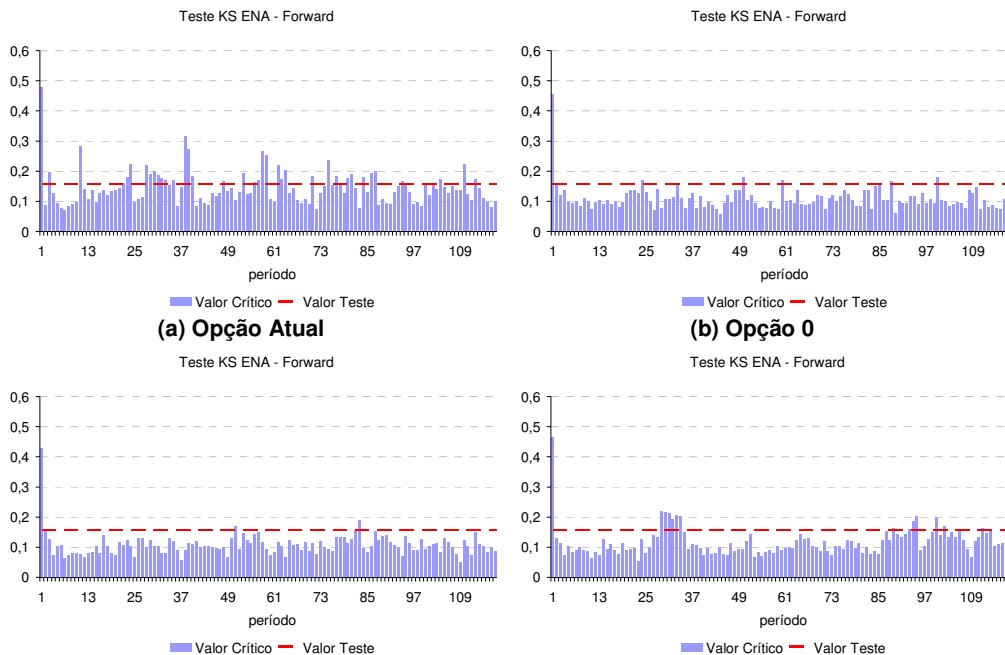
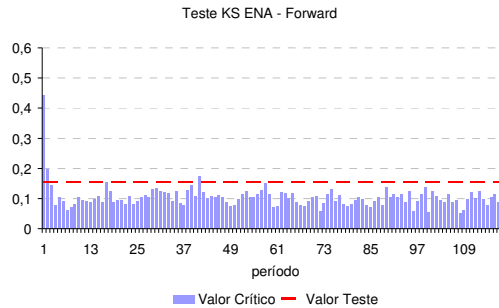


Figura 92: Teste de Aderência Cenários Forward – Sul

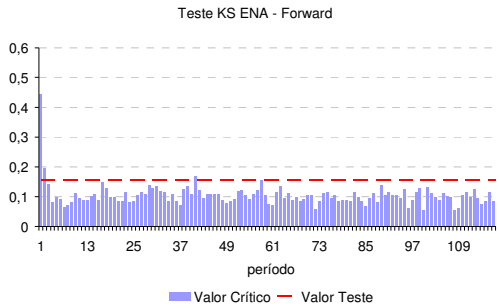
Analisando a Figura 93a até Figura 93f pode-se verificar que, em geral, todas as opções apresentam bom nível de aceitação dos testes de aderência, para o subsistema Nordeste. Novamente a opção que apresenta o maior índice de rejeição é a opção Atual, porém em nível menor do que o observado nos subsistemas Sul e Sudeste.



(c) Opção 1 e 1AAS



(d) Opção 2, 3 e 4



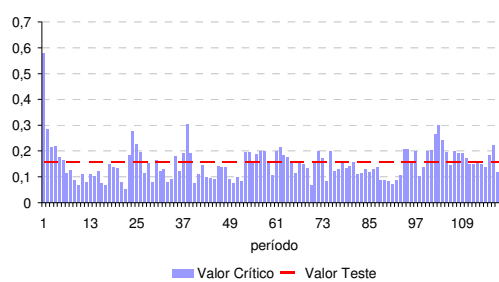
(e) LHC

Figura 93: Teste de Aderência Cenários Forward – Nordeste

(f) AD

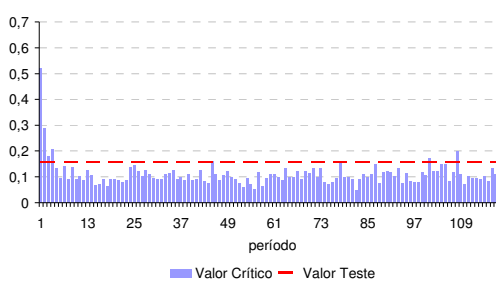
As mesmas considerações feitas para o subsistema Nordeste se aplicam ao subsistema Norte, de acordo com a Figura 94a até Figura 94f.

Teste KS ENA - Forward



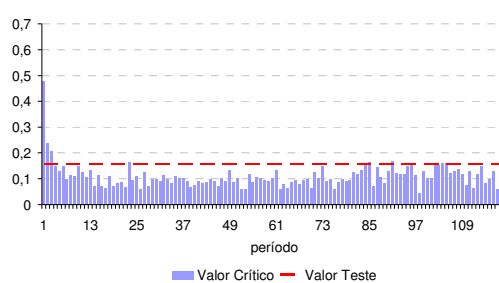
(a) Opção Atual

Teste KS ENA - Forward



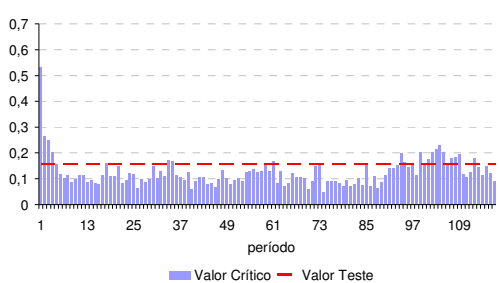
(b) Opção 0

Teste KS ENA - Forward



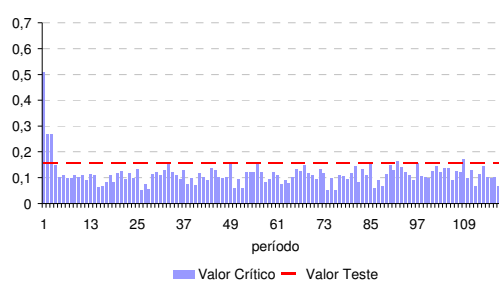
(c) Opção 1 e 1AAS

Teste KS ENA - Forward



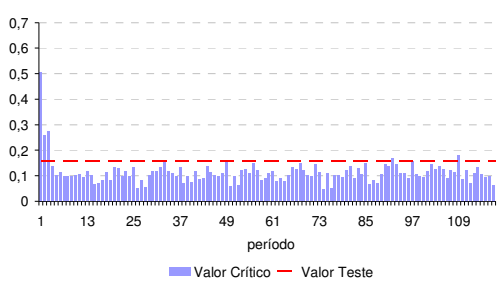
(d) Opção 2, 3 e 4

Teste KS ENA - Forward



(e) LHC

Teste KS ENA - Forward



(f) AD

Figura 94: Teste de Aderência Cenários Forward – Norte

7.3.5.

Correlação Cruzada dos Cenários

A preservação da correlação cruzada é um objetivo a ser perseguido pelo processo de geração de cenários sintéticos multivariados. A seguir, é feita uma análise desta grandeza através de inspeção visual dos resultados obtidos. Os valores calculados são comparados com o valor histórico.

Da Figura 95a até a Figura 95f é apresentada a evolução temporal da correlação cruzada entre os subsistemas Sudeste e Sul. A linha mais clara indica a correlação cruzada histórica. Observe que há uma variação em torno do valor histórico para as opções Atual e 0 a 4. A variabilidade é bastante acentuada para a opção Atual, reforçando a indicação de que a maneira utilizada para obter a amostra forward não é a mais apropriada. Nas opções LHC e AD pode-se observar uma tendência de redução no valor da correlação cruzada estimada.

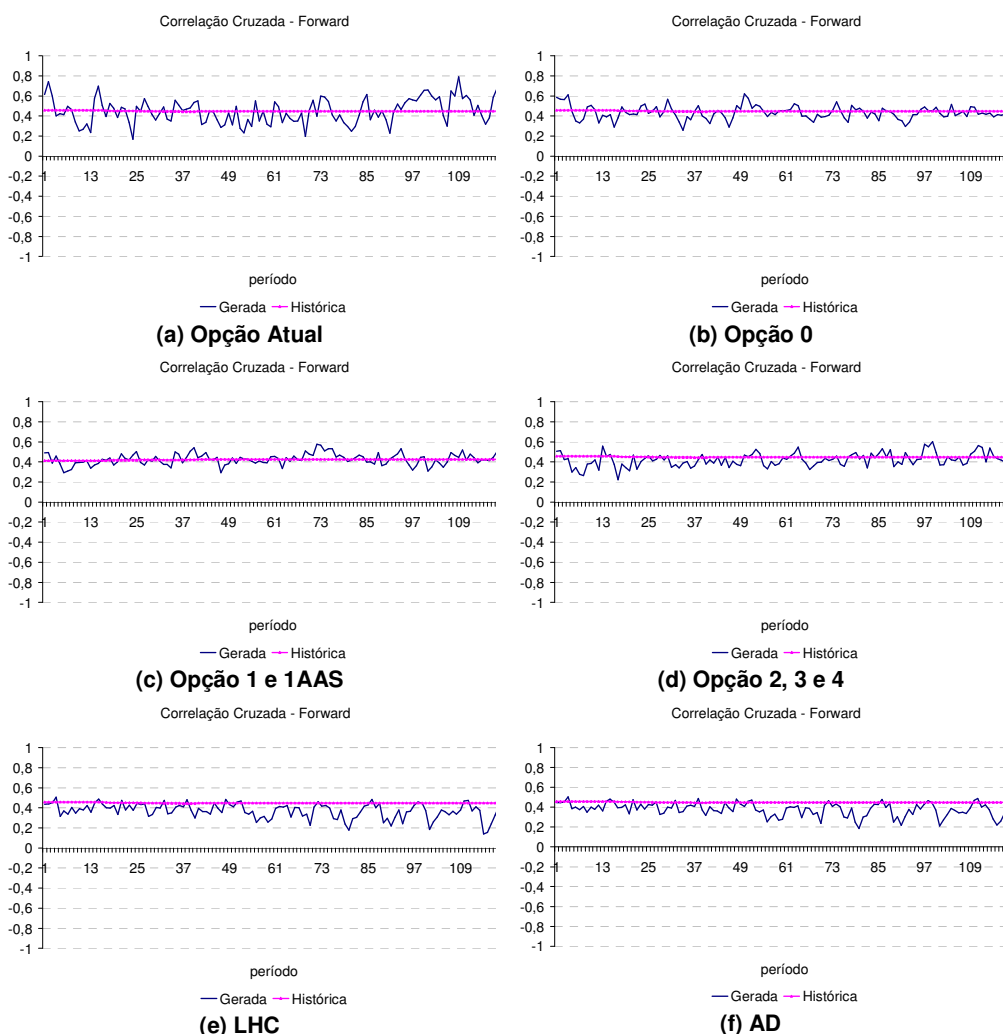


Figura 95: Correlação Cruzada Cenários Forward – Sudeste x Sul

Da Figura 96a até a Figura 96f pode-se analisar o comportamento da correlação cruzada entre os subsistemas Sudeste e Nordeste. As correlações cruzadas obtidas com as opções LHC e AD continuam, em geral, abaixo do valor histórico, porém as diferenças relação ao histórico são bem menores. Conforme observado anteriormente, a opção Atual apresenta uma variabilidade acentuada em relação ao valor histórico.

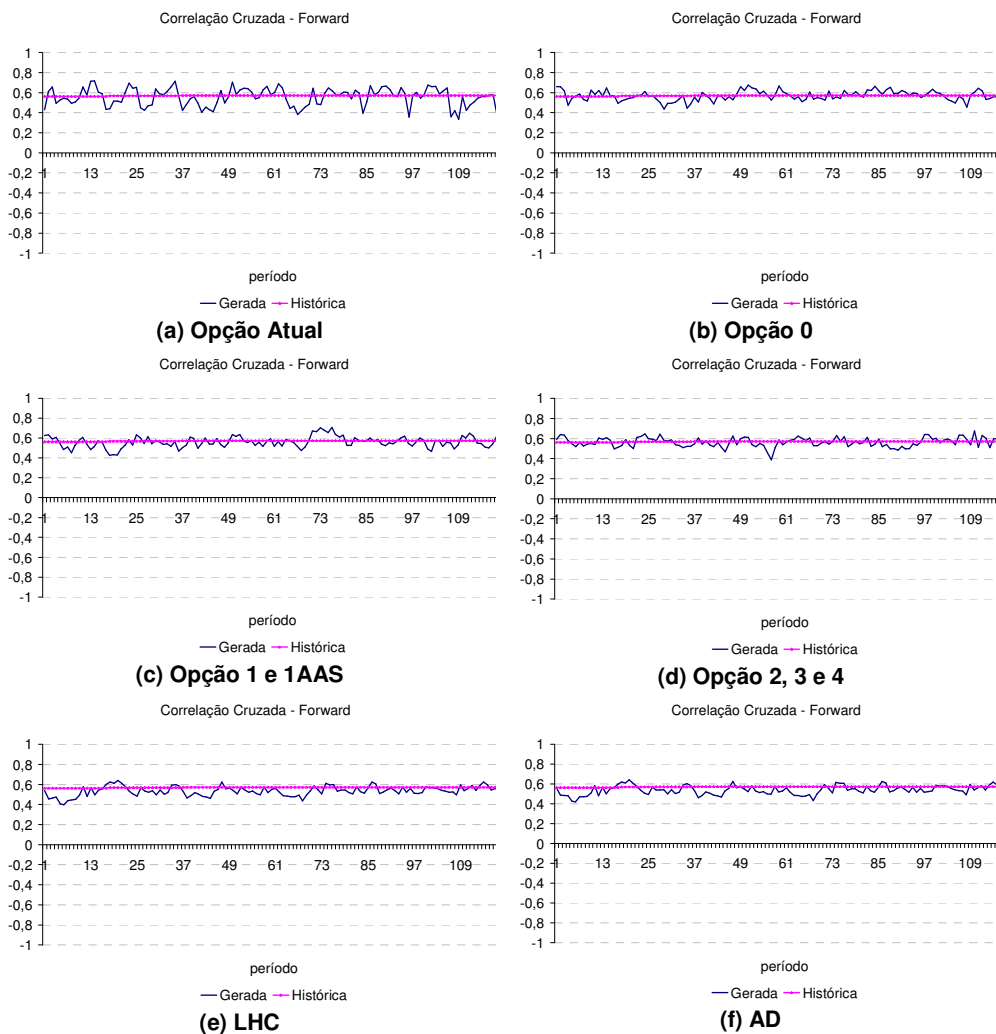


Figura 96: Correlação Cruzada Cenários Forward – Sudeste x Nordeste

Da Figura 97a até a Figura 97f é apresentada a evolução temporal da correlação cruzada entre os subsistemas Sudeste e Norte. Conforme observado anteriormente, a opção Atual apresenta uma variabilidade acentuada em relação ao valor histórico. A correlação cruzada dos cenários gerados com a opção 0 fica um pouco mais dispersa em relação ao valor histórico. As correlações cruzadas

obtidas com as demais opções se aproximam razoavelmente do valor observado no histórico.

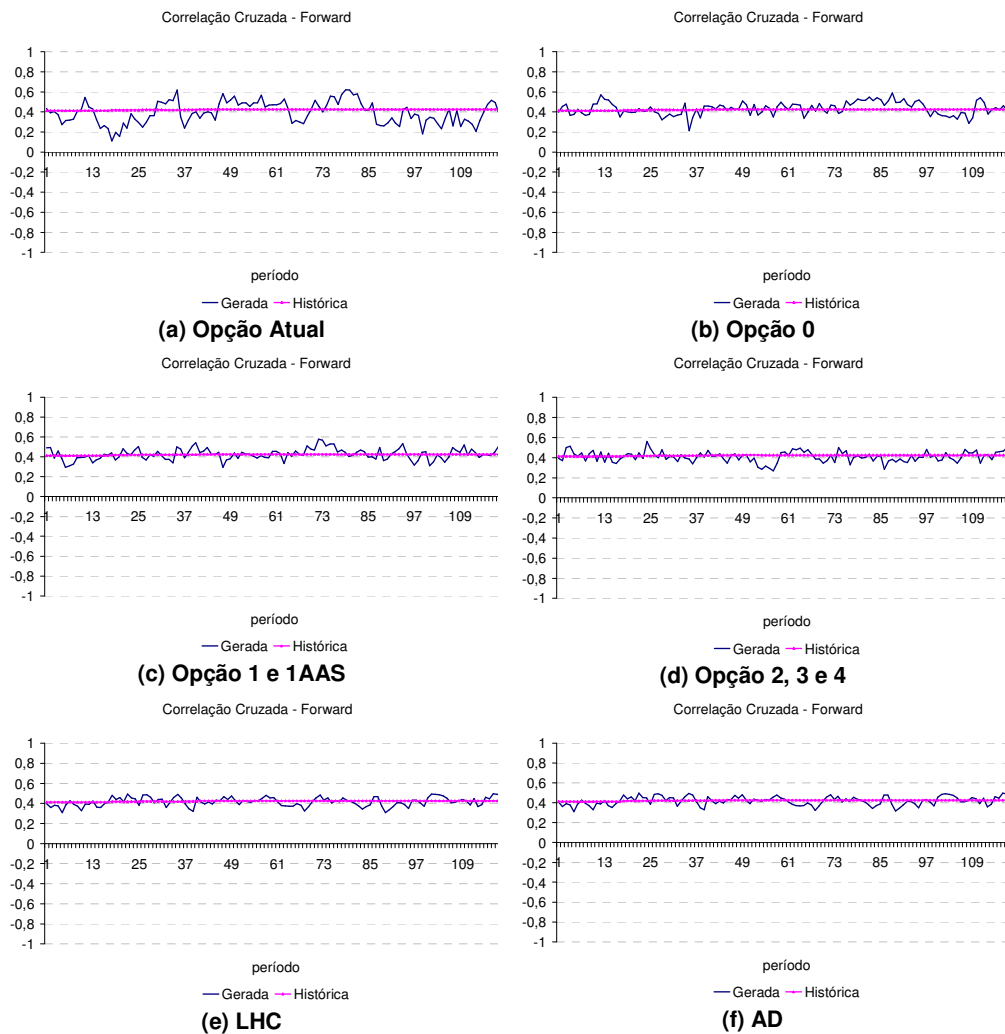


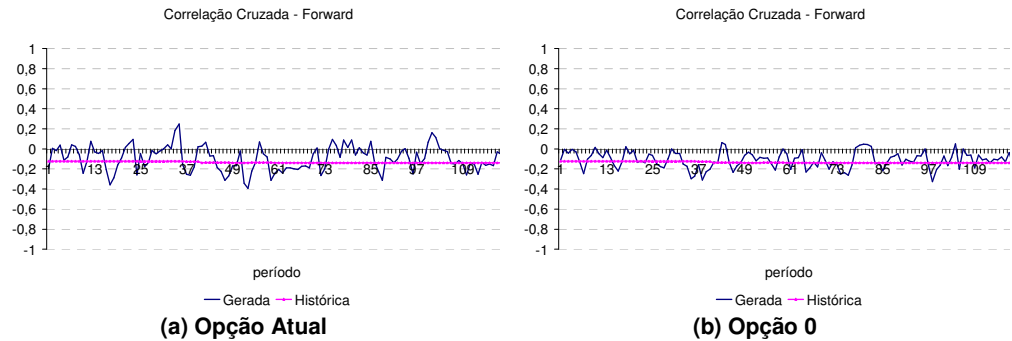
Figura 97: Correlação Cruzada Cenários Forward – Sudeste x Norte

Da Figura 98a até a Figura 98f pode-se analisar o comportamento da correlação cruzada entre os subsistemas Sul e Nordeste. As correlações cruzadas obtidas com as opções LHC e AD continuam, em geral, abaixo do valor histórico em valores absolutos. Conforme observado anteriormente, a opção Atual apresenta uma variabilidade acentuada em relação ao valor histórico.



Figura 98: Correlação Cruzada Cenários Forward – Sul x Nordeste

As mesmas observações feitas na análise da correlação cruzada entre Sul e Nordeste valem para a correlação cruzada entre Sul e Norte, Figura 99a até a Figura 99f.



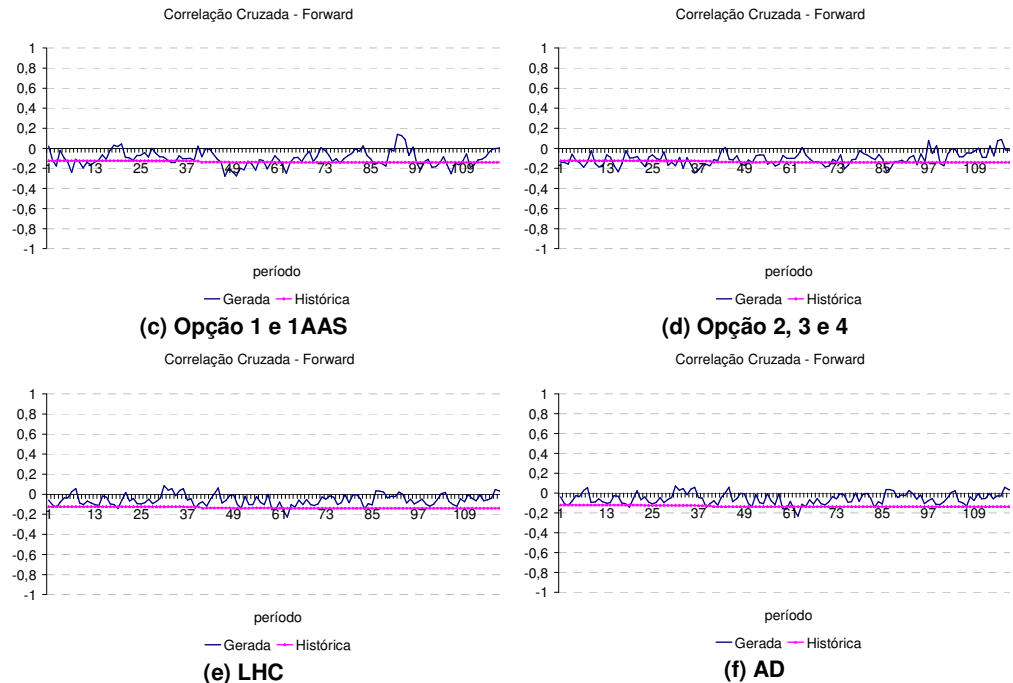
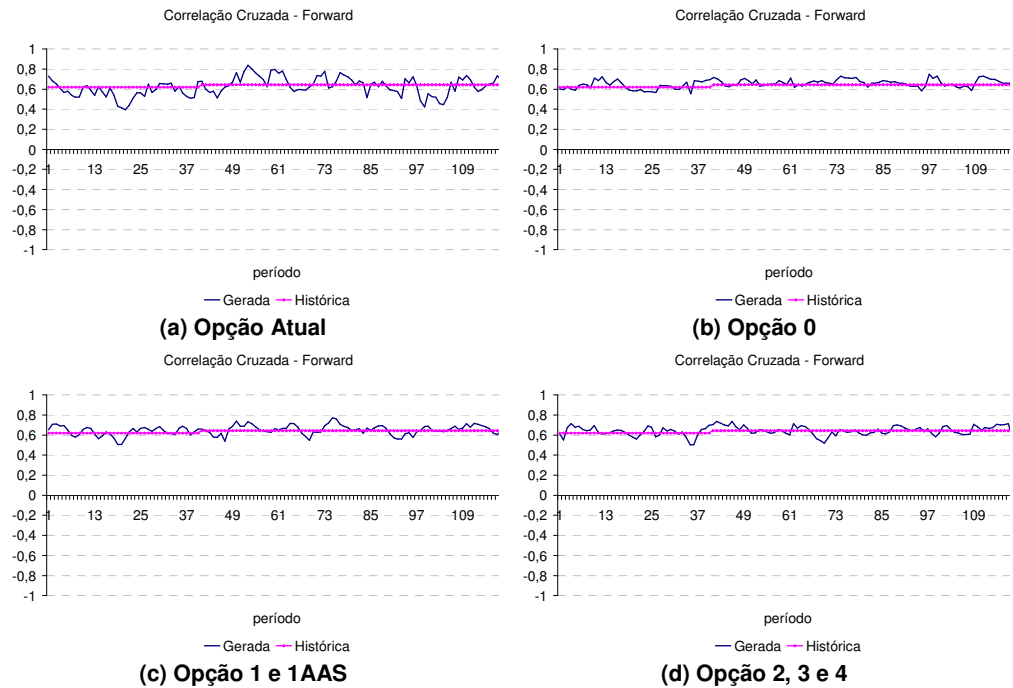
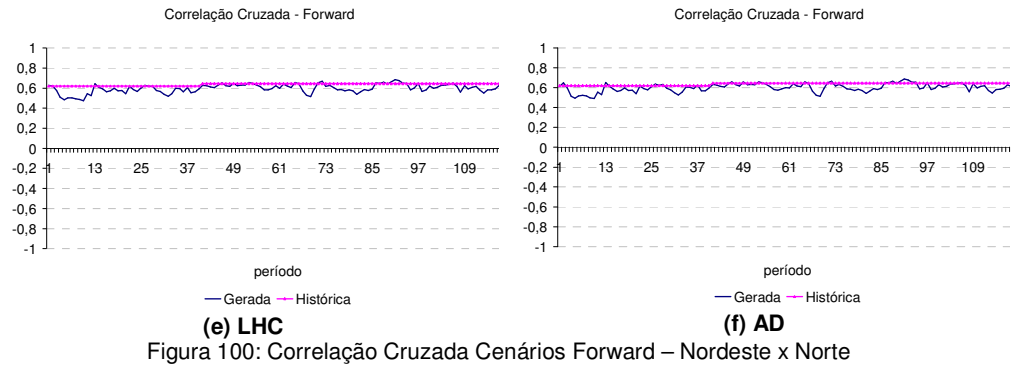


Figura 99: Correlação Cruzada Cenários Forward –Sul x Norte

Da Figura 100a até a Figura 100f é comparada evolução da correlação cruzada entre os subsistemas Nordeste e Norte com o valor observado no histórico. As correlações cruzadas obtidas com as opções LHC e AD permanecem, em geral, abaixo do valor histórico, porém as diferenças relação ao histórico são bem menores. Novamente, a opção Atual apresenta uma variabilidade acentuada em relação ao valor histórico.





Na Tabela 2 é mostrada a correlação cruzada média ao longo de todo horizonte de estudo para opções analisadas neste item. Conforme o observado nas figuras anteriores, em geral as opções LHC e AD têm dificuldade em preservar o valor da correlação cruzada histórica.

Tabela 2: Correlação Cruzada Média Cenários Forward

OPÇÃO	Sudeste-Sul	Sudeste-Nordeste	Sudeste-Norte	Sul-Nordeste	Sul-Norte	Nordeste-Norte
Histórica	0,4502	0,5709	0,4265	-0,0792	-0,1313	0,6372
Atual	0,4495	0,5534	0,3911	-0,0375	-0,0961	0,6236
0	0,4344	0,5691	0,4332	-0,0711	-0,1089	0,6538
1 e 1AAS	0,4208	0,5594	0,4269	-0,0543	-0,0989	0,6486
2, 3 e 4	0,4207	0,5649	0,4096	-0,0572	-0,1035	0,6422
LHC	0,3710	0,5342	0,4173	-0,0396	-0,0563	0,5972
AD	0,3779	0,5367	0,4188	-0,0371	-0,0569	0,6004

7.3.6. Análise de Sequências Negativas

Neste item é realizada uma avaliação dos cenários sintéticos de energia natural afluente para o passo forward com o intuito de verificar a reprodução dos longos períodos de seca verificados no registro histórico. Para tanto, são realizados testes de sequência negativa, testes de máximo déficit e testes relacionado ao período crítico⁷.

Este estudo de caso tem um horizonte de planejamento de cinco anos com um período pós de mais cinco anos e um período pré de dez anos, totalizando

um horizonte de estudo de 20 anos. É considerada a configuração estática de janeiro de 2008, ou seja, as usinas hidroelétricas e térmicas em operação nesta data são consideradas estáticas ao longo dos vinte anos e neste período não ocorre a entrada em operação de nenhuma outra usina. O mercado e o intercâmbio de janeiro de 2008 são mantidos constantes para todo o horizonte de estudo. São utilizados 200 cenários hidrológicos para o passo forward.

Vale ressaltar que os cenários forward gerados com as opções 2, 3 e 4 são idênticos. O mesmo ocorre com os cenários gerados utilizando as opções 1 e 1AAS.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos para o teste de aderência (coluna VT) das distribuições da soma, comprimento e intensidade de seqüência negativa para os cenários hidrológicos gerados com a opção Atual. Na coluna VC 95% é indicado o valor crítico do teste com nível de aceitação de 5%. Para as variáveis contínuas soma e intensidade de seqüência negativa é utilizado o teste Kolmogorov-Smirnov, e para a variável discreta comprimento da seqüência negativa é utilizado o teste Qui-Quadrado, conforme descrito no item 4.4.1. Quando o valor do teste (coluna VT) for menor que o valor crítico (coluna VC), as duas distribuições são consideradas aderentes.

Tabela 3: Análise das Seqüências Negativas – Opção Atual

Soma Seq. Neg. Teste KS			Comprimento Seq. Neg. Teste Qui-quadrado			Intensidade Seq. Neg. Teste KS		
	VC 95%	VT		VC 95%	VT		VC 95%	VT
SE	0,139	0,069	SE	12,600	2,736	SE	0,139	0,113
S	0,125	0,044	S	14,100	3,246	S	0,125	0,065
NE	0,149	0,058	NE	11,100	4,703	NE	0,149	0,122
N	0,161	0,080	N	12,600	1,926	N	0,161	0,141

Analisando a Tabela 4 é possível verificar que a opção Atual é capaz de gerar cenários hidrológicos com seqüências negativas mais críticas do que a pior seqüência negativa do histórico. No subsistema Norte nenhum cenário gerado apresentou uma seqüência negativa com soma e comprimento mais críticos do que aquela observada no histórico, porém foram gerados cenários com períodos secos de intensidade superior ao pior caso já observado.

⁷ O período crítico de um sistema é definido como o período compreendido entre o instante em que o sistema está cheio (armazenamento igual a 100%) e o instante em que o sistema está vazio

Tabela 4: Teste de Máximos – Opção Atual

Teste de Máximos P(G<H)			
	Soma	Comp.	Intens.
SE	73%	62%	39%
S	67%	48%	72%
NE	72%	92%	32%
N	100%	100%	56%

Na Figura 101a-c são apresentados os resultados dos testes de máximo déficit, máximo comprimento de período crítico e a vazão média durante este período. Nestes testes é verificado se os cenários gerados são capazes de reproduzir valores superiores ao máximo valor observado no histórico para estas variáveis. As barras indicam a probabilidade do valor da variável analisada (máximo déficit, máximo comprimento de período crítico e a vazão média) ser menor do que o valor observado no histórico.

Os testes são realizados para diversos níveis de regularização (alfa). Pode-se observar que, para os valores de alfa entre 0,7 e 0,85 (valores mais utilizados na prática), há sempre uma probabilidade de gerar valores maiores do que o máximo observado no histórico.

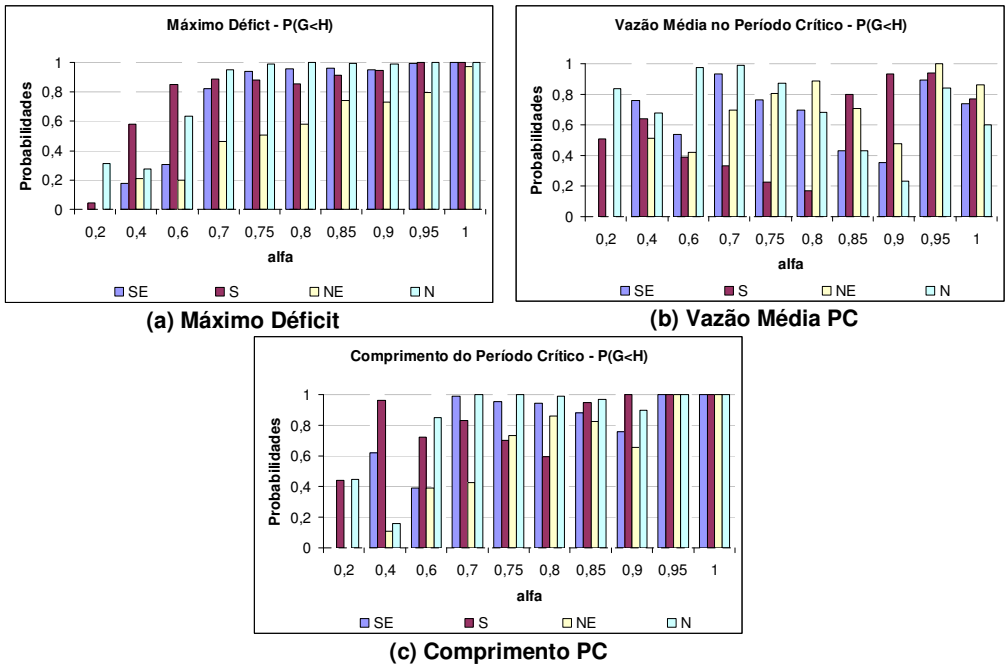


Figura 101: Teste com Diferentes Níveis de Regularização – Opção Atual

(reservatório vazio), sem que haja reenchimentos intermediários do reservatório.

Na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7 são apresentados os resultados dos testes de aderência para as variáveis relacionadas à seqüência negativa, para as opções 0, 1 e 4, respectivamente. Assim como verificado para a opção Atual, as distribuições obtidas pelos cenários hidrológicos gerados por todas as opções são aderentes à distribuição histórica.

Tabela 5: Análise das Seqüências Negativas – Opção 0

Soma Seq. Neg. Teste KS			Comprimento Seq. Neg. Teste Qui-quadrado			Intensidade Seq. Neg. Teste KS		
	VC 95%	VT		VC 95%	VT		VC 95%	VT
SE	0,139	0,057	SE	12,600	1,901	SE	0,139	0,055
S	0,125	0,058	S	14,100	3,891	S	0,125	0,078
NE	0,149	0,079	NE	11,100	4,350	NE	0,149	0,085
N	0,161	0,092	N	12,600	1,612	N	0,161	0,113

Tabela 6: Análise das Seqüências Negativas – Opções 1 e 1AAS

Soma Seq. Neg. Teste KS			Comprimento Seq. Neg. Teste Qui-quadrado			Intensidade Seq. Neg. Teste KS		
	VC 95%	VT		VC 95%	VT		VC 95%	VT
SE	0,139	0,062	SE	12,600	2,368	SE	0,139	0,102
S	0,125	0,049	S	14,100	1,605	S	0,125	0,063
NE	0,149	0,063	NE	11,100	4,311	NE	0,149	0,127
N	0,161	0,085	N	12,600	2,547	N	0,161	0,147

Tabela 7: Análise das Seqüências Negativas – Opções 2, 3 e 4

Soma Seq. Neg. Teste KS			Comprimento Seq. Neg. Teste Qui-quadrado			Intensidade Seq. Neg. Teste KS		
	VC 95%	VT		VC 95%	VT		VC 95%	VT
SE	0,139	0,057	SE	12,600	2,281	SE	0,139	0,076
S	0,125	0,046	S	14,100	3,094	S	0,125	0,057
NE	0,149	0,063	NE	11,100	3,580	NE	0,149	0,101
N	0,161	0,084	N	12,600	2,330	N	0,161	0,130

O complemento dos valores apresentados na Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 indicam a probabilidade de ocorrência de eventos mais severos do que os observados no histórico. Novamente, para todos os subsistemas, exceto o Norte nas variáveis soma e comprimento, todas as opções geram cenários mais críticos do que o observado no histórico.

Tabela 8: Teste de Máximos – Opção 0

Teste de Máximos
P(G<H)

	Soma	Comp.	Intens.
SE	77%	57%	70%
S	61%	29%	86%
NE	71%	79%	38%
N	100%	100%	79%

Tabela 9: Teste de Máximos – Opções 1 e 1AAS

Teste de Máximos
P(G<H)

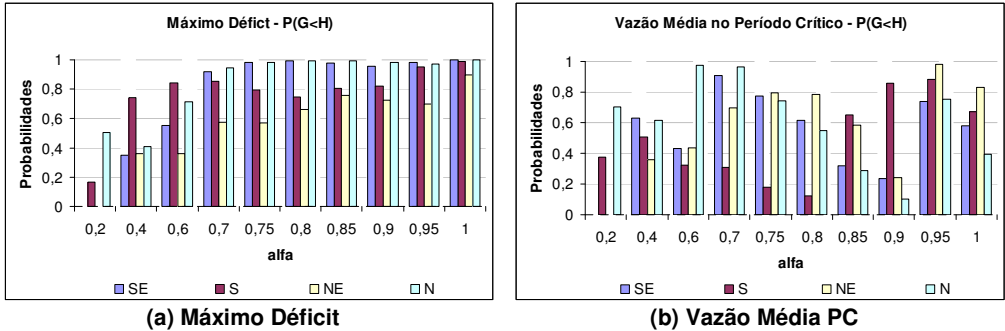
	Soma	Comp.	Intens.
SE	78%	66%	45%
S	61%	43%	72%
NE	70%	59%	24%
N	100%	100%	59%

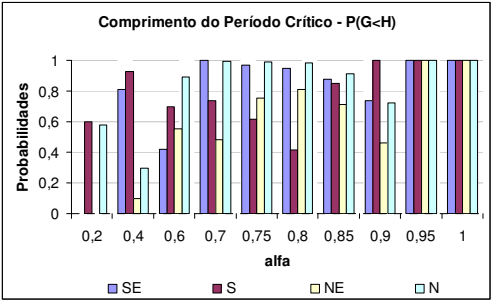
Tabela 10: Teste de Máximos – Opções 2, 3 e 4

Teste de Máximos
P(G<H)

	Soma	Comp.	Intens.
SE	75%	61%	48%
S	59%	43%	79%
NE	66%	85%	33%
N	100%	100%	63%

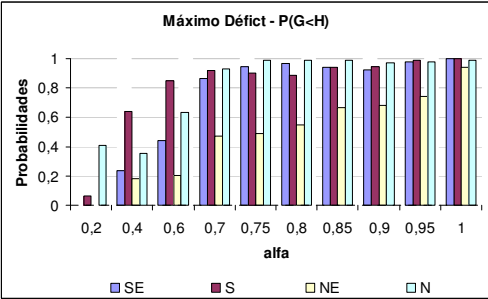
Analisando os testes com relação às variáveis máximo déficit, máximo período crítico e vazão média durante o período crítico, mostrados na Figura 102a-c, Figura 103a-c e Figura 104a-c respectivamente, pode-se dizer os resultados obtidos são similares e, portanto, todas as opções analisadas são capazes de gerar eventos mais críticos que o verificado no histórico.



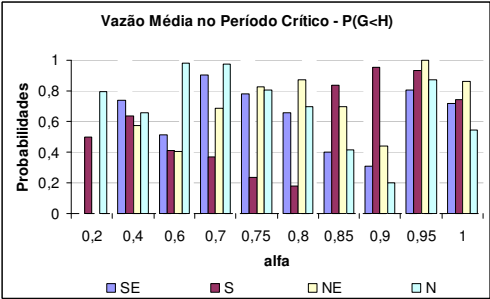


(c) Comprimento PC

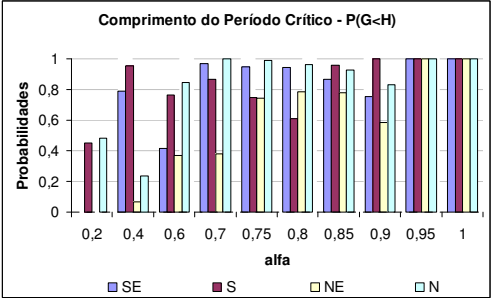
Figura 102: Teste com Diferentes Níveis de Regularização – Opção 0



(a) Máximo Déficit

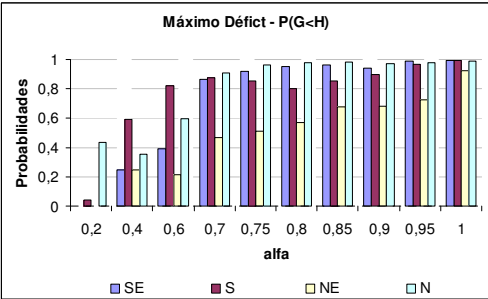


(b) Vazão Média PC

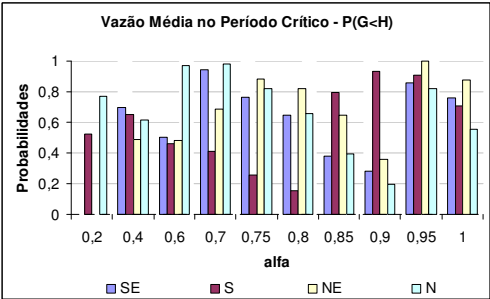


(c) Comprimento PC

Figura 103: Teste com Diferentes Níveis de Regularização – Opções 1 e 1AAS



(a) Máximo Déficit



(b) Vazão Média PC

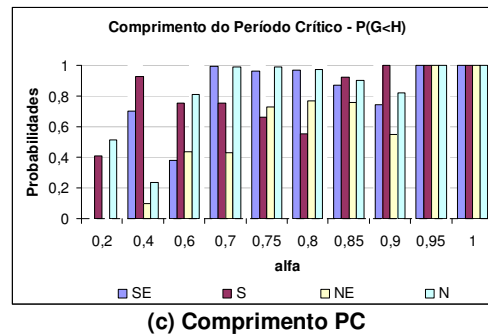


Figura 104: Teste com Diferentes Níveis de Regularização – Opções 2, 3 e 4

É sempre desejável que o modelo escolhido para representar um processo estocástico seja capaz de gerar eventos mais favoráveis e mais críticos do que os observados no registro histórico. Analisando os resultados dos testes aplicados neste item, pode-se concluir que todas as opções analisadas para gerar cenários hidrológicos são capazes de reproduzir os eventos críticos ocorridos no histórico.

7.4.

Análise dos Cenários Gerados para Passo Backward

Neste item é apresentada uma avaliação dos cenários hidrológicos obtidos para o passo backward a partir da utilização das opções descritas no trabalho, além dos métodos de amostragem LHC e AD. Nesta análise são considerados 200 cenários forward e 20 cenários backward, e para o processo de agregação é fornecida uma amostra de 2000 vetores de ruídos.

São utilizados testes não condicionados para a avaliação da capacidade de preservação das estatísticas média, desvio-padrão e correlação cruzada, e testes para verificação da aderência entre as distribuições gerada e histórica. Para a realização dos testes não condicionados, a cada período são considerados todos os cenários backward gerados, independentemente do estado de afluência passada, conforme ilustrado na Figura 105. Desta forma, neste estudo é considerada uma amostra com 4000 vetores multivariados de ENA (200x20).

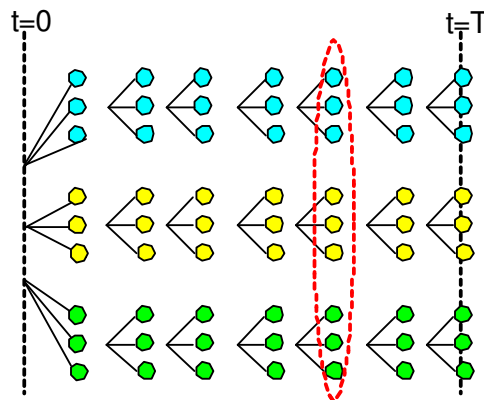


Figura 105: Amostra utilizada no teste não condicionado

Para a avaliação da qualidade dos cenários gerados para cada conjunto de aberturas são realizados testes condicionados. Neste caso, o teste é aplicado a cada estado de afluência passada, conforme mostrado na Figura 106. Neste estudo são realizados a cada período 200 testes considerando uma amostra de 20 vetores multivariados de ENA.

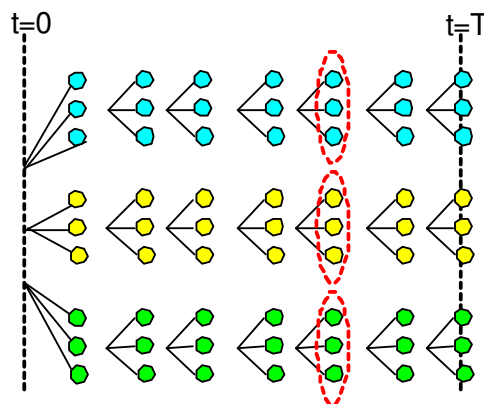


Figura 106: Amostras utilizadas no teste condicionado

Para iniciar a avaliação dos cenários de ENA é realizada uma comparação entre as envoltórias dos cenários hidrológicos históricos e gerados com todas as opções e métodos de amostragem descritos.

7.4.1.

Envoltória dos Cenários

Da Figura 107b até a Figura 107g são mostradas as envoltórias e os valores médios dos 4000 cenários gerados de energia natural afluyente para o subsistema Sudeste, e na Figura 107a é apresentado o histórico. Observe que

todas as opções de geração avaliadas são capazes de reproduzir bem o histórico, exceto um valor máximo atípico ocorrido no mês de junho. As opções Atual e LHC apresentam um valor máximo bem maior que o histórico para o mês de fevereiro do primeiro e sexto anos, respectivamente. Por se tratar de apenas um cenário atípico, o valor da média não é muito afetado.

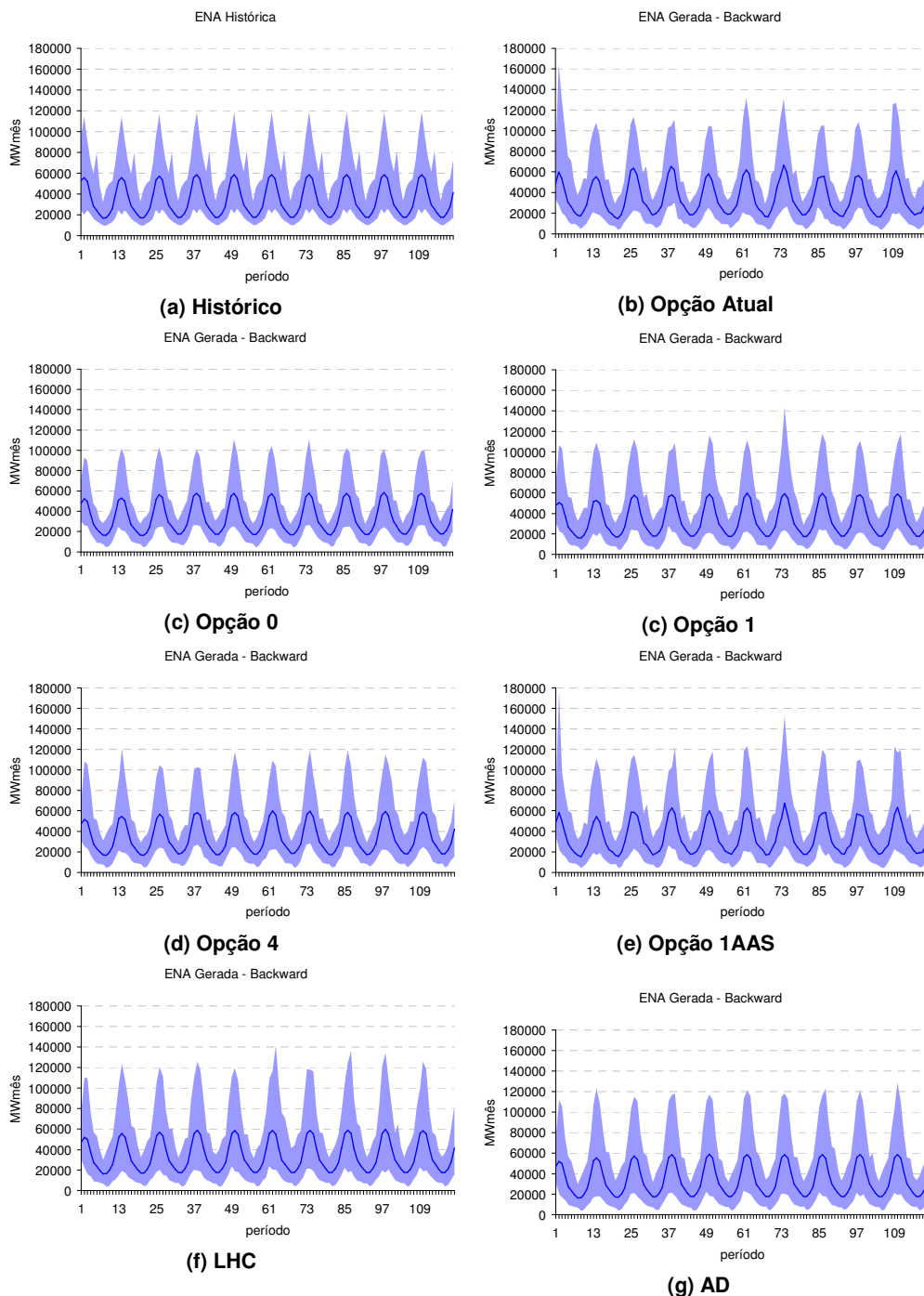
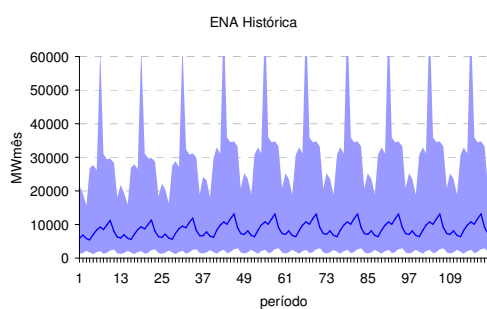


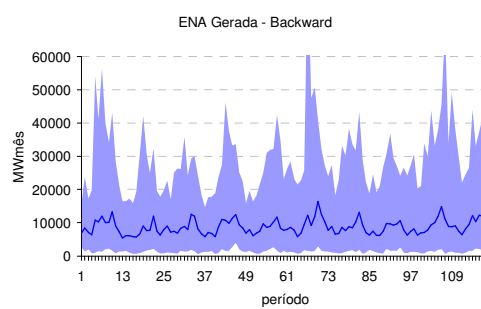
Figura 107: Envoltória Cenários Forward – Sudeste

Da Figura 108b até a Figura 108g são apresentadas as envoltórias e os valores médios para o subsistema Sul, assim como seu valor histórico, Figura 108a. O Sul é o subsistema que apresenta maior variabilidade no seu comportamento hidrológico, seu coeficiente de variação mensal é bem próximo de um. O valor máximo de ENA observado no Sul foi no mês de julho de 1983, quando ocorreu uma grande cheia na região. Excluindo o valor máximo de julho, pode-se observar que as opções 2, 3, 4, LHC e AD são as que mais se aproximam da envoltória histórica.

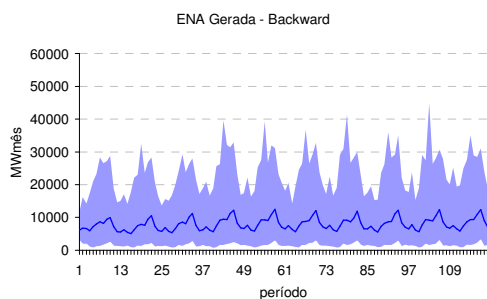
Nota-se que o valor médio dos cenários gerados não é preservado de maneira satisfatória pela Opção Atual.



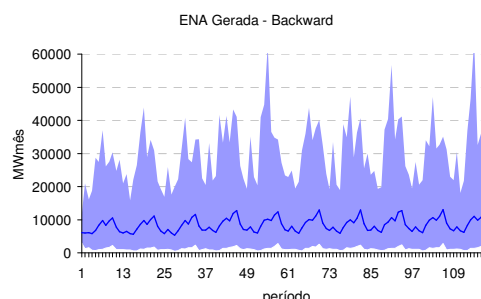
(a) Histórico



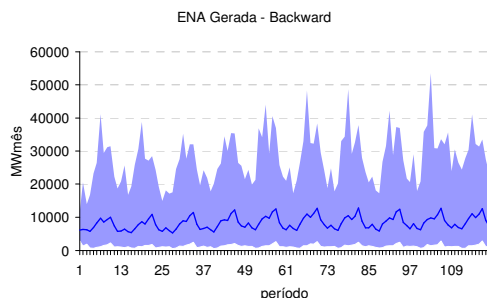
(b) Opção Atual



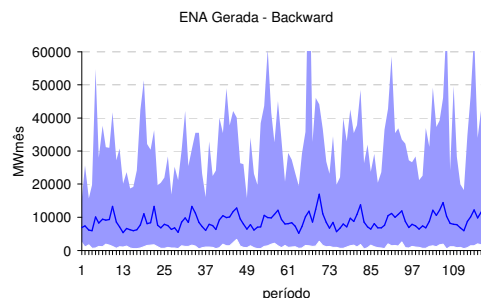
(c) Opção 0



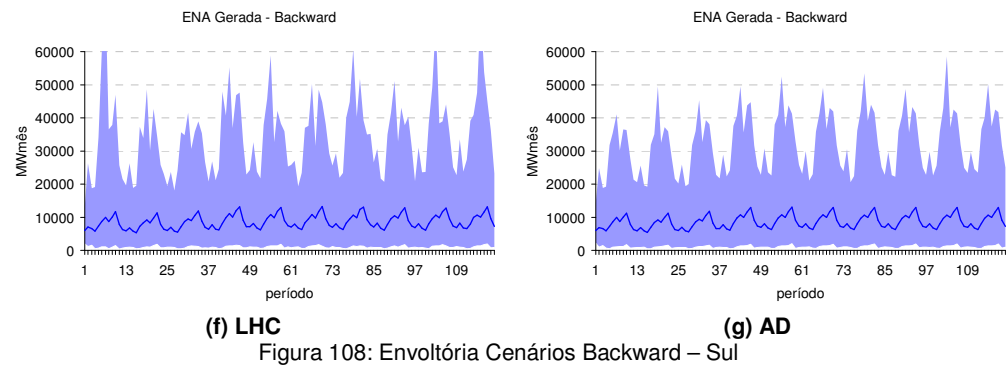
(c) Opção 1



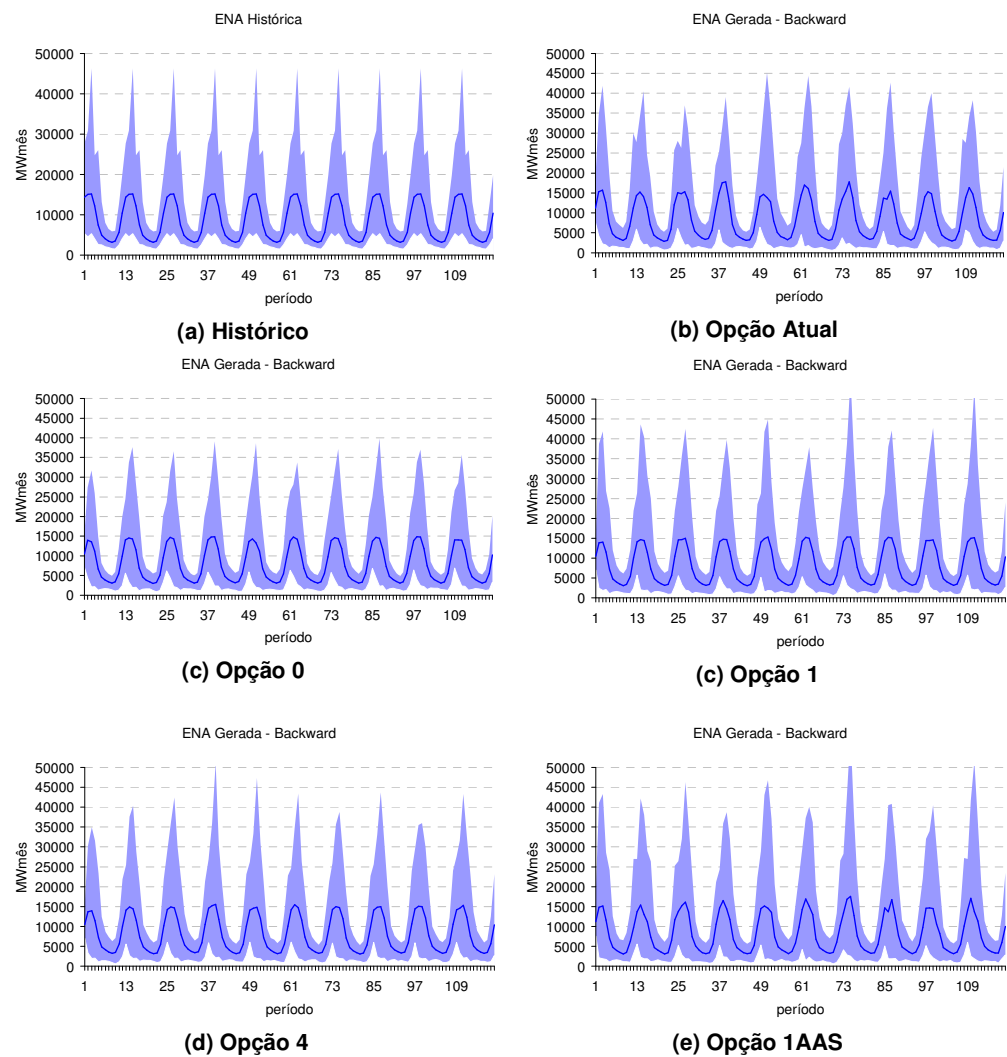
(d) Opção 4

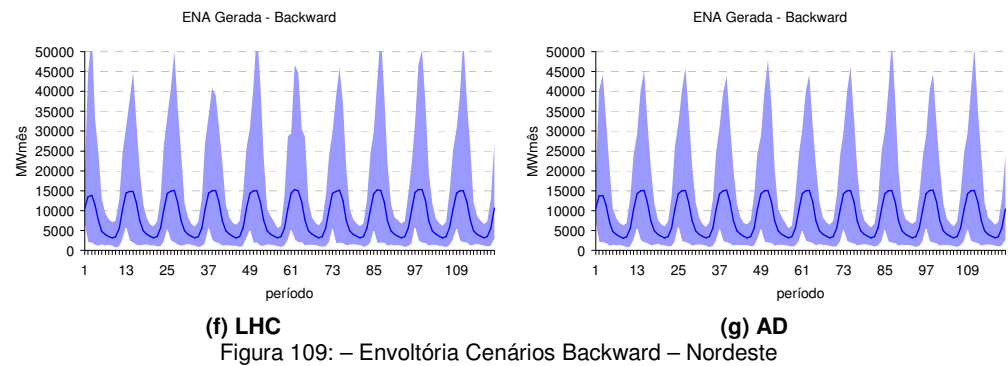


(e) Opção 1AAS

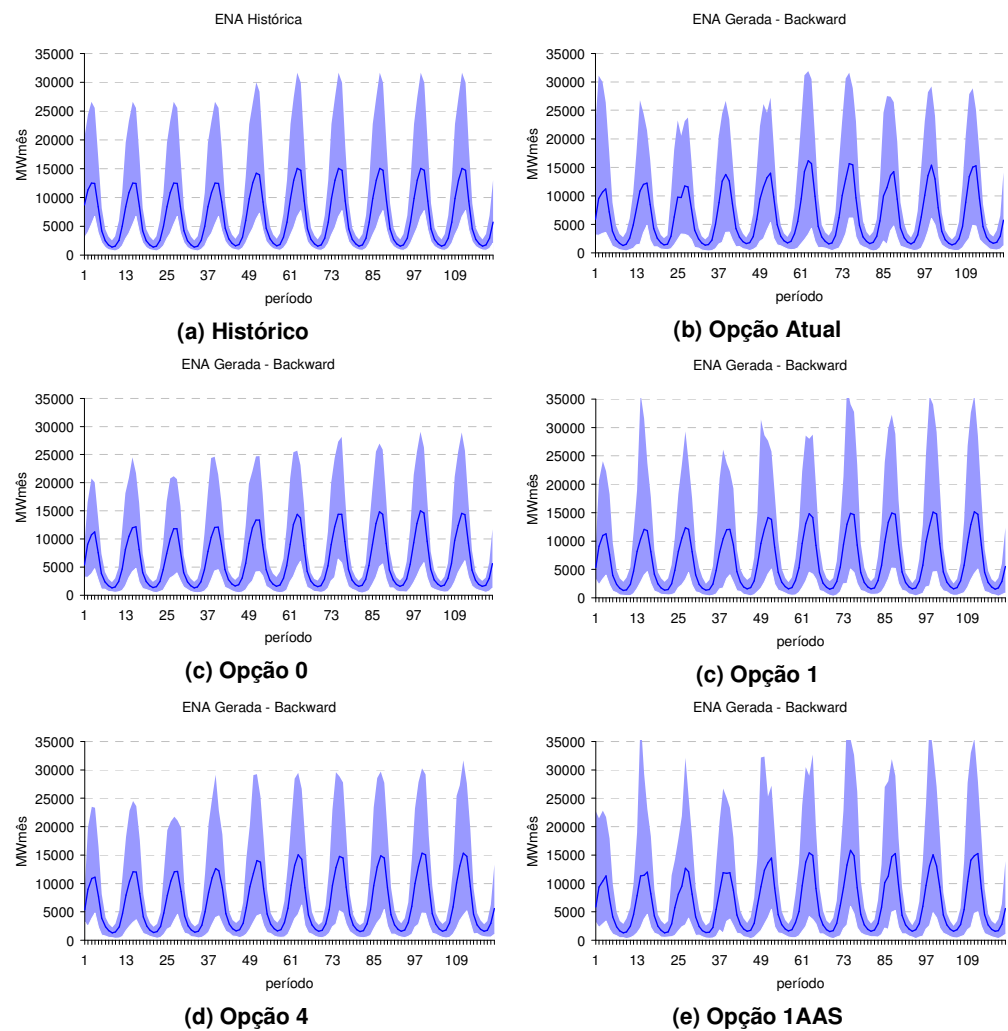


A mesma análise é realizada para o subsistema Nordeste, Figura 109a até a Figura 109g. Todas as opções analisadas preservam de forma satisfatória a envoltória histórica. Observa-se na opção 0 uma dificuldade em preservar valores mais elevados.





Novamente, todas as opções analisadas são capazes de reproduzir satisfatoriamente a envoltória histórica do subsistema Norte, Figura 110a até Figura 110g, exceto pelas opções Atual e 0 que apresentam um pouco de dificuldade para representar valores elevados.



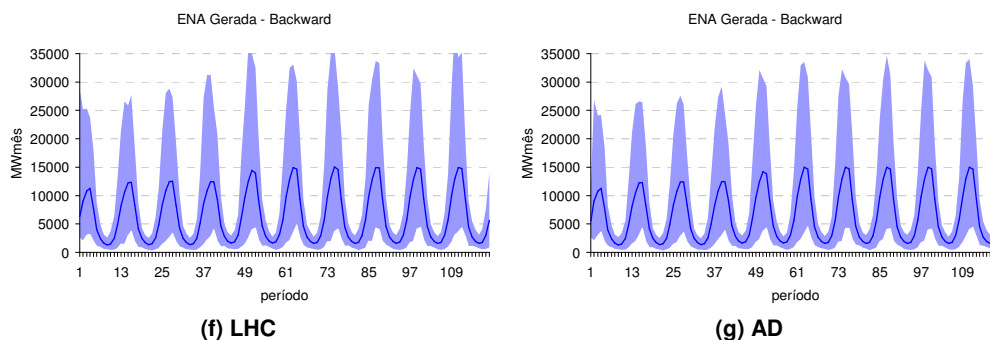


Figura 110: Envoltória Cenários Backward – Norte

7.4.2.

Testes não condicionados para média e desvio

Neste item é realizada uma análise mais detalhada da média e do desvio-padrão dos cenários hidrológicos. O nível de significância do teste é de 5% e como parâmetros de população são considerados os valores históricos. Na primeira coluna da Figura 111a até a Figura 111g são apresentadas as evoluções temporais da média e do desvio padrão para a série histórica e para os cenários gerados, para o subsistema Sudeste.

Os cenários gerados para os primeiros períodos são fortemente condicionados ao passado recente (tendência hidrológica recente). Desta forma, as médias e os desvios-padrão dos primeiros períodos diferem do valor histórico, uma vez que o passado recente é diferente da MLT, conforme mostrado na Figura 46.

Vale ressaltar que as estimativas não condicionadas da média e desvio-padrão dos cenários backward são influenciadas tanto pela qualidade da geração dos cenários backward, propriamente ditos, quanto pela geração dos cenários forward.

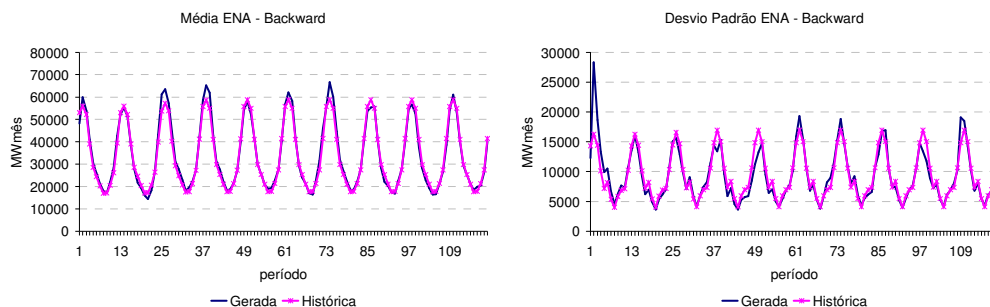
Analisando a Figura 111a até a Figura 111g, observa-se que a Opção Atual é aquela que apresenta maior diferença com relação à média histórica. As estimativas de média se aproximam mais da média histórica quando se aplica técnicas de agregação tanto na obtenção da amostra backward (opções 0 e 1), quanto na obtenção da amostra forward (opções 2,3 e 4). Comparando as opções 1AAS, LHC e AD, verifica-se que as técnicas de amostragem estratificadas reduzem bastante a variabilidade da estimativa da média.

Como pode ser observado, as opções que empregam técnicas de agregação na obtenção dos cenários da backward apresentam uma ligeira degradação com relação ao desvio-padrão. O maior nível de degradação na

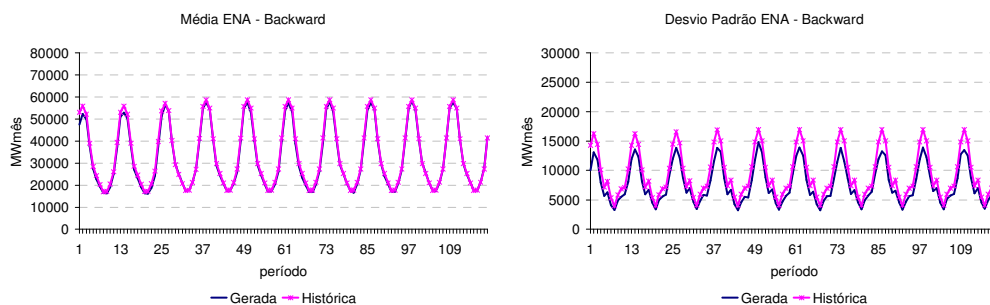
estimativa do desvio ocorre na opção 0 e parte desta degradação deve-se à degradação observada nos cenários forward.

Também pode-se observado nas opções Atual e 1AAS uma dificuldade em preservar o desvio-padrão histórico, porém as diferenças com relação ao histórico não apresentam uma tendência de decrescimento.

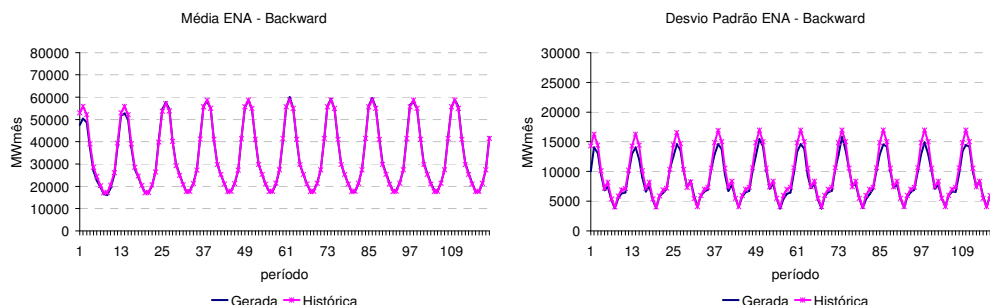
A preservação do desvio histórico é alcançada quase com perfeição nas opções LHC e AD, com exceção dos primeiros meses.



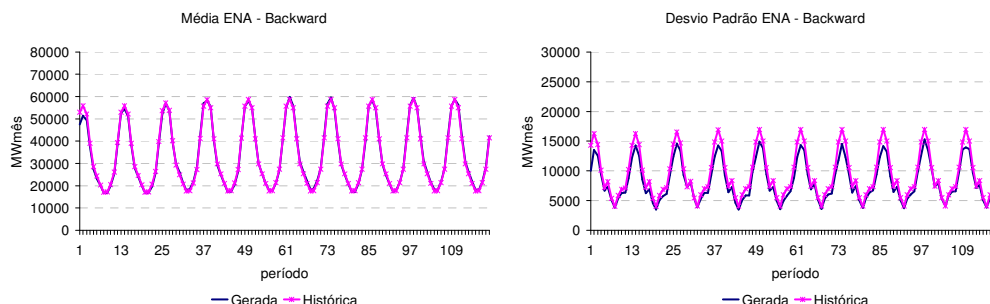
(a) Opção Atual



(b) Opção 0



(c) Opção 1



(d) Opção 4

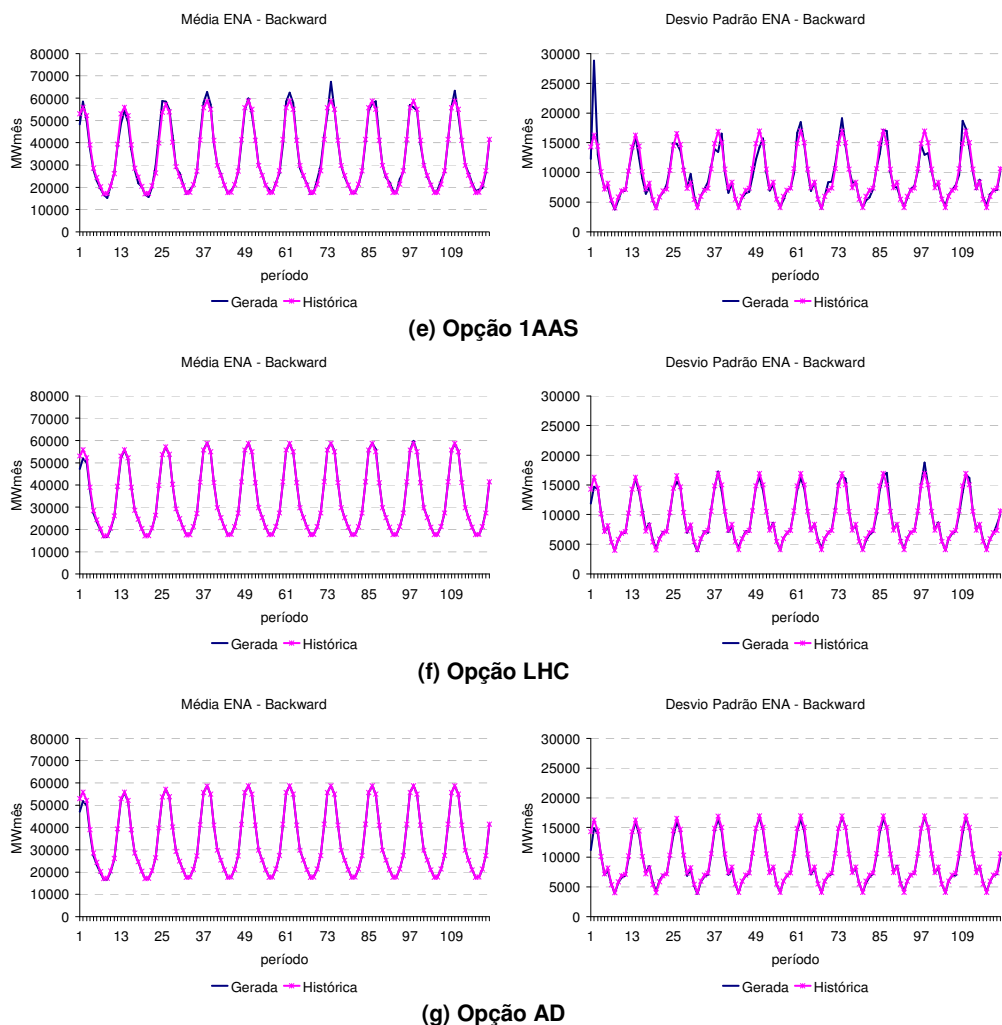


Figura 111: Média Cenários Backward – Sudeste

As observações resultantes desta análise também são válidas para os demais subsistemas. As estimativas de média e desvio-padrão para os demais subsistemas podem ser avaliadas no Anexo B.

7.4.3. Distribuição Univariada dos Cenários

O objetivo desta análise é verificar a aderência entre as distribuições univariadas histórica e gerada a cada período do horizonte de estudo (teste não condicionado). Para tanto é aplicado o teste Kolmogorov-Smirnov para verificar com nível de significância de 5%. O valor crítico do teste é representado por uma linha tracejada nas figuras a seguir.

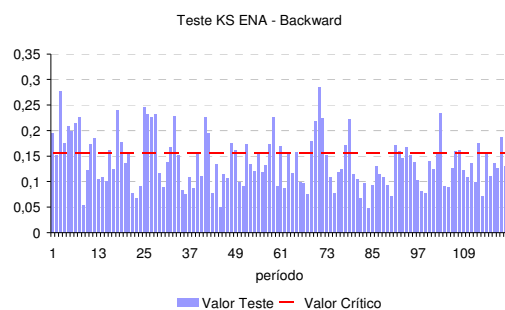
Da Figura 112a até a Figura 112g são apresentados os resultados do teste KS para os cenários hidrológicos do subsistema Sudeste. Pode-se destacar o

grande número de testes rejeitados quando se utiliza a opção Atual. As melhores representações da distribuição univariada do subsistema Sudeste são obtidas com as opções LHC e AD. Um comportamento satisfatório é verificado para as demais opções.

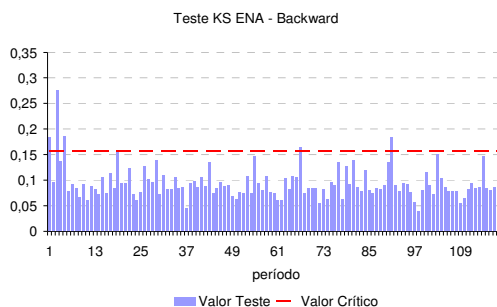


Figura 112: Teste de Aderência Cenários Backward – Sudeste

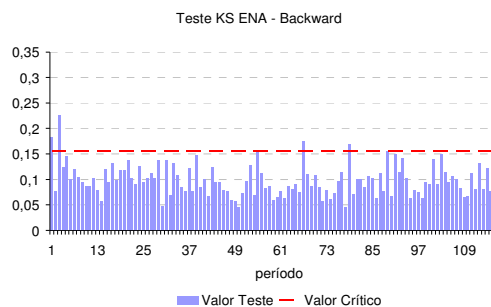
Os resultados obtidos com a aplicação do teste KS para a distribuição univariada de energia natural afluyente do Sul são apresentados da Figura 113a até a Figura 113g. Conforme observado anteriormente, na opção Atual há um grande número de rejeições, porém ao aplicar as técnicas de agregação para obter a amostra backward, a partir da qual é gerada a amostra forward (opção 0), a aderência entre as distribuições histórica e gerada é alcançada. Nas demais opções é observado um bom comportamento com relação ao teste de aderência.



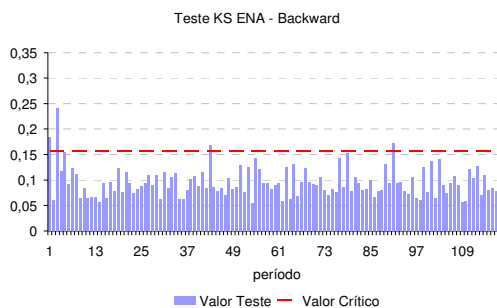
(a) Opção Atual



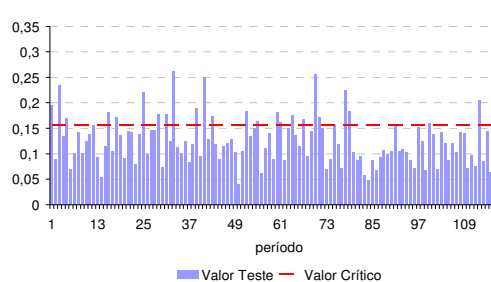
(b) Opção 0



(c) Opção 1



(d) Opção 4



(e) Opção 1AAS

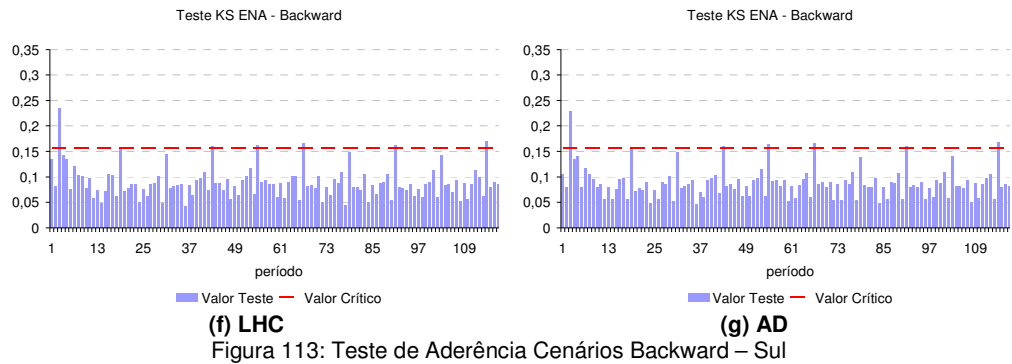
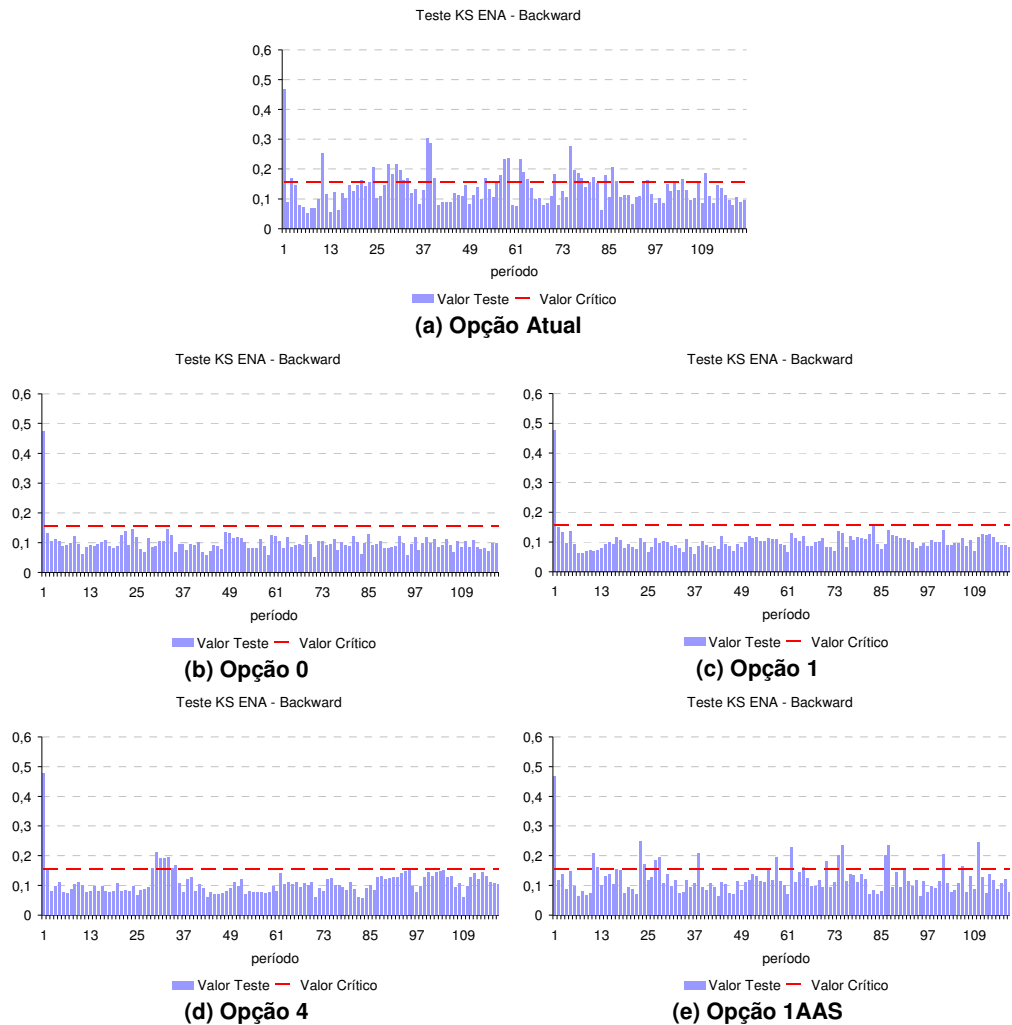


Figura 113: Teste de Aderência Cenários Backward – Sul

Analisando a Figura 114a até a Figura 114g pode-se verificar que, em geral, todas as opções apresentam bom nível de aceitação dos testes de aderência para o subsistema Nordeste. Novamente o maior índice de rejeição é observado na opção Atual, porém em nível menor do que o observado nos subsistemas Sul e Sudeste.



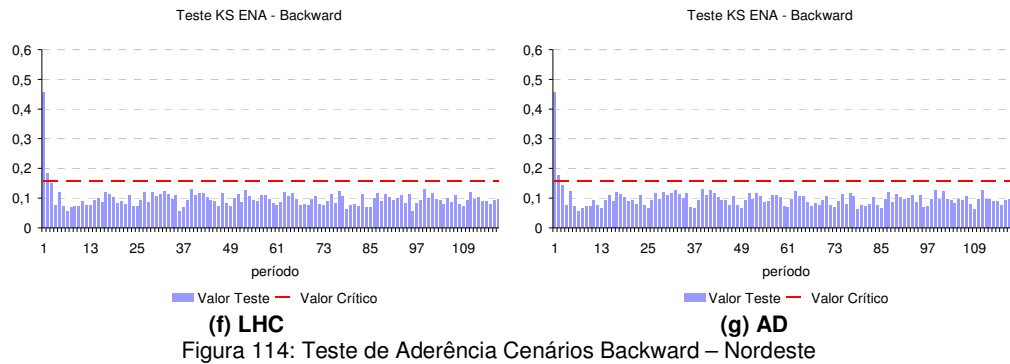
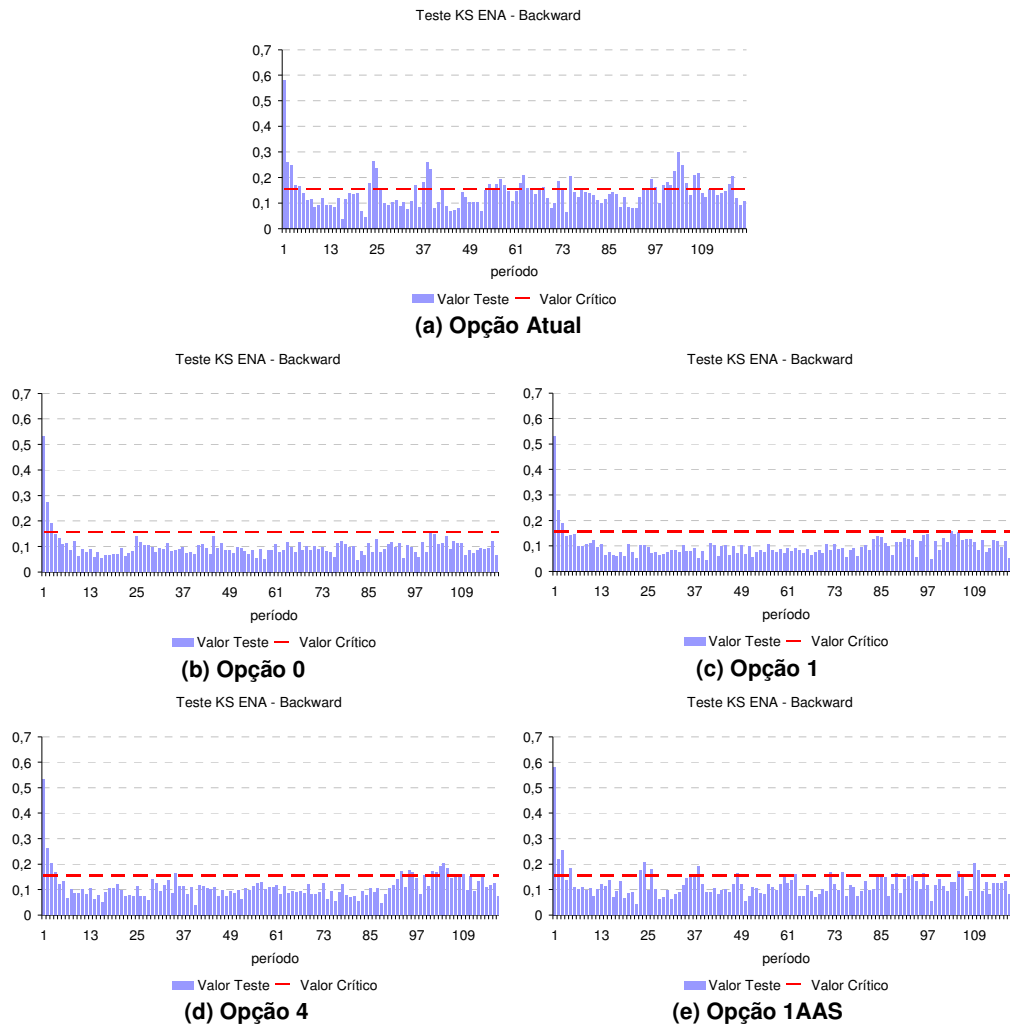
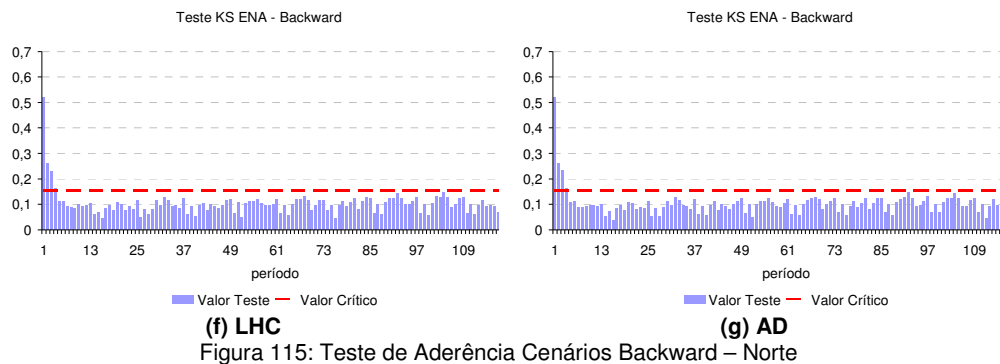


Figura 114: Teste de Aderência Cenários Backward – Nordeste

As mesmas considerações feitas para o subsistema Nordeste se aplicam ao subsistema Norte, como pode ser verificado da Figura 115a até a Figura 115g.





7.4.4.

Testes condicionados para média e desvio

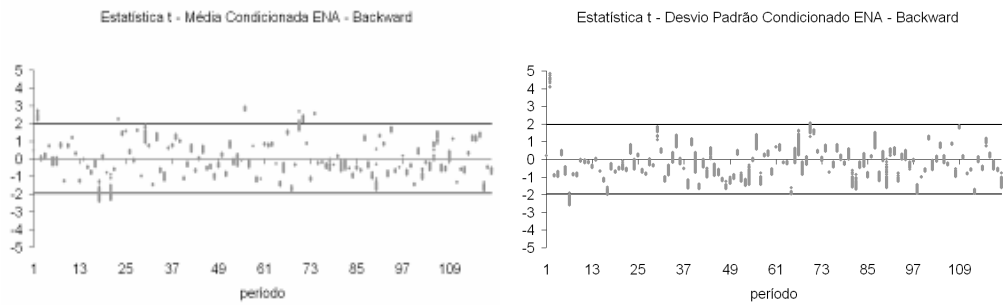
A seguir são realizados os testes condicionados para média e desvio padrão dos cenários gerados para o passo backward. Os parâmetros de população considerados nos testes são os valores teóricos calculados de acordo como o item 4.5.2. O nível de significância adotado é de 5%, e o intervalo de confiança do teste está destacado nos gráficos por linhas pretas.

Para cada período são calculadas as estatísticas t para todos os conjuntos de aberturas. Neste caso, são considerados 200 conjuntos de aberturas por período.

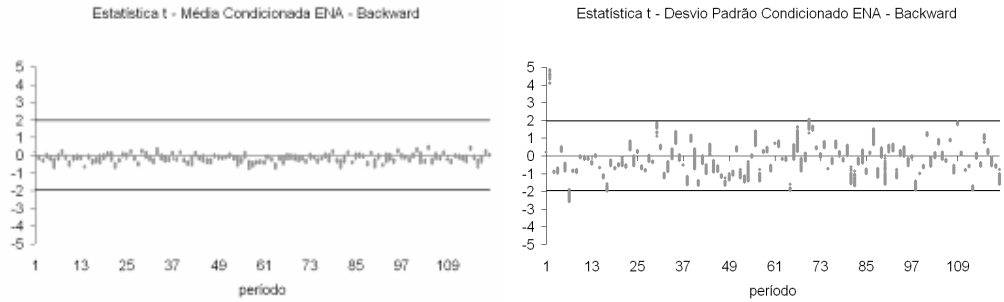
Como pode ser constatado da Figura 116a até a Figura 116g, as opções Atual e 1AAS apresentam uma maior variabilidade com relação às estimativas da média e do desvio-padrão. Isto ocorre porque o tamanho da amostra é relativamente pequeno (igual a 20 neste caso). Esta variabilidade tende a diminuir quando o tamanho da amostra aumenta, mas se o número de cenários backward for grande pode-se tornar inviável do ponto de vista computacional a resolução do problema de planejamento da operação energética.

Nota-se que mesmo utilizando uma amostra de tamanho reduzido, ao aplicar técnicas de agregação ou métodos de amostragem estratificada a variabilidade das estimativas de média e desvio se reduz bastante, exceto para o desvio-padrão da opção 0. A variabilidade do desvio-padrão obtida com a opção 0 está relacionada à degradação já existente nos cenários forward gerados por esta opção.

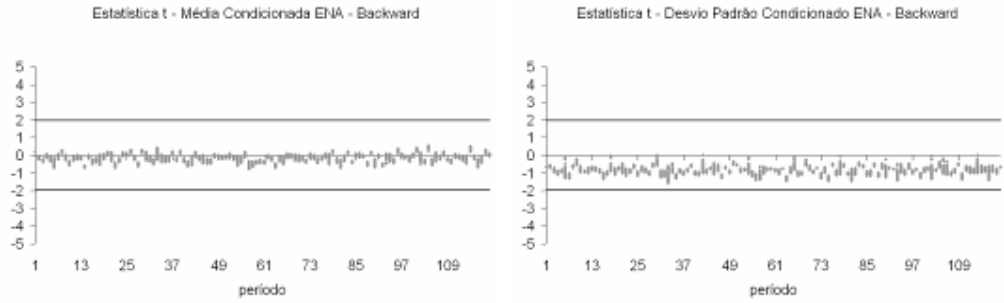
Conforme já mencionado anteriormente, é observado um pequeno viés para baixo na reprodução do desvio-padrão nas opções 1 e 4.



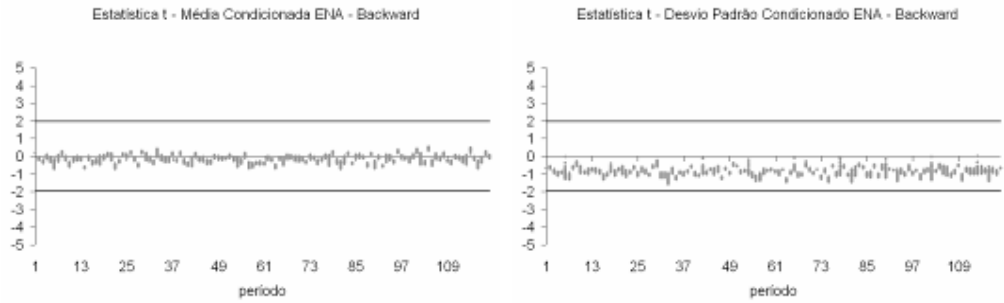
(a) Opção Atual



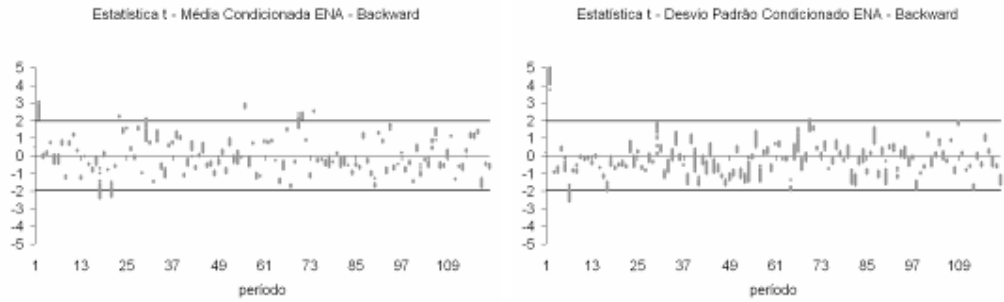
(b) Opção 0



(c) Opção 1



(d) Opção 4



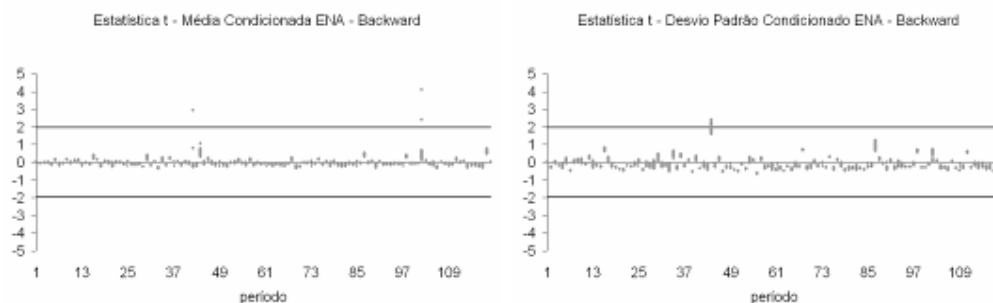
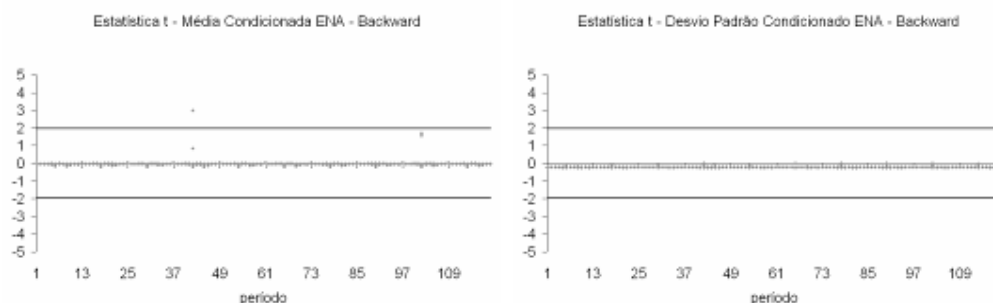
(e) Opção 1AAS**(f) Opção LHC****(g) Opção AD**

Figura 116: Estatística t Média e Desvio-Padrão – Cenários Backward - Sudeste

A análise e as conclusões obtidas para os demais subsistemas são análogas àquelas realizadas para o subsistema Sudeste. Os resultados podem ser verificados no Anexo B.

7.4.5.**Correlação Cruzada dos Cenários**

Neste item é avaliada a preservação da correlação cruzada para cada conjunto de cenários backward. A análise desta grandeza é realizada através de uma comparação dos resultados obtidos e os valores históricos.

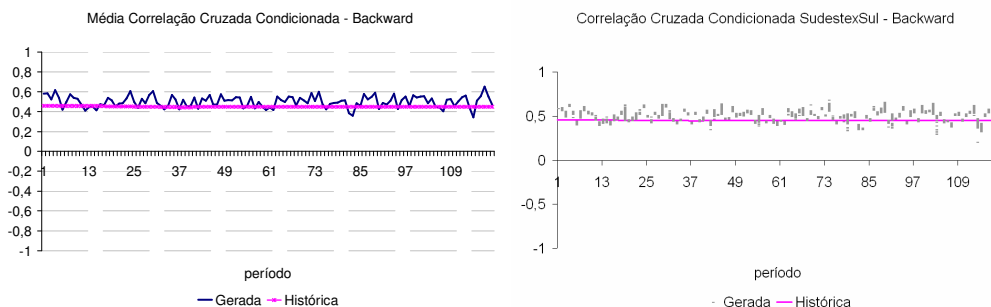
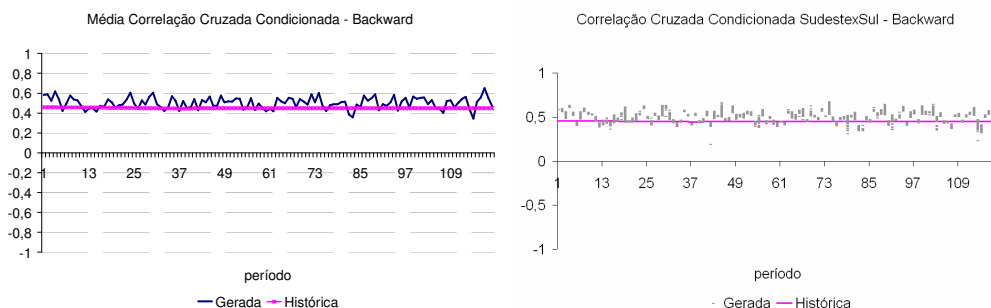
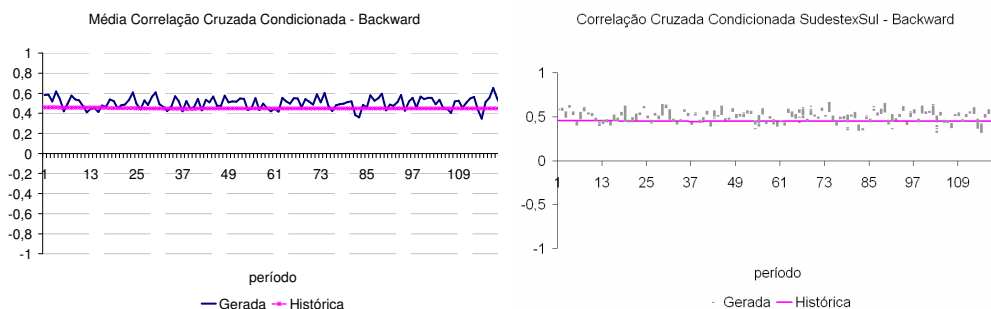
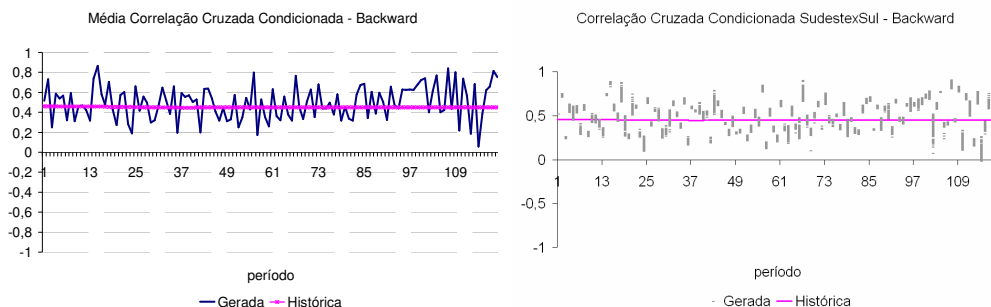
Na primeira coluna da Figura 117a até a Figura 117g é apresentada a evolução temporal da média da correlação cruzada entre os subsistemas Sudeste e Sul. Esta média é calculada a partir dos 200 valores obtidos de correlação cruzada para cada período, que são ilustrados na segunda coluna desta figura. Em ambos gráficos, a linha mais clara indica a correlação cruzada histórica.

Observe que há uma grande variação em torno do valor histórico para as opções Atual e 1AAS. A variabilidade bastante acentuada verificada para estas opções está relacionada ao tamanho da amostra utilizada.

Como pode ser observado na Figura 117, letras (f) e (g), as opções LHC e AD apresentam uma variabilidade com relação ao valor histórico. Além disso,

também apresentam uma tendência de redução no valor da correlação cruzada estimada. Isto ocorre por causa do tamanho limitado da amostra.

Mesmo considerando uma amostra de tamanho limitado, as opções que utilizam o processo de agregação conseguem preservar de maneira satisfatória a correlação cruzada histórica, conforme pode ser verificado nos resultados das opções 0, 1 e 4. Note também que ocorre uma menor variabilidade nos resultados.



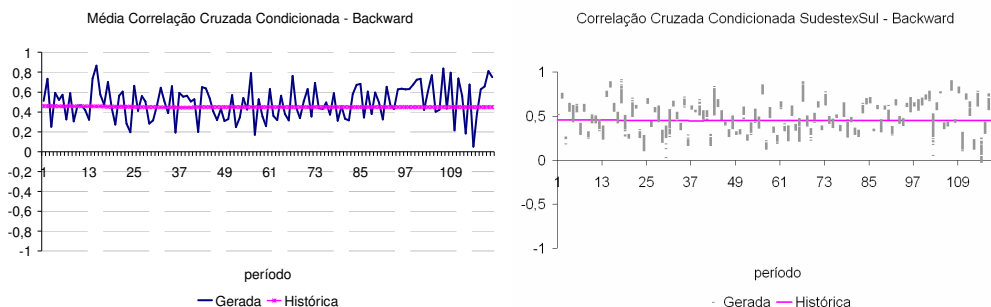
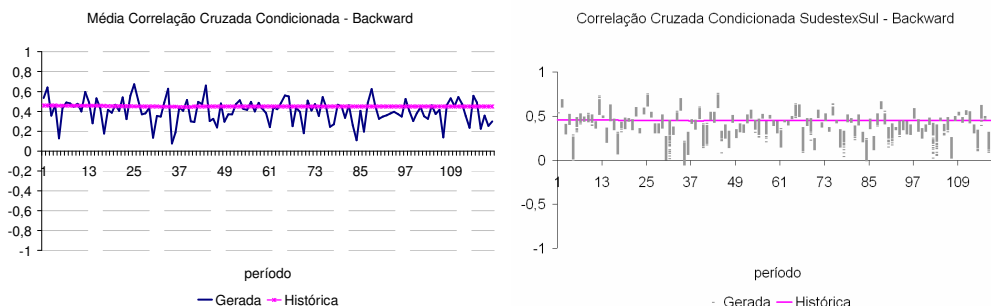
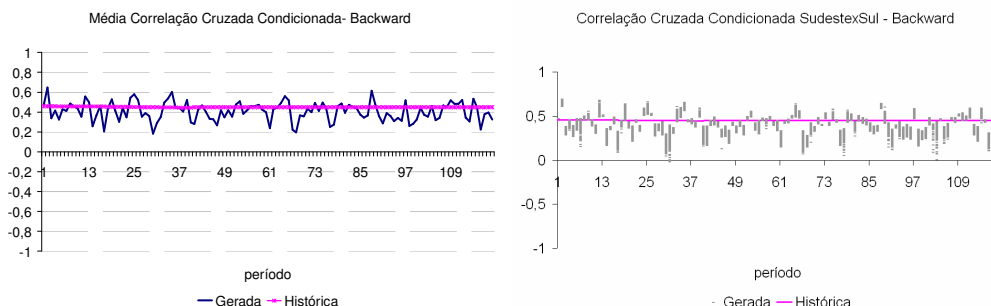
(d) Opção 4**(e) Opção 1AAS****(f) Opção LHC****(g) Opção AD**

Figura 117: Correlação Cruzada Cenários Backward – Sudeste x Sul

Os resultados obtidos para as correlações entre os demais subsistemas podem ser conferidos no Anexo B. Em geral, as mesmas observações realizadas neste item podem ser feitas às demais correlações.

É desejável que os cenários dos passos forward e backward representem a correlação cruzada de forma compatível e que ambas se aproximem do valor observado no histórico. Nas figuras a seguir são apresentadas as correlações cruzadas de cada conjunto cenário backward e a correlação cruzada dos cenários forward entre os subsistemas Sudeste e Sul. Pode-se verificar que para a opção Atual, Figura 118, apresenta uma grande variabilidade da correlação cruzada tanto para o passo backward quanto para o passo forward. Também pode-se observar que a correlação do passo forward está bem próxima das correlações do passo backward. Nas opções que utilizam o processo de agregação, Figura 119 a Figura 121, a variabilidade das correlações é bem

reduzida e a correlação do passo forward continua próxima das correlações do passo backward. Para as opções 1AAS, LHC e AD, observa-se uma grande variabilidade na correlação da backward, porém uma menor variação na correlação do passo forward, Figura 122 a Figura 124.

Correlação Cruzada Condicionada SudestexSul - Backward

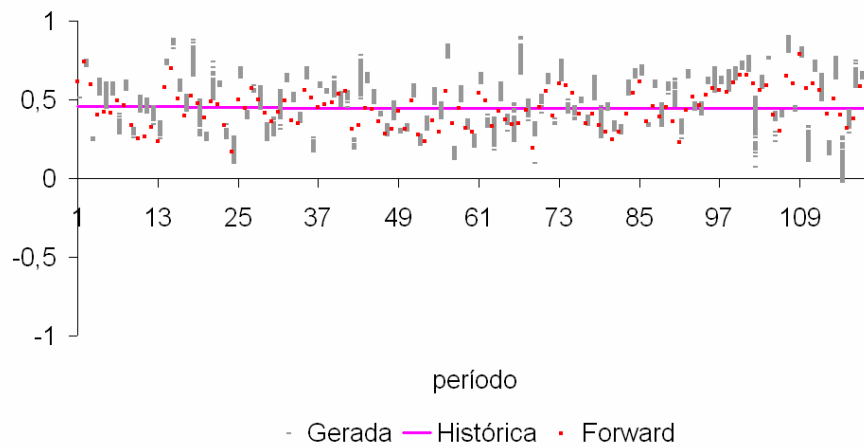


Figura 118: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção Atual

Correlação Cruzada Condicionada SudestexSul - Backward

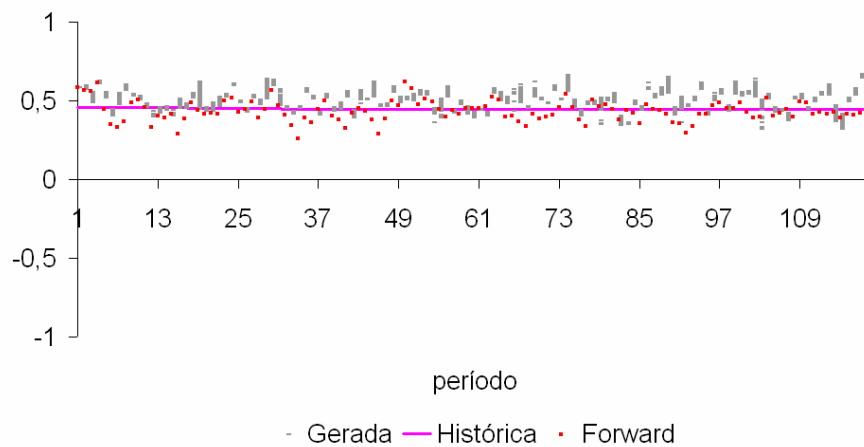


Figura 119: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção 0

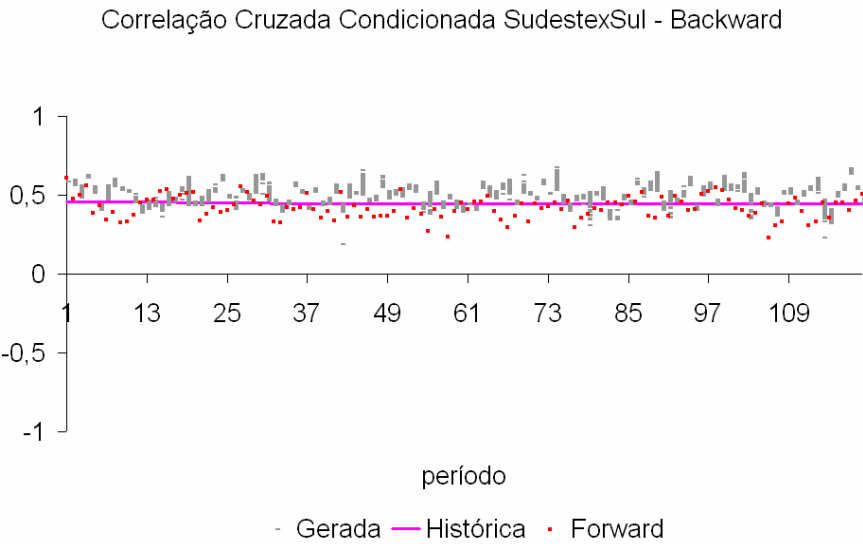


Figura 120: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção 1

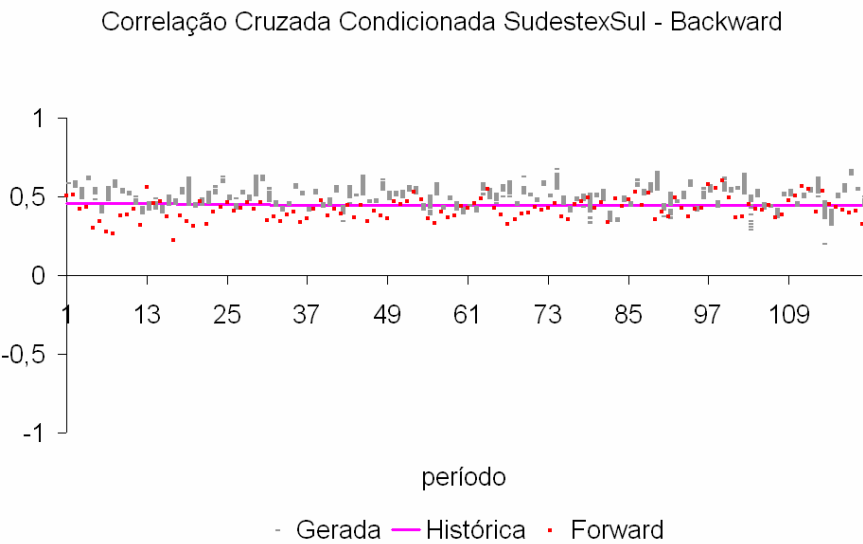


Figura 121: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção 4

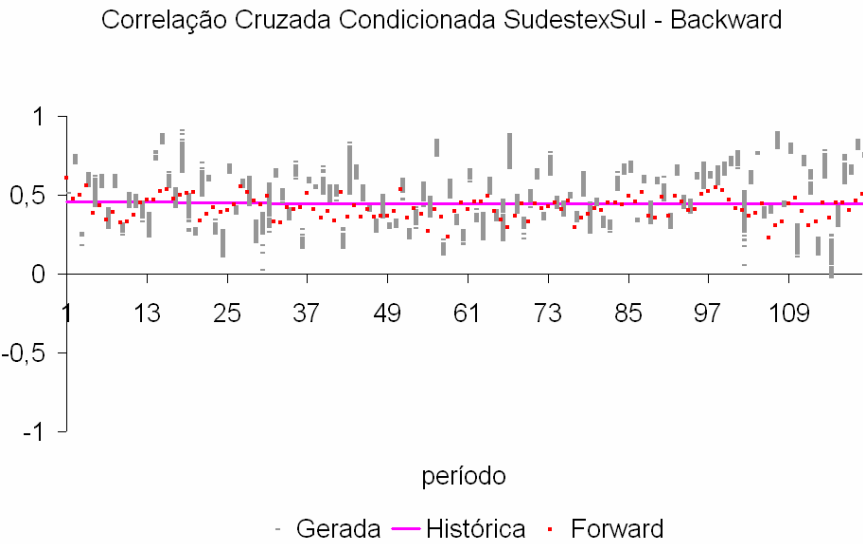


Figura 122: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção 1AAS

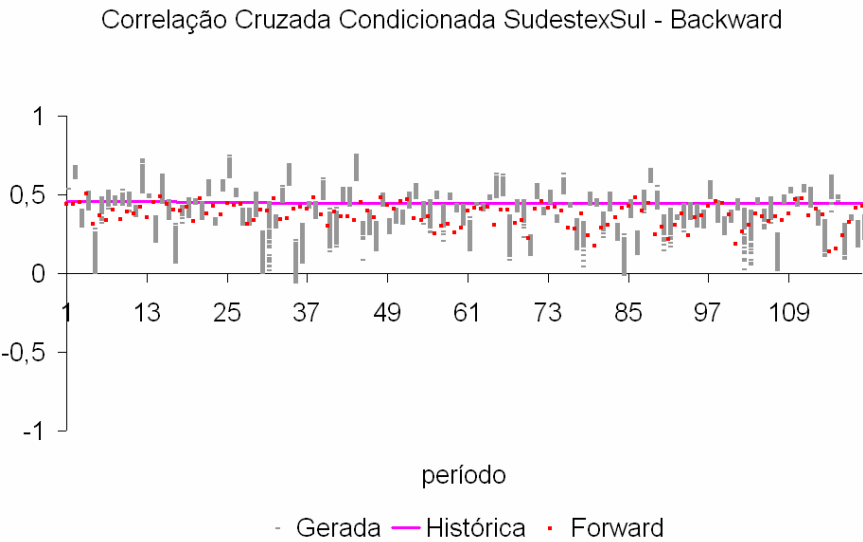


Figura 123: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção LHC

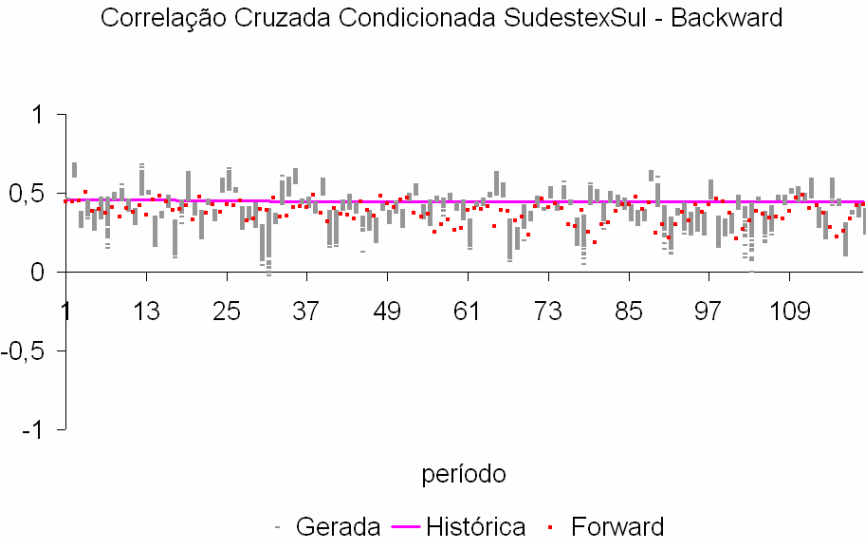


Figura 124: CC Backward x Forward – Sudeste x Sul – Opção AD

Na Tabela 11 é mostrada a correlação cruzada média não condicionada, ao longo de todo horizonte de estudo para opções. Da mesma forma como observado para a correlação cruzada condicionada, há dificuldade em preservar o valor da correlação cruzada histórica nas opções LHC e AD.

Tabela 11: Correlação Cruzada Média Cenários Backward – Não Condicionado

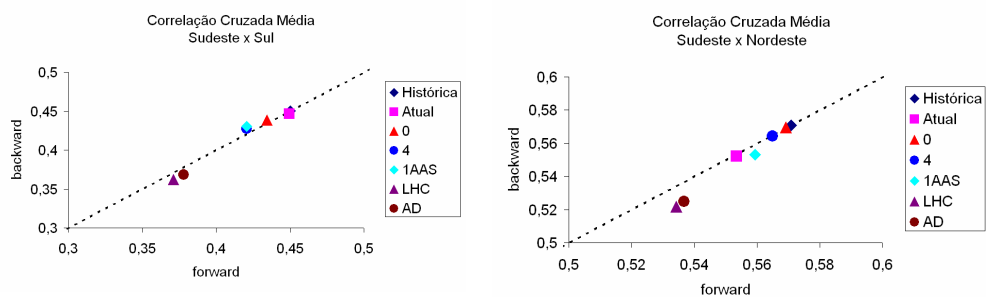
OPÇÃO	Sudeste-Sul	Sudeste-Nordeste	Sudeste-Norte	Sul-Nordeste	Sul-Norte	Nordeste-Norte
Histórico	0,4502	0,5709	0,4265	-0,0792	-0,1313	0,6372
Atual	0,4467	0,5521	0,3936	-0,0453	-0,1049	0,6253
0	0,4386	0,5696	0,4329	-0,0702	-0,1078	0,6528
1	0,4215	0,5616	0,4264	-0,0609	-0,1011	0,6453
4	0,4271	0,5644	0,4145	-0,061	-0,1036	0,6441
1AAS	0,4306	0,553	0,4151	-0,0586	-0,107	0,6416
LHC	0,362	0,5216	0,4009	-0,0525	-0,0753	0,5794
AD	0,3684	0,5249	0,4074	-0,0534	-0,0765	0,592

Quando os cenários backward e forward não são representados da mesma forma, por exemplo, com relação à correlação cruzada, podem ocorrer distorções durante a solução do problema de planejamento da operação. Suponha um caso extremo onde a correlação cruzada representada nos cenários backward é próxima de um, isto é todos os subsistemas são quase

perfeitamente correlacionados, e a correlação cruzada dos cenários forward é igual ao valor observado no histórico (diferente de 1). Neste caso, durante a simulação backward há uma grande probabilidade de visitar cenários muito críticos (todos os subsistemas secos) e cenários muito folgados (todos os subsistemas com bastante água). Durante a simulação forward a probabilidade de ocorrência destes cenários extremos é bem menor. Os cenários folgados não têm muito impacto na construção da FCF, pois a operação destes cenários tem custo praticamente igual a zero. Porém, cenários muito críticos podem elevar de sobremaneira o valor da FCF. Desta forma, o valor de ZINF, calculado considerando a função de custo futuro, pode assumir um valor bem alto, podendo inclusive ultrapassar o valor de ZSUP.

Caso ocorra o contrário, isto é, correlação cruzada dos cenários forward for maior do que a correlação dos cenários backward, o valor de ZSUP pode ser bem maior que o valor de ZINF, de forma que o processo não consiga convergir.

Na Figura 125 é ilustrada uma comparação entre as correlações cruzada dos cenários forward e a média das correlações cruzadas condicionadas dos cenários backward. A linha pontilhada indica uma reta com ângulo igual 45° e passando pela origem, isto é, quanto mais próximos os pontos estiverem desta linha maior a proximidade da representação da correlação cruzada nos cenários backward e forward. Note que em geral todas as opções, exceto as opções LHC e AD, representam da mesma forma a correlação cruzada nos cenários da backward e forward. As consequências desta representação para as opções LHC e AD serão discutidas no capítulo seguinte.



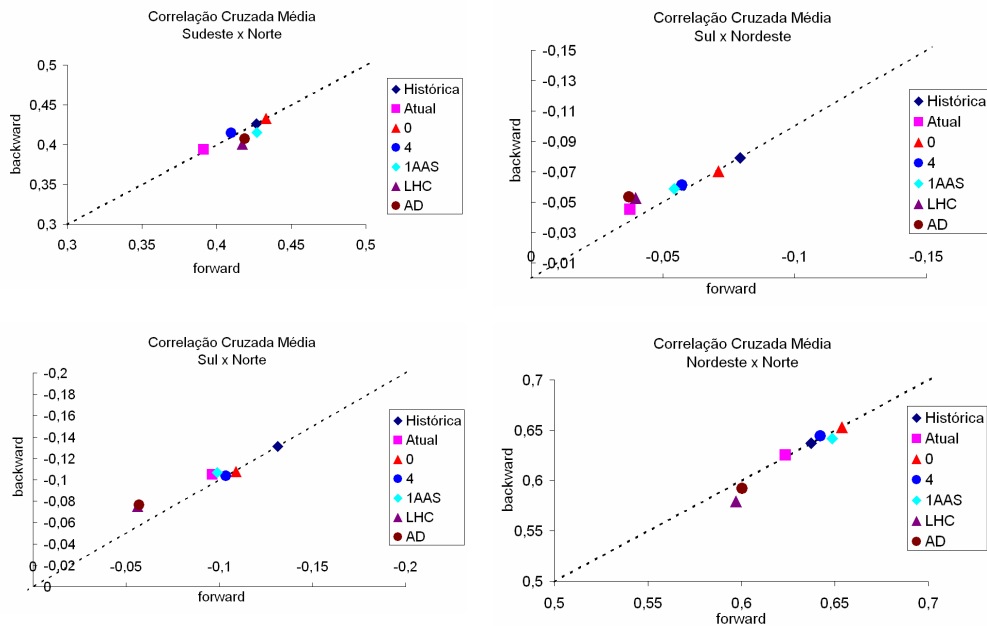


Figura 125: Comparação entre CC Forward e Backward

7.5. Resumo

Neste capítulo foi apresentada uma extensa avaliação dos cenários forward e backward gerados segundo as opções propostas neste trabalho. Além disso, foram testadas as amostras de ruídos que são usadas na geração dos cenários.

Durante as análises foi verificado que uma amostra de ruídos com tamanho igual a dois mil é suficiente para representar bem uma distribuição multivariada para quatro subsistemas. Para a geração da amostra de ruídos do passo forward, foi verificado uma dificuldade na preservação tanto da média quanto do desvio-padrão na opção Atual. O mesmo foi observado na opção 0 também. Para as demais opções, com destaque para as opções LHC e AD, foi observado que em geral as estatísticas analisadas são preservadas. Normalmente, as opções onde são utilizadas técnicas de agregação foi observada uma pequena degradação com relação ao desvio-padrão, principalmente com amostras de tamanho reduzido. Com relação à amostra utilizada no passo backward, pode-se verificar que os resultados das opções Atual e 1AAS apresentaram um pior desempenho se comparados com os resultados das demais opções.

Na opção Atual verificou-se um desempenho ruim para as estatísticas analisadas dos cenários de ENA para os passos forward e backward. Nas opções

onde são utilizadas técnicas de agregação de cenários, foi observado um comportamento bem satisfatório para média, desvio-padrão, teste de aderência e correlação cruzada. Foi verificada novamente uma pequena degradação no desvio-padrão. Com relação à correlação cruzada foi observada uma grande variação para as opções 1AAS, LHC e AD, sendo que nas duas últimas há uma tendência a gerar valores de correlação menores do que o observado no histórico. Nos testes de sequência negativa todas as opções foram aprovadas.

No próximo capítulo será apresentada uma avaliação dos resultados obtidos para o planejamento da operação energética de médio prazo utilizando os cenários gerados com as todas as opções propostas.