

5 Resultados obtidos

Ao longo do período de pesquisa, o modelo autorregressivo periódico foi detalhado e duas propostas de melhorias na modelagem foram desenvolvidas de formas independentes: identificação das ordens dos polinômios e uma forma alternativa para a geração de cenários hidrológicos. De forma não-proposital, a técnica de computação intensiva de *Bootstrap* foi empregada – de maneiras diferentes e particulares – em ambas as propostas.

Este capítulo tem por objetivo unir as propostas pesquisadas e avaliar os resultados e impactos no modelo, comparando com a modelagem tradicional utilizada atualmente.

5.1 Identificação das ordens “*p*”

Pela aplicação da técnica de *Bootstrap* para estimação dos coeficientes das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial, foram obtidas as estatísticas para ρ_k e φ_{kk} para cada um dos períodos (janeiro a dezembro) e para cada um dos *lags* selecionados em todos os subsistemas. Vale lembrar que na fase de estimação dos coeficientes do modelo empregou-se o método dos momentos. Segundo HIPEL & McLEOD (1994), para os modelos autorregressivos, os estimadores de momento são tão eficientes quanto os obtidos pelo método da máxima verossimilhança. Conforme já mencionado, os dados utilizados neste trabalho são de energia natural afluyente, periodicidade mensal, de janeiro de 1931 a dezembro de 2005, totalizando 75 anos de dados.

A seguir os resultados obtidos para as ordens de cada um dos períodos dos subsistemas brasileiros. Para a forma clássica de identificação, são mostrados os valores de *p* encontrados segundo os critérios estabelecidos. Para a proposta via *Bootstrap* são consideradas apenas as ordens referentes ao Critério 2 de identificação, haja vista que este foi considerado mais razoável do ponto de vista matemático e pela razoabilidade hidrológica, proposta por STEDINGER (2001).

O objetivo é, portanto, comparar os resultados obtidos por meio das duas modelagens e verificar a aplicabilidade da técnica proposta. Vale ressaltar que os critérios considerados são:

Critério 1: para cada período m procura-se a maior ordem i tal que todas as estimativas φ_{kk} para $k > i$ não sejam mais significativas, com ordem máxima igual a seis (seguindo a orientação usada pelo Newave).

Critério 2: para cada período m procura-se a maior ordem i tal que todas as estimativas φ_{kk} para $k < i$ sejam significativas. Este é o critério proposto por STEDINGER (2001) e não admite *lags* intermediários não-significantes. A ordem máxima considerada é seis.

	SUDESTE/CENTRO-OESTE		
	Clássica		Bootstrap
	Critério 1	Critério 2	Critério 2
Jan	5	1	1
Fev	6	1	1
Mar	1	1	1
Abr	2	2	2
Mai	3	1	1
Jun	1	1	1
Jul	3	3	3
Ago	1	1	1
Set	1	1	1
Out	3	3	2
Nov	1	1	1
Dez	4	1	1

Figura 5.1 – Ordens subsistema Sudeste/Centro-Oeste

Fonte: o autor (2009)

	SUL		
	Clássica		Bootstrap
	Critério 1	Critério 2	Critério 2
Jan	1	1	1
Fev	1	1	1
Mar	4	1	1
Abr	5	1	1
Maio	1	1	1
Jun	5	1	1
Jul	4	2	1
Ago	1	1	1
Set	1	1	1
Out	1	1	1
Nov	6	1	1
Dez	1	1	1

Figura 5.2 – Ordens subsistema Sul

Fonte: o autor (2009)

	NORDESTE		
	Clássica		Bootstrap
	Critério 1	Critério 2	Critério 2
Jan	1	1	1
Fev	4	2	1
Mar	1	1	1
Abr	1	1	1
Maio	1	1	1
Jun	1	1	3
Jul	1	1	1
Ago	1	1	1
Set	1	1	1
Out	3	1	1
Nov	2	2	1
Dez	5	1	1

Figura 5.3 – Ordens subsistema Nordeste

Fonte: o autor (2009)

	NORTE		
	Clássica		Bootstrap
	Critério 1	Critério 2	Critério 2
Jan	1	1	1
Fev	4	2	1
Mar	1	1	1
Abr	1	1	1
Mai	1	1	2
Jun	1	1	1
Jul	3	3	4
Ago	1	1	2
Set	5	1	2
Out	2	2	1
Nov	5	1	1
Dez	1	1	1

Figura 5.4 – Ordens subsistema Norte

Fonte: o autor (2009)

A análise dos resultados obtidos mostra que o emprego do *Bootstrap* para estimar os coeficientes das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial levou à identificação de ordens inferiores na maioria (92% dos casos) dos períodos de todos os subsistemas, tornando os modelos substancialmente mais parcimoniosos, um dos principais fundamentos da metodologia proposta por Box & Jenkins (1976), baseados na Teoria Geral de Sistemas Lineares. As exceções são o mês de junho no subsistema Nordeste e os períodos de agosto e setembro na Região Norte.

Ainda, a utilização do Critério 2 para seleção das ordens mostrou-se realmente mais adequada, confirmando o julgamento de STEDINGER (2001), numa análise em que o autor critica a forma clássica de identificação e afirma que a solução para o desafio enfrentado na modelagem seria a adoção de uma visão mais ampla do modelo de decisões que deve ser guiado pela razoabilidade hidrológica dos modelos selecionados com o reconhecimento da intrínseca ligação entre os modelos escolhidos para diferentes períodos. Em geral, as ordens identificadas pelo Critério 2 da identificação clássica e via *Bootstrap* foram idênticas, salvo as poucas exceções que, no caso extremo, diferiu em duas unidades (mês de junho no subsistema Nordeste).

5.2 Geração de cenários hidrológicos sintéticos

Nesta seção são apresentados os resultados e testes estatísticos comparativos referentes à geração dos cenários hidrológicos sintéticos, objetivo final do modelo PAR (p).

O método “clássico” de geração, implementado no Newave, ajusta uma distribuição Lognormal de três parâmetros aos resíduos mensais do modelo e realiza as simulações. Conforme descrito no Capítulo 2, esta estrutura gera uma não-linearidade no PAR (p). Desta forma, a proposta deste trabalho é gerar séries sintéticas a partir de sorteios com reposição dos resíduos históricos iid, obtidos na fase de ajuste do PAR (p) à série de dados históricos, eliminando o problema da não-linearidade e conservando a estrutura de defasagem autorregressiva linear do modelo, aplicável às estratégias de otimização utilizadas. Para ambas as propostas foram gerados 200 cenários de dez anos, totalizando 120 períodos em cada série e uma matriz de 200x120.

Os resultados expostos a seguir têm caráter comparativo, isto é, o modelo alternativo proposto é comparado ao clássico, implementado atualmente. É imperioso ressaltar que para modelagem tradicional utilizou-se o Critério 1 da identificação clássica, na tentativa de reproduzir o modelo Newave. Por sua vez, os cenários gerados via *Bootstrap* empregaram as ordens identificadas pelo emprego da mesma técnica, contudo utilizando o Critério 2, conforme mostrado na seção 5.1. As ordens selecionadas estão diretamente ligadas à estimação do número de coeficientes autorregressivos do PAR (p) e, conseqüentemente, aos resultados obtidos nas simulações dos cenários.

5.2.1 Envoltória e média dos cenários

A ideia desta seção é mostrar a envoltória dos cenários obtidos para cada um dos subsistemas e as médias destas séries em comparação à média histórica. A análise é visual e posteriormente são realizados os testes estatísticos. As próximas figuras mostram as envoltórias e os valores médios dos 200 cenários gerados de energia natural afluyente (linha pontilhada mais clara) e a média histórica (linha contínua preta) reproduzida para os dez anos de cenários sintéticos.

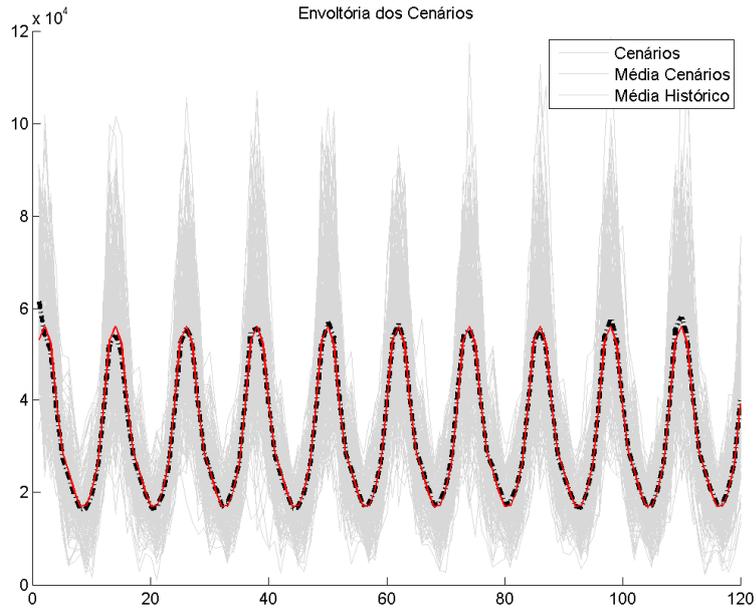


Figura 5.5 – Envolvória e médias sudeste via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

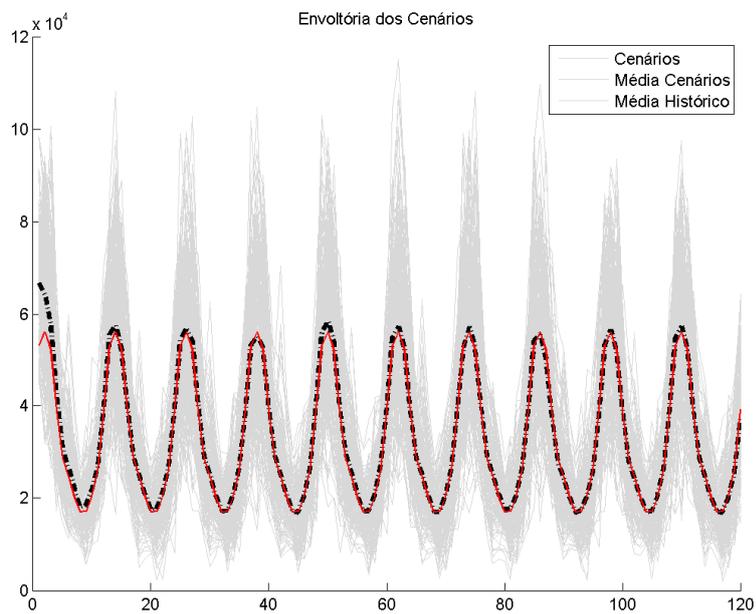


Figura 5.6 – Envolvória e médias sudeste via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

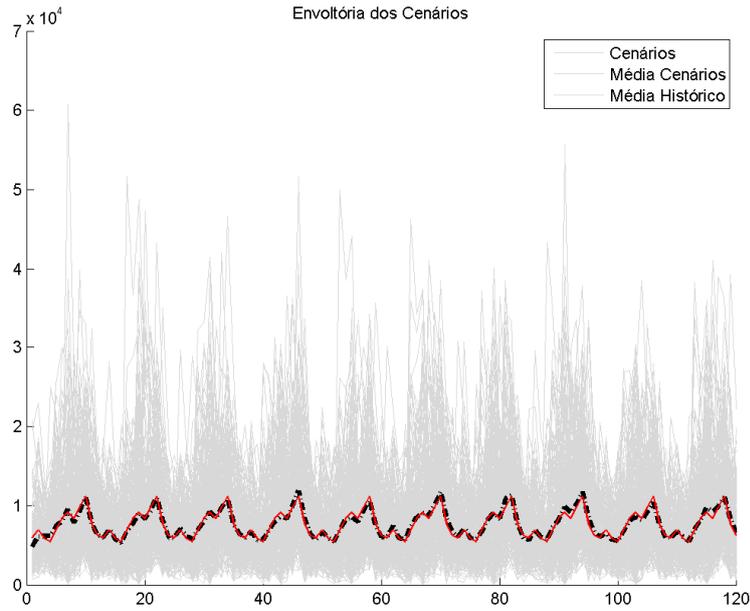


Figura 5.7 – Envoltória e médias sul via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

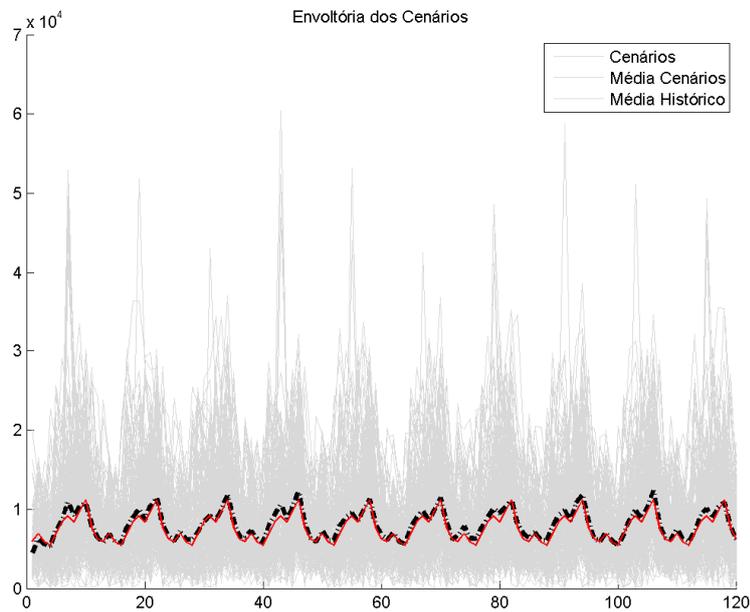


Figura 5.8 – Envoltória e médias sul via *Bootstrap*

Fonte: o autor (2009)

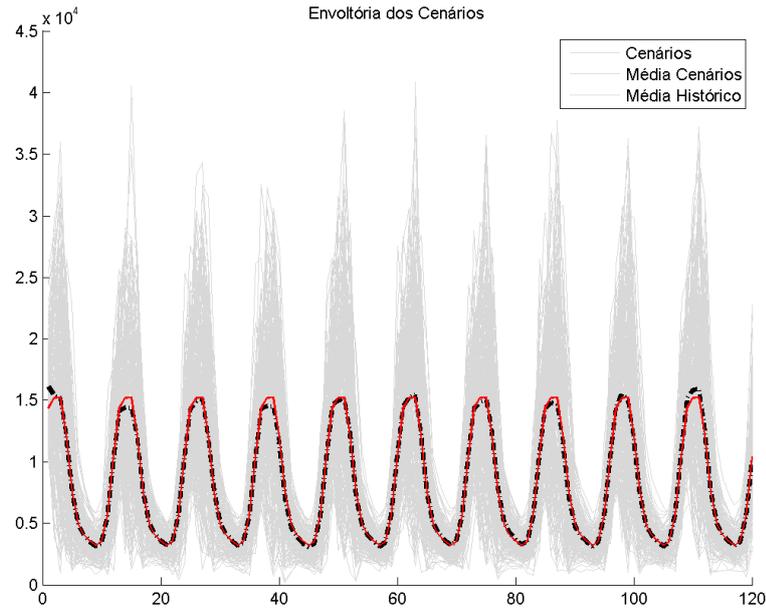


Figura 5.9 – Envolvória e médias nordeste via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

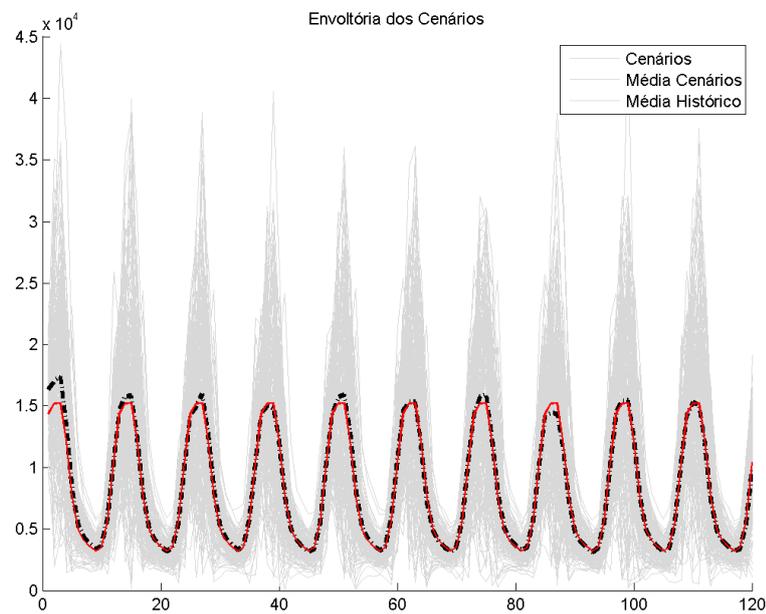


Figura 5.10 – Envolvória e médias nordeste via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

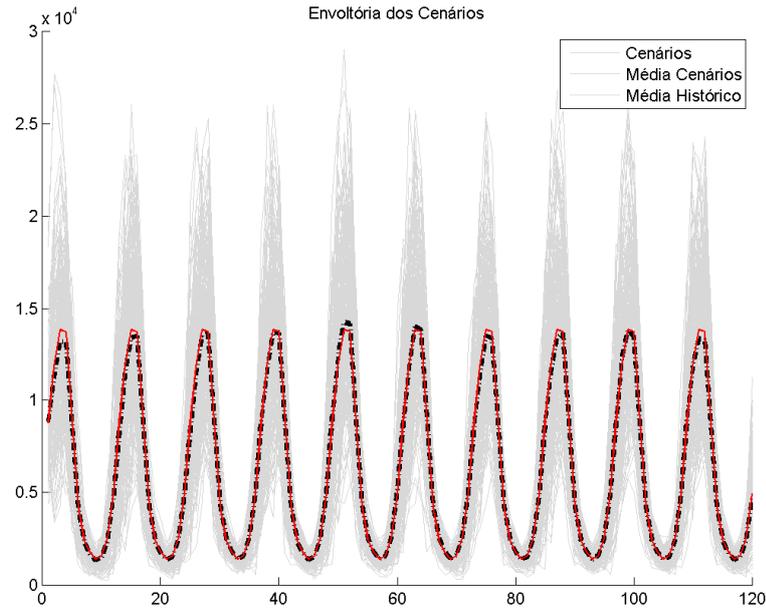


Figura 5.11 – Envoltória e médias norte via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

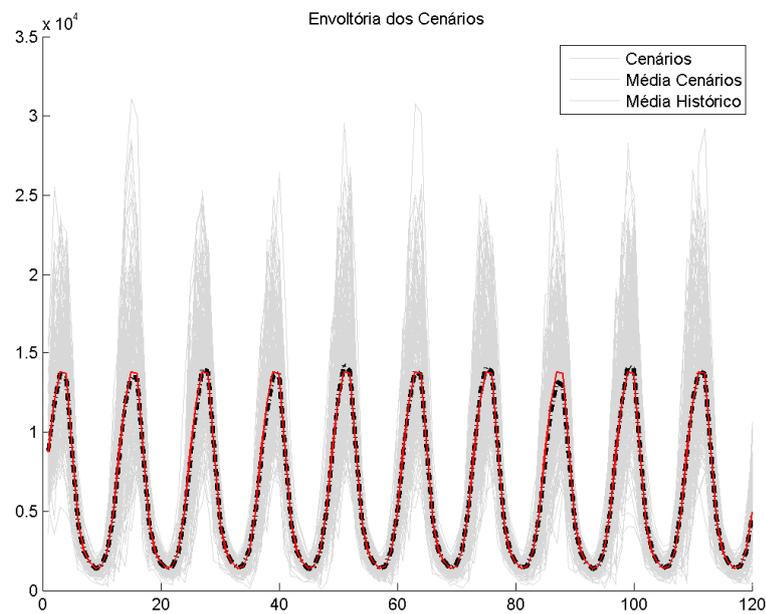


Figura 5.12 – Envoltória e médias norte via *Bootstrap*

Fonte: o autor (2009)

É possível notar que para todos os subsistemas todas as opções (geração via Lognormal e *Bootstrap*) são capazes de reproduzir bem a média histórica. Com exceção do subsistema Sul, as linhas médias praticamente se sobrepõem, indicando que os cenários gerados conseguiram reproduzir bem o histórico. A seguir uma visão mais detalhada, somente das linhas médias.

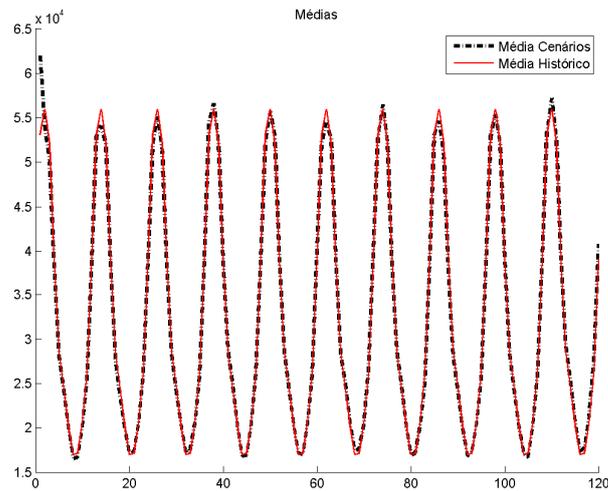


Figura 5.13 – Médias sudeste via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

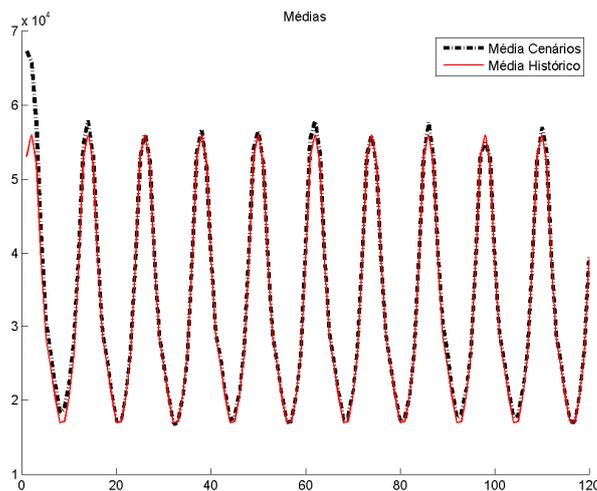


Figura 5.14 – Médias sudeste via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

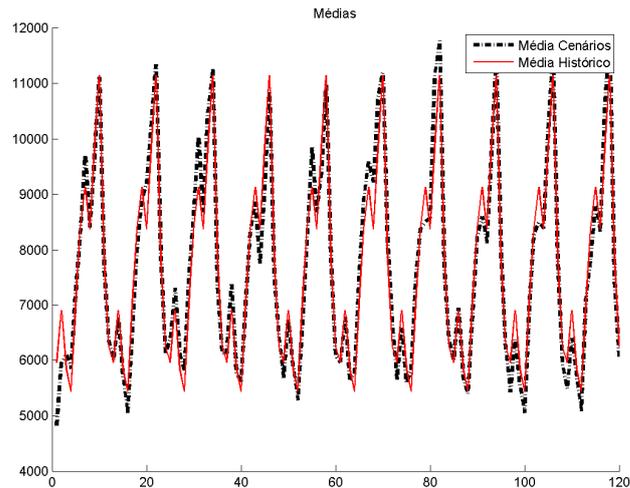


Figura 5.15 – Médias sul via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

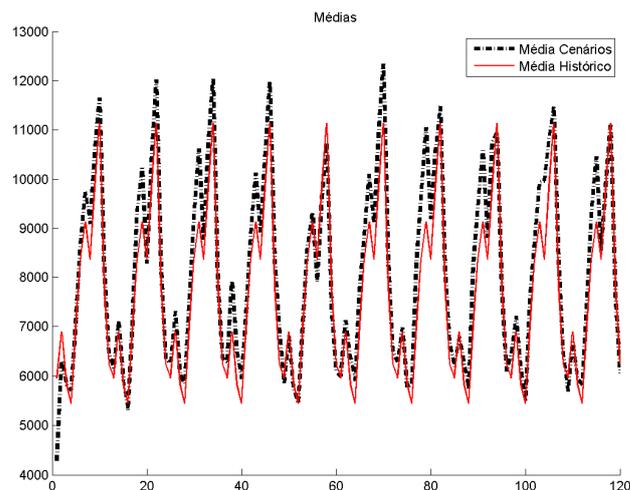


Figura 5.16 – Médias sul via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

Conforme comentado, a média dos cenários do subsistema Sul não é tão aderente à histórica, ao contrário do que é observado nas demais regiões. O Sul é a região com os menores valores e ENAs e as mais irregulares, o que torna difícil a reprodução nos cenários sintéticos.

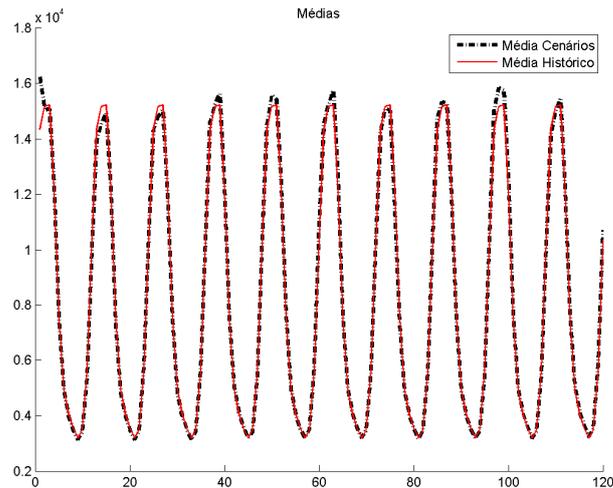


Figura 5.17 – Médias nordeste via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

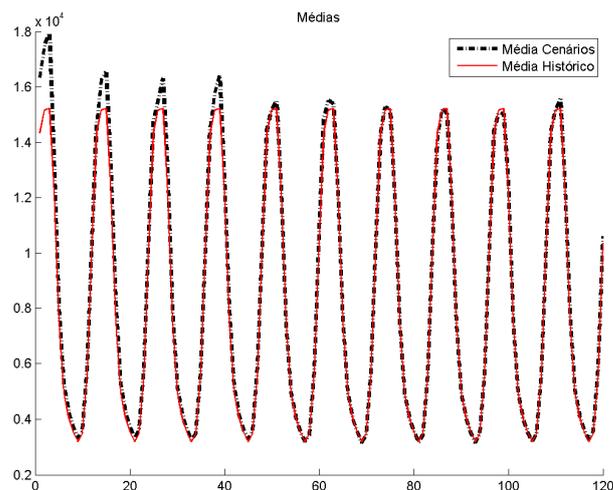


Figura 5.18 – Médias nordeste via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

Observando a Figuras 5.17 e 5.18, nota-se, assim como no Sudeste/Centro-Oeste, que a reprodução da média histórica no início da geração dos cenários é mais difícil em função da provável presença de valores atípicos nos últimos valores considerados para a geração das séries sintéticas. À medida que o tempo avança, as médias tornam-se mais aderentes e, ao final, praticamente se sobrepõem.

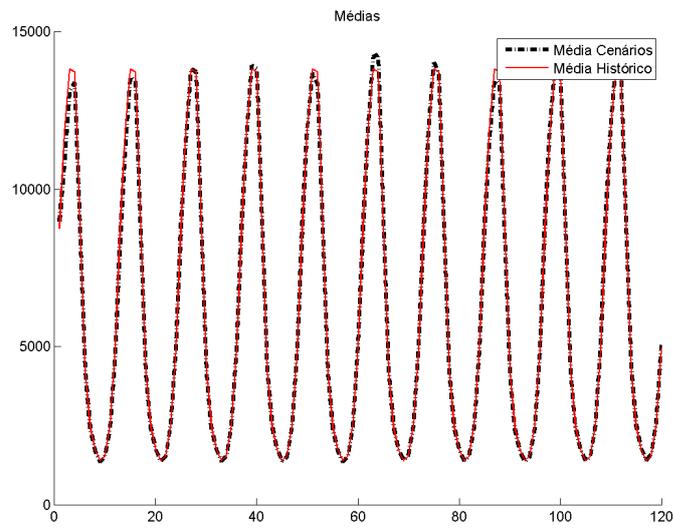


Figura 5.19 – Médias norte via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

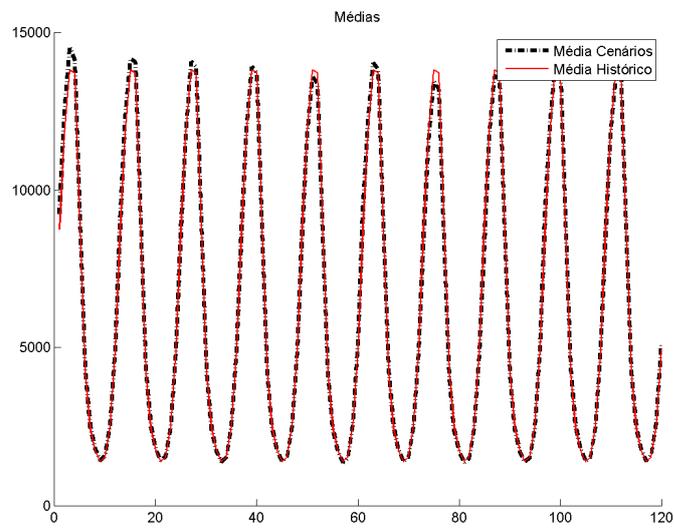


Figura 5.20 – Médias norte via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

Nas Figuras 5.21 e 5.22 são realizados dois testes estatísticos: *T-Test* e de Levene para igualdade de médias e variâncias. As colunas “Sig.” e “Sig. (2-tailed)” mostram os *p-values* para os testes *T-Test* e Levene, respectivamente. Para as opções de geração via Lognormal e *Bootstrap*, ao nível de significância de 5%, todos os *p-values* são aceitos e as hipóteses nulas não são rejeitadas. Desta forma, não há evidências estatísticas que mostrem quaisquer diferenças entre a média e variância das médias históricas e geradas.

Testes para amostras independentes

		Teste de Levene para igualdade de variâncias		t-test para igualdade de médias						
		F	Sig.	t	df	Sig. (bilateral)	Diferença da média	Desvio padrão da diferença	Intervalo de confiança de 95% para o intervalo da diferença de médias	
									Inferior	Superior
Media_Sudeste	Igualdade de variância assumida	,001	,971	-,013	238	,989	-24,40000	1809,4607	-3589,000	3540,204
	Igualdade não assumida			-,013	238,000					
Media_Sul	Igualdade de variância assumida	,438	,509	,017	238	,986	3,88083	227,54929	-444,3870	452,14873
	Igualdade não assumida			,017	236,708					
Media_Nordeste	Igualdade de variância assumida	,590	,808	,063	238	,950	38,49250	607,59439	-1158,460	1235,442
	Igualdade não assumida			,063	236,958					
Media_Norte	Igualdade de variância assumida	,010	,920	-,051	238	,959	-30,60417	597,91714	-1208,490	1147,282
	Igualdade não assumida			-,051	237,993					

Figura 5.21 – Testes estatísticos para as médias via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

Testes para amostras independentes

		Teste de Levene para igualdade de variâncias		t-test para igualdade de médias						
		F	Sig.	t	df	Sig. (bilateral)	Diferença da média	Desvio padrão da diferença	Intervalo de confiança de 95% para o intervalo da diferença de médias	
									Inferior	Superior
Media_Sudeste	Igualdade de variância assumida	,128	,721	,375	238	,708	689,38333	1838,7854	-2932,99	4311,757
	Igualdade não assumida			,375	237,774					
Media_Sul	Igualdade de variância assumida	3,385	,067	1,536	238	,126	358,74833	233,52863	-101,299	818,79541
	Igualdade não assumida			1,536	234,583					
Media_Nordeste	Igualdade de variância assumida	,450	,503	,406	238	,685	250,63167	616,63786	-964,134	1465,397
	Igualdade não assumida			,406	237,580					
Media_Norte	Igualdade de variância assumida	,000	,984	,005	238	,996	2,91250	599,93701	-1178,95	1184,777
	Igualdade não assumida			,005	237,999					

Figura 5.22 – Testes estatísticos para as médias via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

A seguir uma análise mais detalhada dos cenários mostrando a evolução os *p-values*. Visto que as séries históricas de ENAs são estacionárias de segunda ordem, testa-se, por meio do *T-Test*, a hipótese da média dos 200 elementos de cada um dos 120 períodos da matriz de cenários ser igual à média das 75 observações de cada um dos meses da série histórica. Nos gráficos são mostrados os *p-values* dos testes ao longo dos dez anos de cenários gerados. Em todas as situações o índice de ‘aprovação’ dos *p-values* (valores maiores que 0,05) fica acima de 92%, indicando a igualdade de médias entre os períodos dos cenários e da série original.

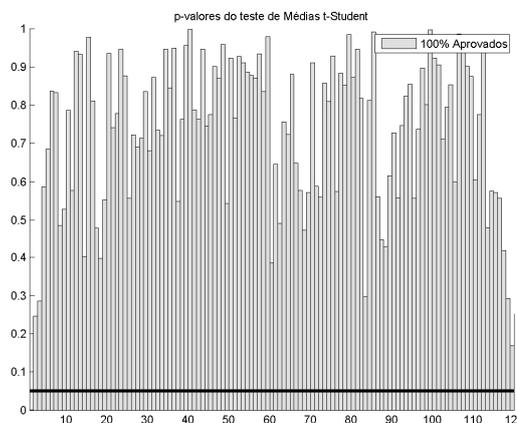


Figura 5.23 – *p-values* do *T-Test*, sudeste, via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

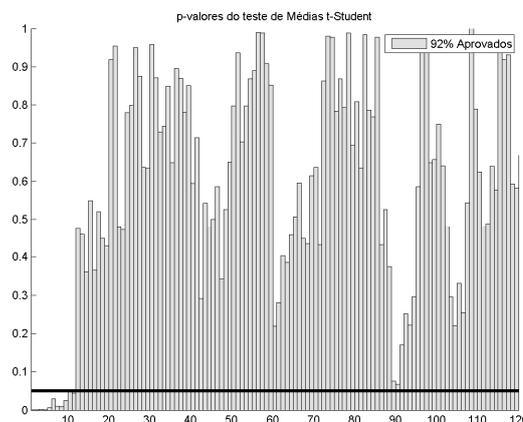


Figura 5.24 – *p-values* do *T-Test*, sudeste, via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

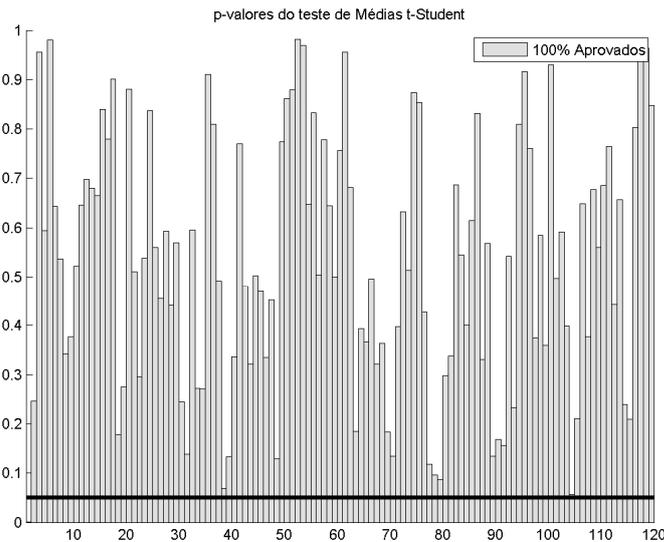


Figura 5.25 – *p-values* do *T-Test*, sul, via Lognormal
Fonte: o autor (2009)

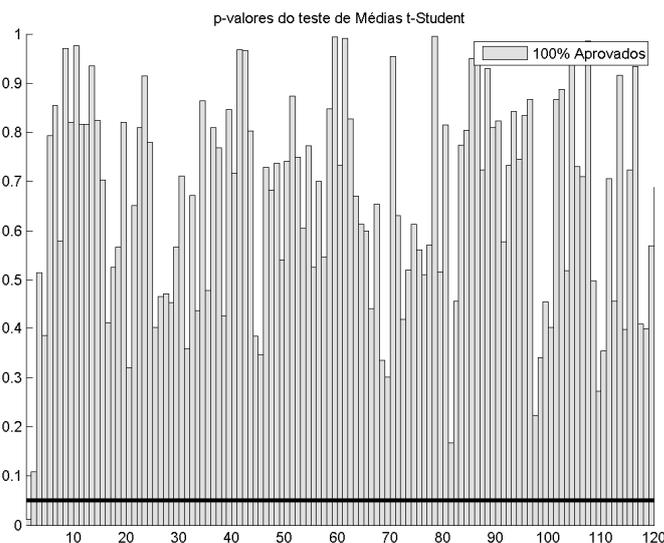


Figura 5.26 – *p-values* do *T-Test*, sul, via Bootstrap
Fonte: o autor (2009)

Analisando as Figuras 5.25 e 5.26, nota-se aprovação de todos os *p-values*. Apesar de as linhas das médias histórica e gerada não serem tão aderentes, quando se faz a análise detalhada, a hipótese nula não é rejeitada para nenhum período, ainda que grande parte dos *p-values* não apresentem valores altos, são sempre maiores que o valor de teste.

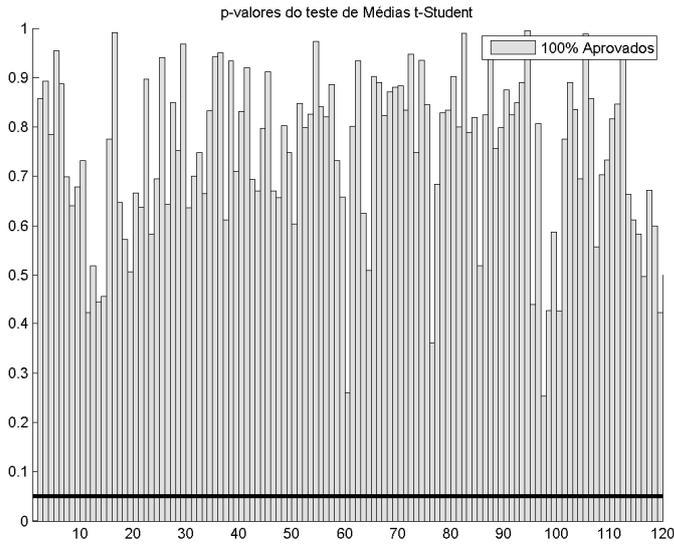


Figura 5.27 – *p-values* do *T-Test*, nordeste, via Lognormal
Fonte: o autor (2009)

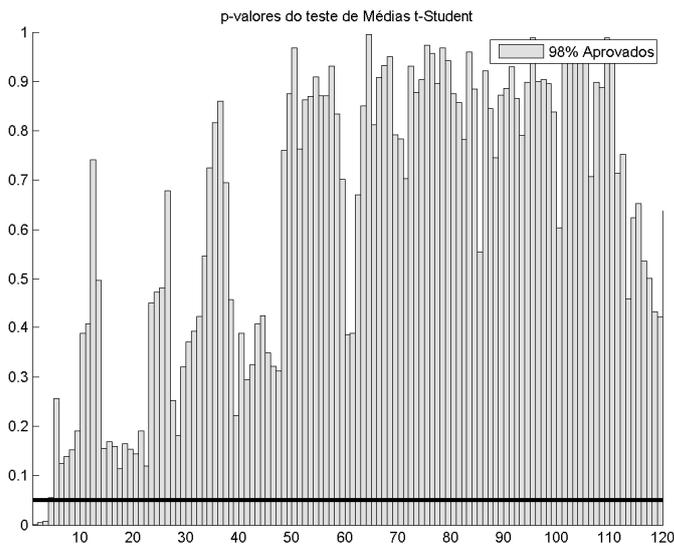


Figura 5.28 – *p-values* do *T-Test*, nordeste, via Bootstrap
Fonte: o autor (2009)

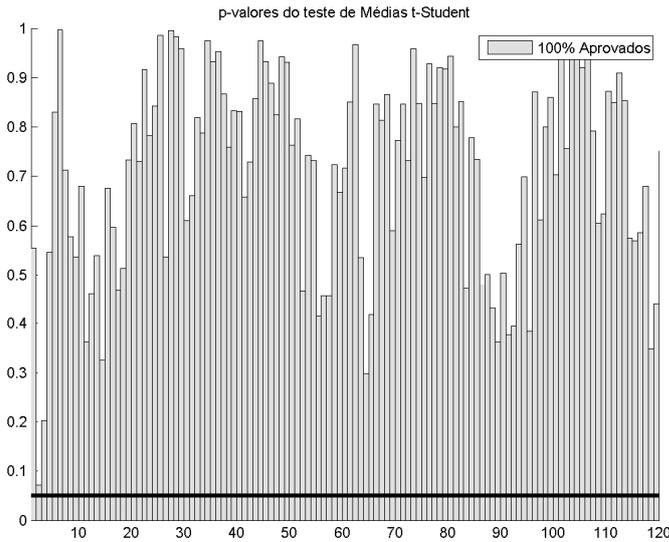


Figura 5.29 – *p-values* do *T-Test*, norte, via Lognormal
Fonte: o autor (2009)

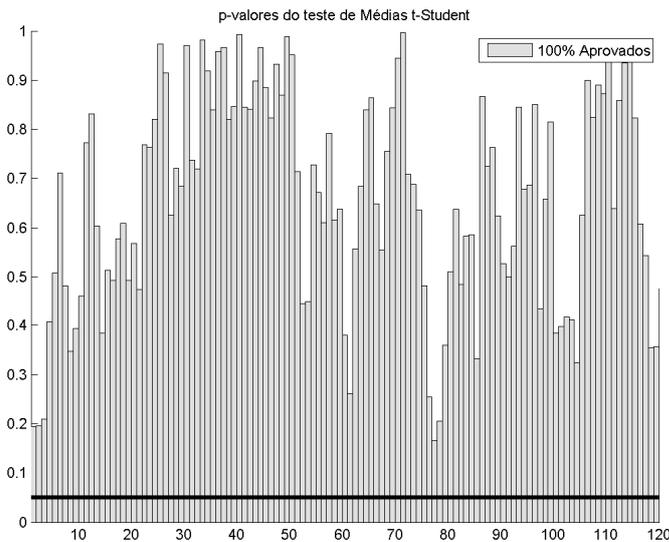


Figura 5.30 – *p-values* do *T-Test*, norte, via *Bootstrap*
Fonte: o autor (2009)

Apesar da dificuldade de reprodução do histórico nos primeiros períodos do subsistema Nordeste para a proposta via *Bootstrap*, os testes mostram-se muito satisfatórios, assim como no Norte.

Nota-se, portanto, que a proposta deste trabalho conseguiu reproduzir bem as médias históricas, assim como o método clássico de geração de cenários.

5.2.2 Desvio-padrão dos cenários

Nesta seção são apresentados gráficos comparativos entre os desvios-padrão dos cenários e da série histórica, assim como a evolução temporal dos *p-values* do teste de Levene para comparação de igualdade de variâncias (o nível de significância adotado é de 5%, o valor crítico do *p-value* é representado por uma linha contínua).

De forma análoga aos testes realizados anteriormente, são mostrados gráficos que sobrepõem os desvios da série original e dos cenários sintéticos. Apesar de a sobreposição não ser tão sensível quanto às análises de médias, por meio dos testes estatísticos (ver Figuras 5.39 e 5.40) a hipótese nula de igualdade de médias (*T-Test*) e variâncias (Levene) não pode ser rejeitada em nenhuma das situações para todos os subsistemas. Isto equivale a dizer que os cenários também reproduziram de forma satisfatória o segundo momento da série original. A mesma análise de evolução de *p-values* é feita neste item para o Teste de Levene para cada um dos períodos da série sintética em comparação com os correspondentes do histórico.

Assim, pode-se concluir que os cenários gerados pelo modelo proposto, via *Bootstrap*, em substituição à modelagem que faz uso da distribuição Lognormal (incorporando a não-linearidade no PAR (p)), reproduz de forma satisfatória os dois primeiros momentos estatísticos da série real de energia natural afluyente para todos os períodos.

Nas figuras a seguir, a linha pontilhada representa o desvio-padrão dos cenários e a linha contínua a mesma medida para a série histórica original.

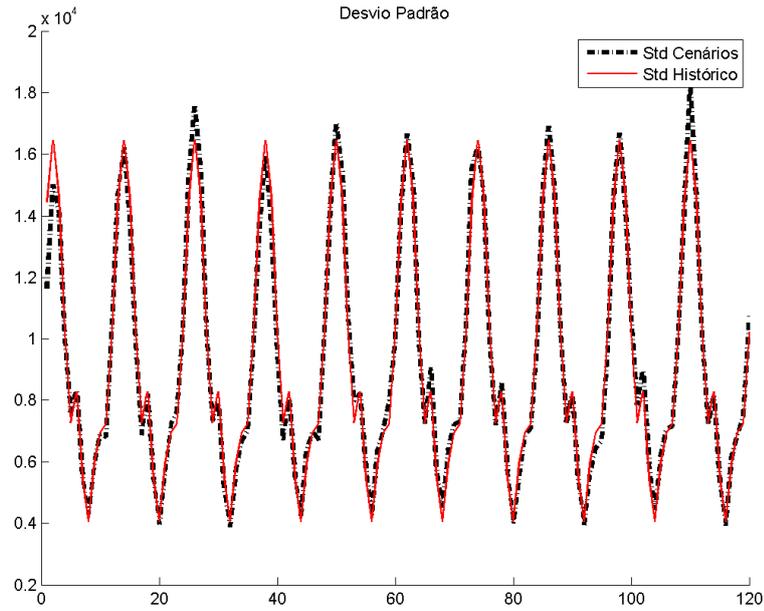


Figura 5.31 – Desvio-padrão sudeste via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

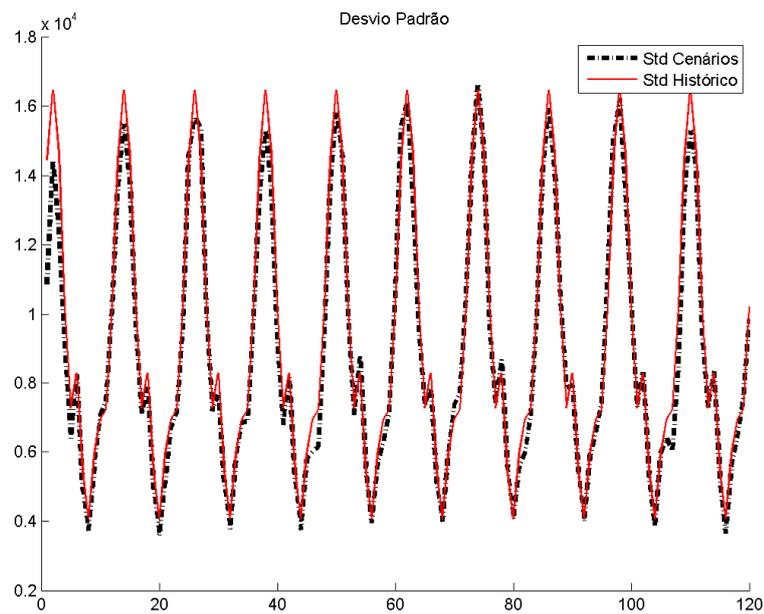


Figura 5.32 – Desvio-padrão sudeste via *Bootstrap*

Fonte: o autor (2009)

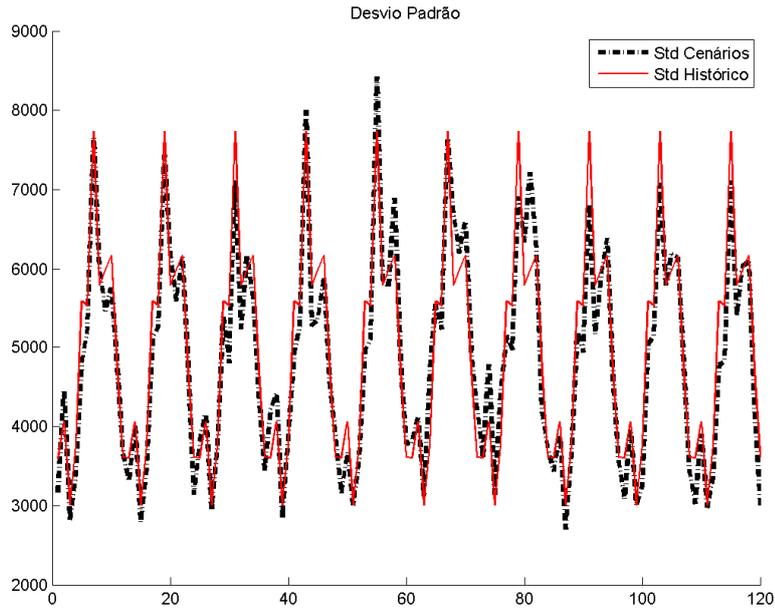


Figura 5.33 – Desvio-padrão sul via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

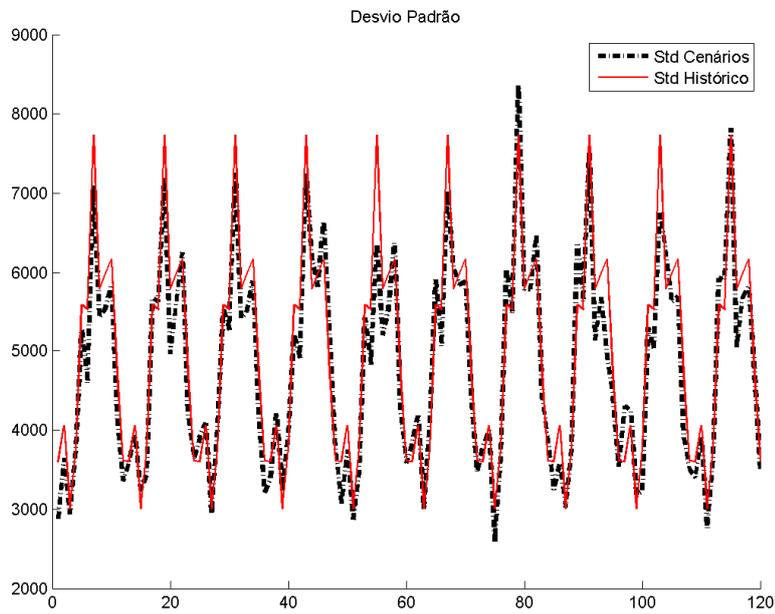


Figura 5.34 – Desvio-padrão sul via *Bootstrap*

Fonte: o autor (2009)

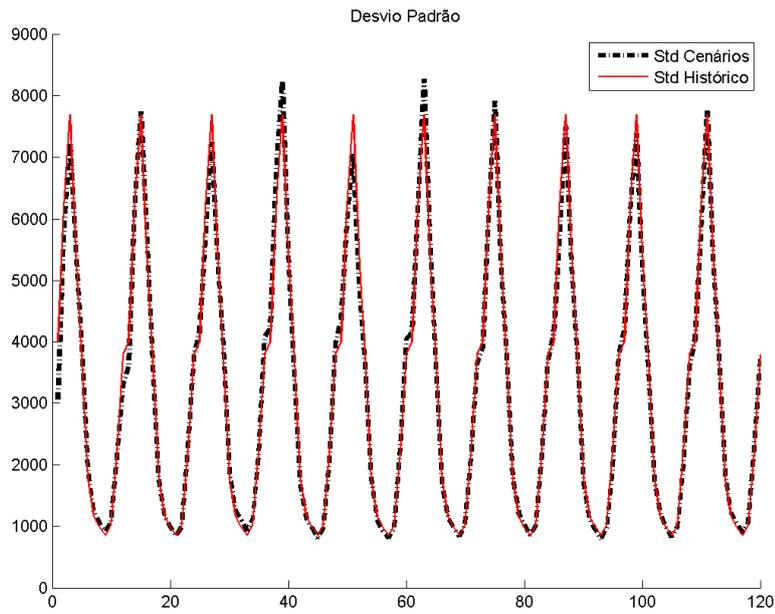


Figura 5.35 – Desvio-padrão nordeste via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

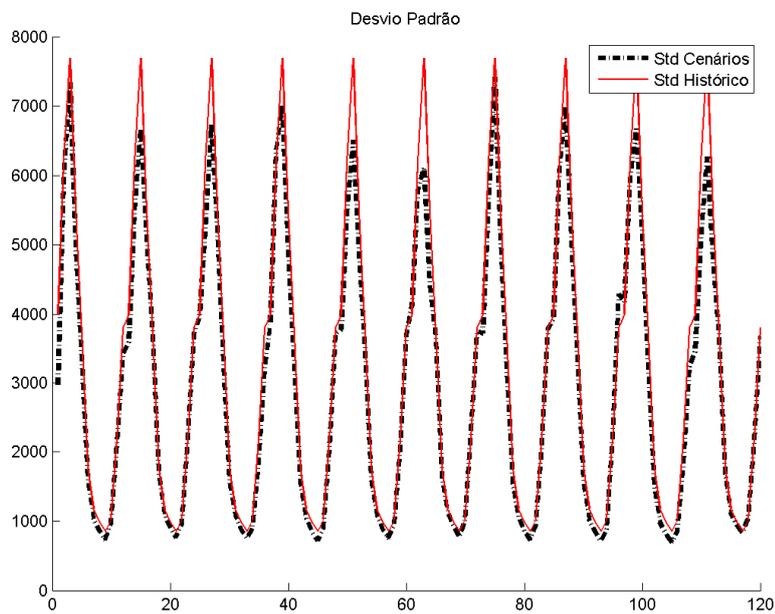


Figura 5.36 – Desvio-padrão nordeste via *Bootstrap*

Fonte: o autor (2009)

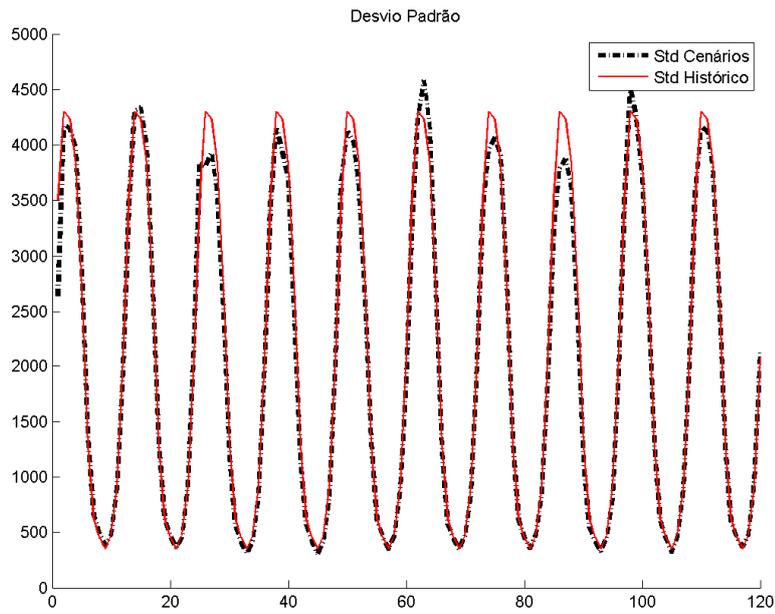


Figura 5.37 – Desvio-padrão norte via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

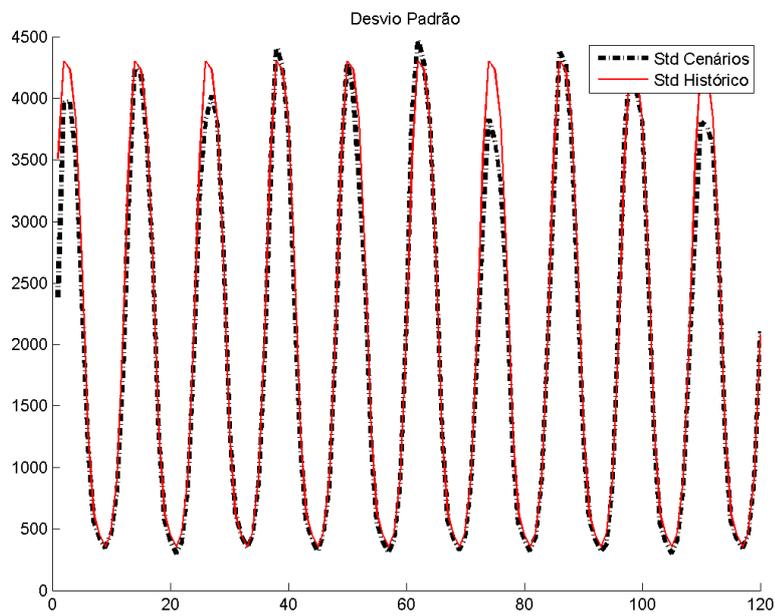


Figura 5.38 – Desvio-padrão nordeste via *Bootstrap*

Fonte: o autor (2009)

Testes para amostras independentes

		Teste de Levene para igualdade de variâncias		t-test para igualdade de médias						
		F	Sig.	t	df	Sig. (bilateral)	Diferença da média	Desvio padrão da diferença	Intervalo de confiança de 95% para o intervalo da diferença de médias	
									Inferior	Superior
Desvio_Sudeste	Igualdade de variância assumida	,016	,901	,020	238	,984	10,02500	498,51362	-972,038	992,08762
	Igualdade não assumida			,020	237,995	,984	10,02500	498,51362	-972,038	992,08773
Desvio_Sul	Igualdade de variância assumida	,712	,399	-,764	238	,446	-132,05500	172,84079	-472,548	208,43817
	Igualdade não assumida			-,764	237,995	,446	-132,05500	172,84079	-472,548	208,43820
Desvio_Nordeste	Igualdade de variância assumida	,037	,848	-,121	238	,904	-34,10967	282,91358	-591,444	523,22487
	Igualdade não assumida			-,121	237,964	,904	-34,10967	282,91358	-591,444	523,22529
Desvio_Norte	Igualdade de variância assumida	,121	,729	-,287	238	,775	-55,51083	193,61677	-436,932	325,91062
	Igualdade não assumida			-,287	237,899	,775	-55,51083	193,61677	-436,932	325,91145

Figura 5.39 – Testes estatísticos para o desvio-padrão via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

Testes para amostras independentes

		Teste de Levene para igualdade de variâncias		t-test para igualdade de médias						
		F	Sig.	t	df	Sig. (bilateral)	Diferença da média	Desvio padrão da diferença	Intervalo de confiança de 95% para o intervalo da diferença de médias	
									Inferior	Superior
Desvio_Sudeste	Igualdade de variância assumida	,194	,660	-,640	238	,523	-314,87500	491,86670	-1283,84	654,09332
	Igualdade não assumida			-,640	237,880	,523	-314,87500	491,86670	-1283,85	654,09583
Desvio_Sul	Igualdade de variância assumida	,328	,568	-,142	238	,255	-196,57750	172,10998	-535,631	142,47599
	Igualdade não assumida			-,142	237,960	,255	-196,57750	172,10998	-535,631	142,47628
Desvio_Nordeste	Igualdade de variância assumida	,499	,480	-,654	238	,514	-181,45892	277,54189	-728,211	365,29348
	Igualdade não assumida			-,654	237,363	,514	-181,45892	277,54189	-728,219	365,30098
Desvio_Norte	Igualdade de variância assumida	,268	,605	-,483	238	,630	-93,03892	192,66747	-472,590	286,51245
	Igualdade não assumida			-,483	237,775	,630	-93,03892	192,66747	-472,592	286,51428

Figura 5.40 – Testes estatísticos para o desvio-padrão via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

As Figuras 5.36 e 5.37, pela análise das colunas “Sig.” e “Sig. (2-tailed)” mostram que, para ambas as opções de geração de cenários, não é possível distinguir estatisticamente, para média e variância, os desvios-padrão histórico e gerado, indicando que a série histórica foi bem reproduzida e que os cenários mantiveram o segundo momento da distribuição.

Analogamente ao realizado para os testes de médias, a seguir uma análise detalhada dos períodos, só que agora com base no Teste de Levene, testando a igualdade de variância. Os índices de aprovação são altos para todos os subsistemas, tanto via Lognormal quanto via *Bootstrap*. Desta forma, a proposta deste trabalho reproduz, período a período, a variância histórica original.

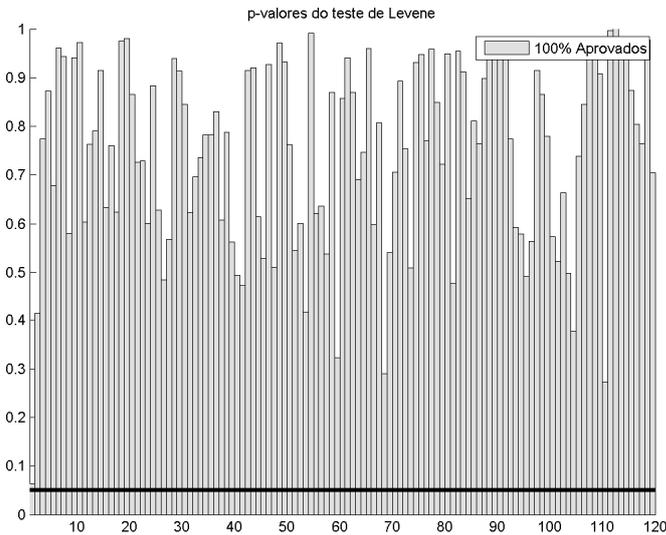


Figura 5.41 – *p-values* do Teste de Levene, sudeste, via Lognormal
Fonte: o autor (2009)

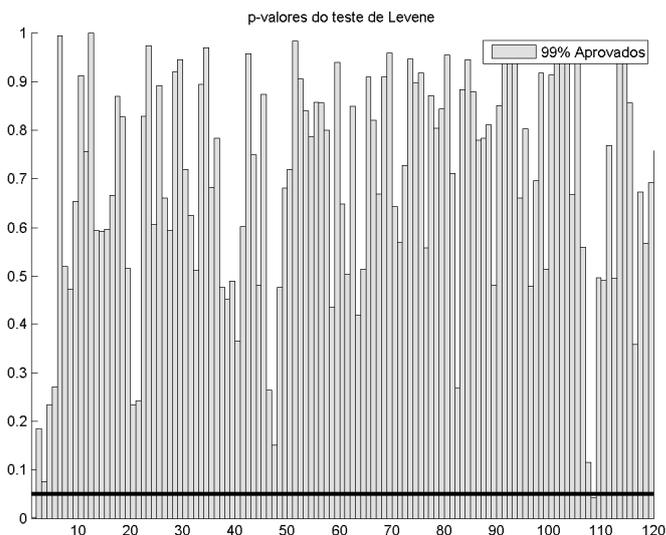


Figura 5.42 – *p-values* do Teste de Levene, sudeste, via Bootstrap
Fonte: o autor (2009)

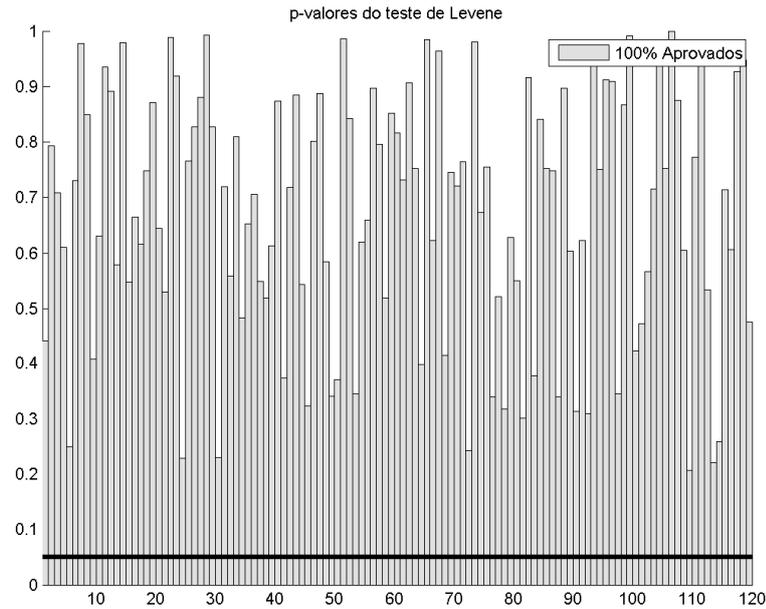


Figura 5.43 – *p-values* do Teste de Levene, sul, via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

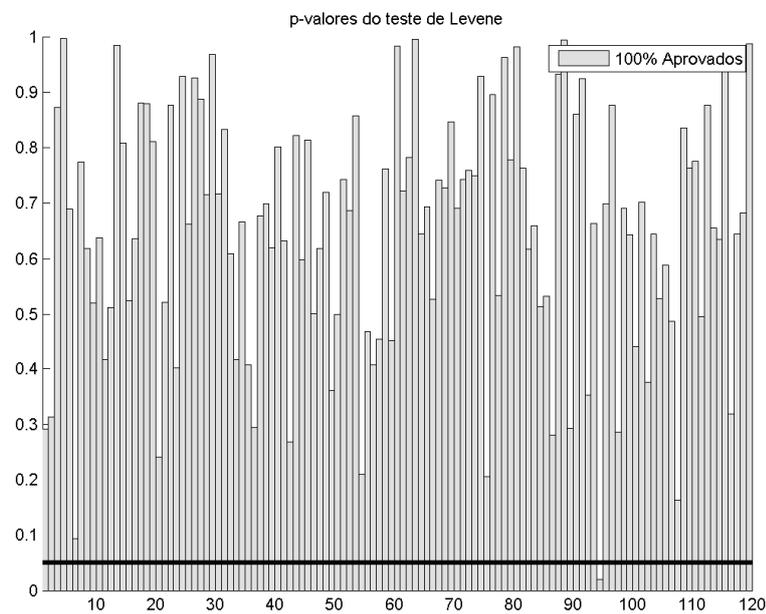


Figura 5.44 – *p-values* do Teste de Levene, sul, via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

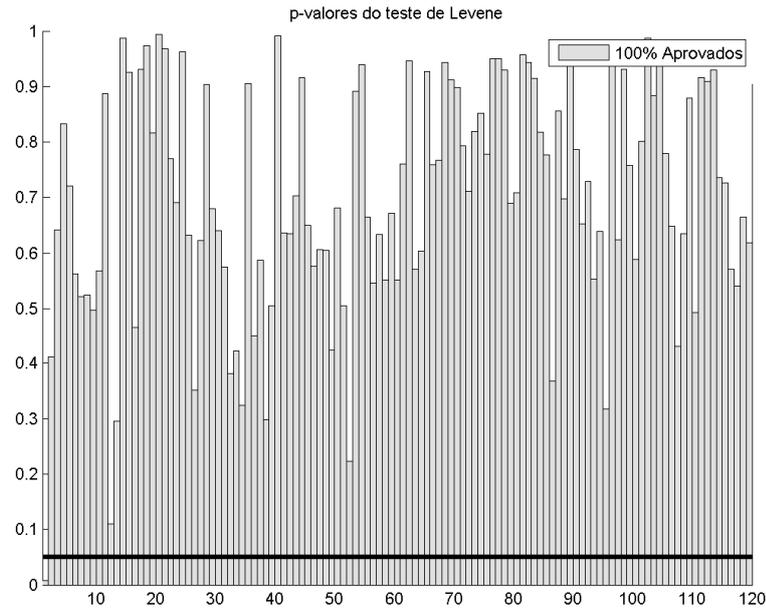


Figura 5.45 – *p-values* do Teste de Levene, nordeste, via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

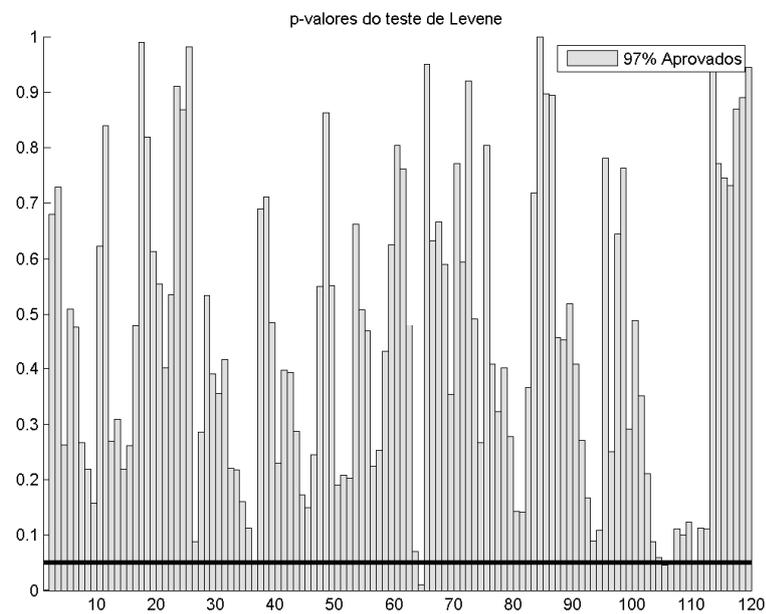


Figura 5.46 – *p-values* do Teste de Levene, nordeste, via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

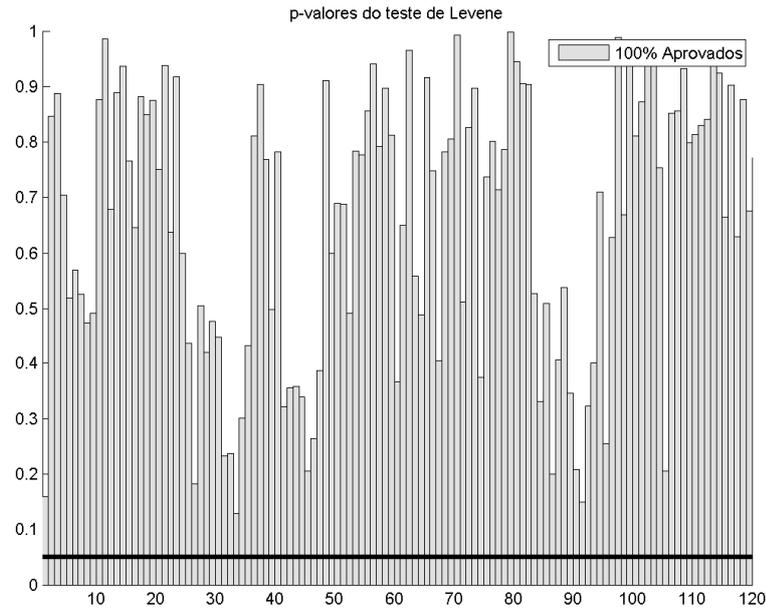


Figura 5.47 – *p-values* do Teste de Levene, norte, via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

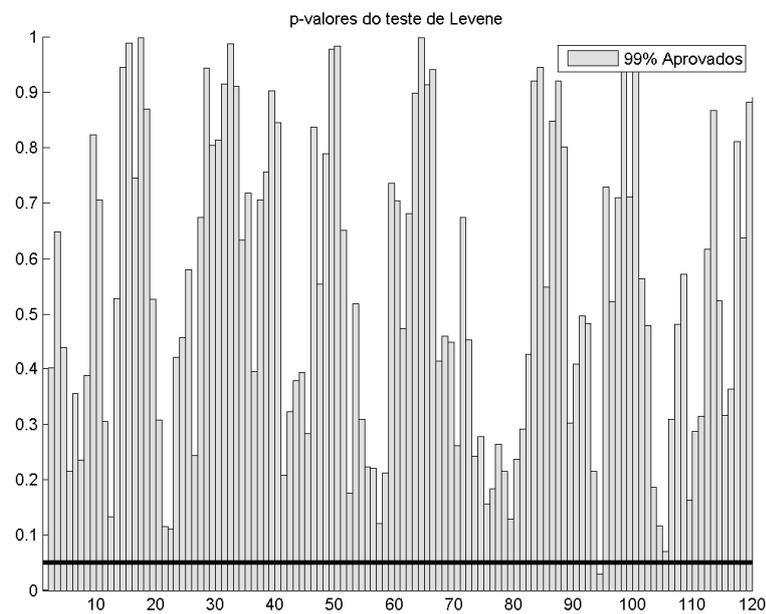


Figura 5.48 – *p-values* do Teste de Levene, norte, via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

5.2.3 Distribuição univariada dos cenários

Nesta seção é aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para verificar a aderência entre as distribuições das médias histórica e gerada e também a aderência entre cada período da matriz de cenários com a correspondente distribuição histórica.

Estatística de teste^a

		Media_ Sudeste	Media_Sul	Media_ Nordeste	Media_Norte
Maiores diferenças	Absoluta	,083	,092	,100	,092
	Positiva	,083	,092	,067	,092
	Negativa	-,075	-,083	-,100	-,075
Kolmogorov-Smirnov Z		,645	,710	,775	,710
Sig. (bilateral)		,799	,694	,586	,694

a. Variável de grupo: Indicador

Figura 5.49 – Testes para a distribuição das médias via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

Estatística de teste^a

		Media_ Sudeste	Media_Sul	Media_ Nordeste	Media_Norte
Maiores diferenças	Absoluta	,133	,175	,142	,083
	Positiva	,042	,042	,025	,083
	Negativa	-,133	-,175	-,142	-,067
Kolmogorov-Smirnov Z		1,033	1,356	1,097	,645
Sig. (bilateral)		,236	,051	,180	,799

a. Variável de grupo: Indicador

Figura 5.50 – Testes para a distribuição das médias via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

Observando os *p-values* do teste (*Asymp. Sig (2-tailed)*) nota-se que, para as duas opções de geração (via Lognormal e Bootstrap), não é possível rejeitar a hipótese nula de igualdade entre as distribuições das médias histórica e gerada.

A seguir, a análise mais detalhada ao longo dos períodos dos dez anos de cenários gerados, evidenciando a aderência entre as distribuições de cada período das séries sintéticas com o correspondente do histórico.

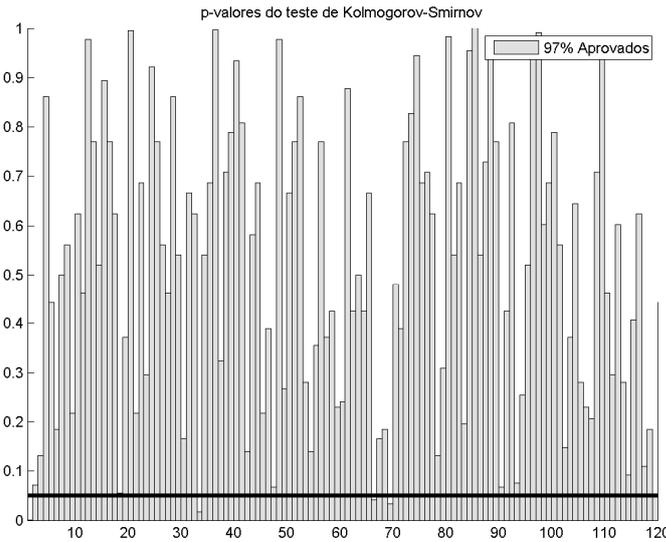


Figura 5.51 – p -values do Teste de K-S, sudeste, via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

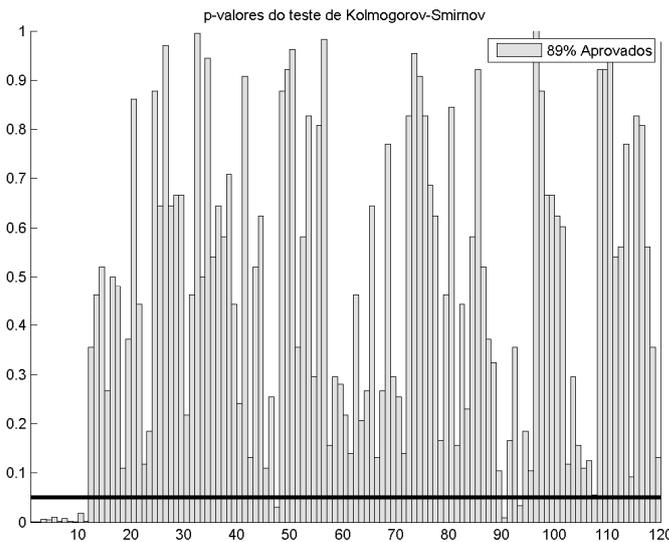


Figura 5.52 – p -values do Teste de K-S, sudeste, via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

Para o Sudeste, via *Bootstrap*, ainda que no início da geração dos cenários a aderência entre as distribuições seja rejeitada, com o passar do tempo, os p -values ficam acima do valor mínimo e o índice de aprovação é bastante satisfatório.

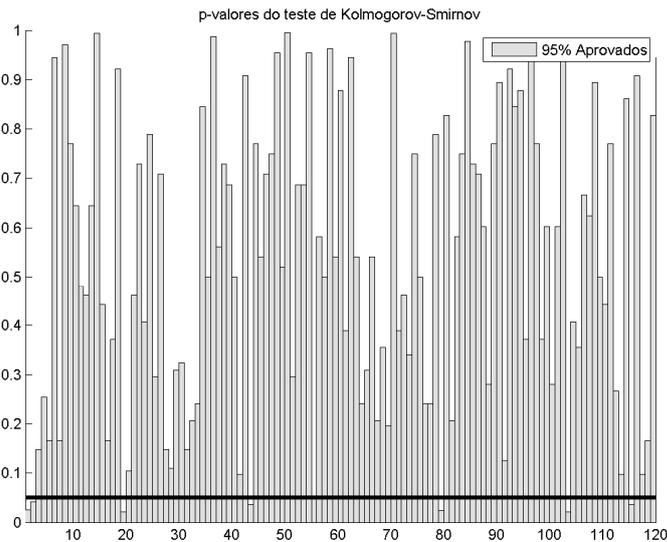


Figura 5.53 – *p-values* do Teste de K-S, sul, via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

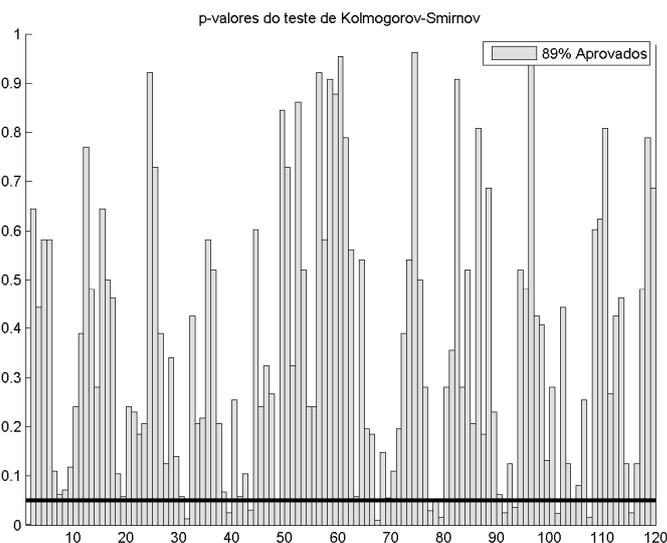


Figura 5.54 – *p-values* do Teste de K-S, sul, via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

Diferentemente do caso anterior, via *Bootstrap*, não há dificuldades no início da geração, mas alguns *p-values*, embora não rejeitados, não são tão altos. Contudo, o índice de aprovação é satisfatório.

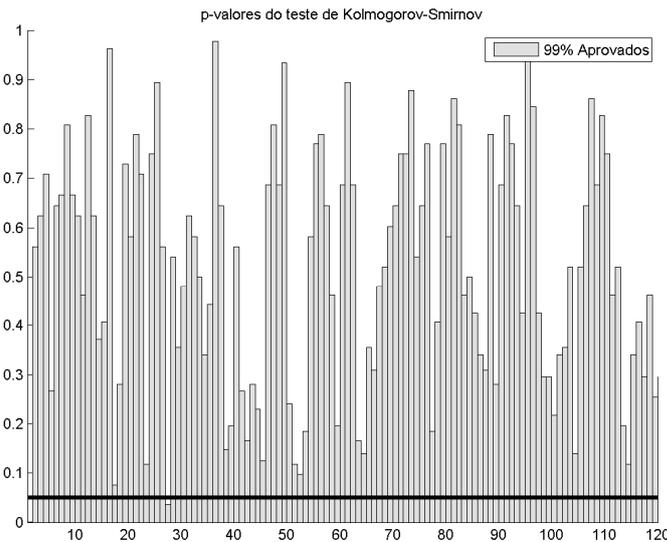


Figura 5.55 – *p-values* do Teste de K-S, nordeste, via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

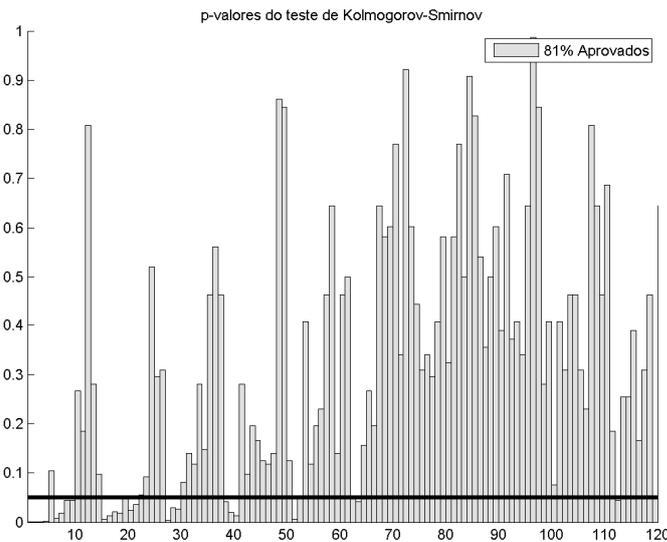


Figura 5.56 – *p-values* do Teste de K-S, nordeste, via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

Por meio da proposta de geração via *Bootstrap*, o subsistema Nordeste é o mais crítico quanto à aderência de distribuições, ainda que a aprovação dos *p-values* esteja acima de 80%, o que pode ser considerado bastante razoável.

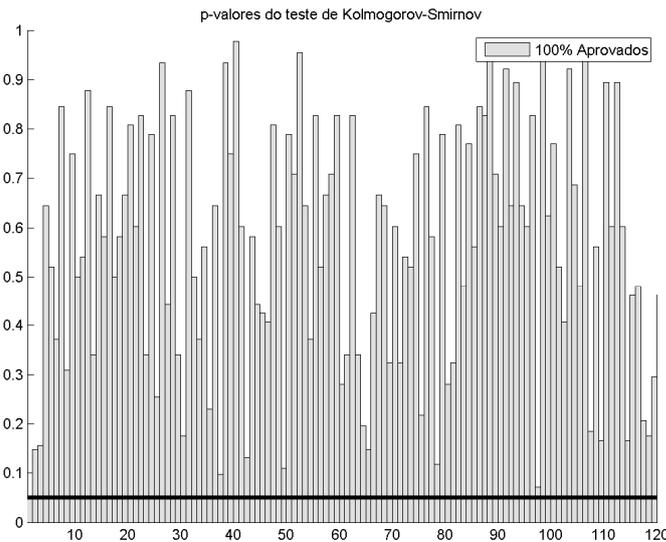


Figura 5.57 – *p-values* do Teste de K-S, norte, via Lognormal
Fonte: o autor (2009)

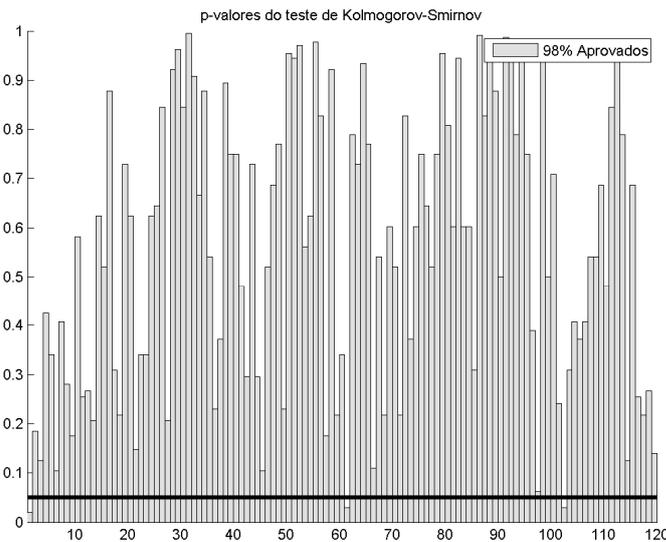


Figura 5.58 – *p-values* do Teste de K-S, norte, via Bootstrap
Fonte: o autor (2009)

Em ambas as propostas, o índice de aprovação dos *p-values* é bem alto e não há quaisquer diferenças significativas entre as distribuições históricas e geradas ao longo dos meses dos dez anos de cenários gerados.

5.2.4 Correlação cruzada dos cenários

A preservação da correlação cruzada entre os cenários de todos os subsistemas é um dos objetivos que deve ser atendido durante o processo de geração de séries sintéticas. Neste item é realizada uma análise visual dos resultados obtidos pela observação de gráficos do tipo Box Plot.

No método clássico de geração de séries artificiais, a incorporação da correlação entre os subsistemas se dá por meio da matriz D conforme mostra a equação (2.32). Na proposta de construção dos cenários via *Bootstrap*, a correlação é incorporada quando se sorteia o mesmo elemento i dentre o conjunto de resíduos disponíveis para um dado período (mês) para todos os subsistemas. Isto é, dado um período (mês) de um dos cenários da matriz, faz-se um sorteio aleatório do índice dos elementos possíveis e utiliza-se, para todos os subsistemas, o resíduo correspondente ao índice sorteado para o mês em questão.

Para as séries históricas, foram calculadas as correlações entre as regiões, gerando um valor para cada par de subsistemas. De forma análoga, para cada uma das 200 séries sintéticas, o procedimento foi repetido e foram obtidos 200 valores de correlações cruzadas para os pares. Os últimos seguem uma dada distribuição e para representá-la, os gráficos Box-Plot. O valor histórico foi plotado por meio de um ponto do tipo “asterisco”.

Os gráficos sugerem que os cenários gerados por meio do *Bootstrap* seguem o mesmo comportamento daqueles construídos pelo emprego da distribuição Lognormal e conseguem reproduzir de maneira bastante satisfatória a correlação anual histórica, calculada com base nas séries originais e ENAs. Portanto, além da conservação dos momentos média e variância e da aderência entre distribuições, o *Bootstrap* também se mostrou efetivo na preservação da correlação anual entre os subsistemas.

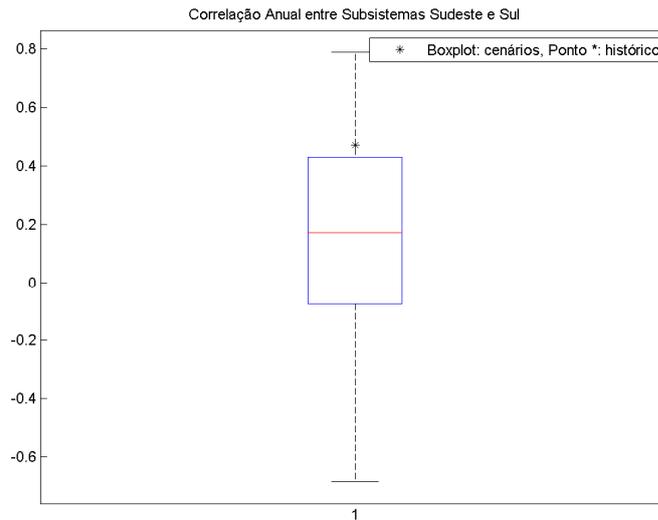


Figura 5.59 – Correlação cruzada: sudeste x sul, via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

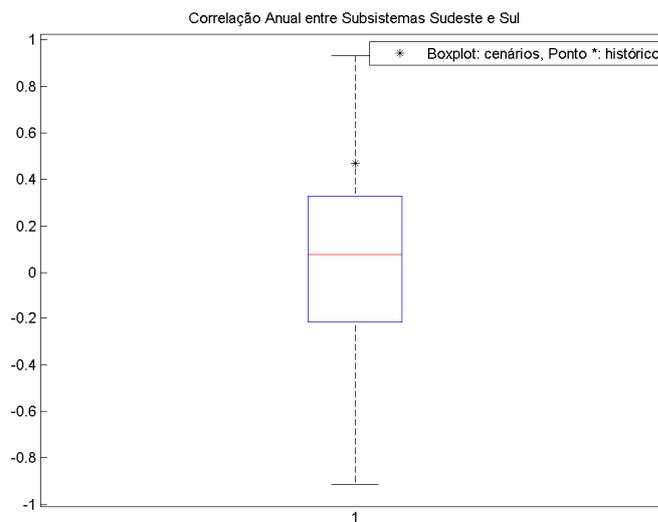


Figura 5.60 – Correlação cruzada: sudeste x sul, via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

Apesar de o valor histórico estar deslocado da “caixa”, que agrupa 50% dos dados, este comportamento se repete em ambas as opções de geração, não configurando uma falha específica da proposta via *Bootstrap*.

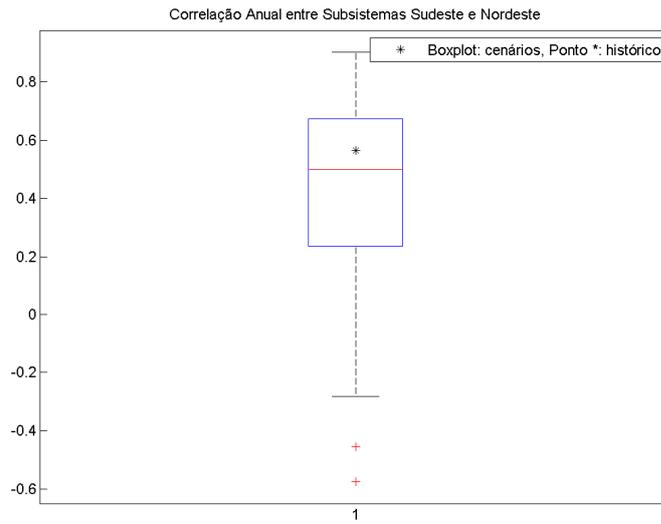


Figura 5.61 – Correlação cruzada: sudeste x nordeste, via Lognormal
Fonte: o autor (2009)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812730/CA

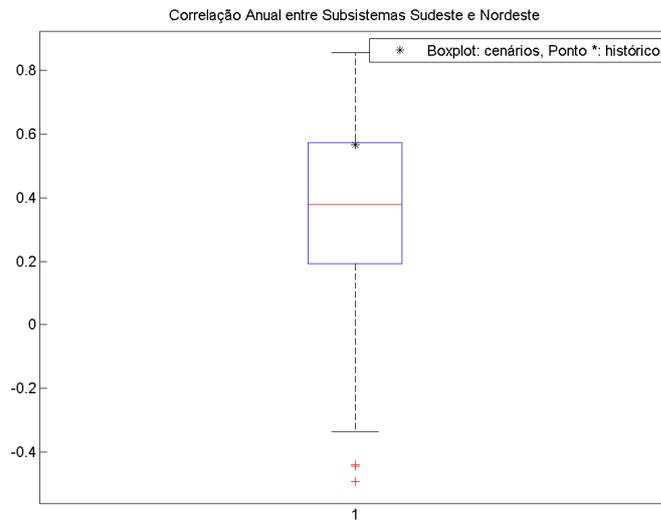


Figura 5.62 – Correlação cruzada: sudeste x nordeste, via Bootstrap
Fonte: o autor (2009)

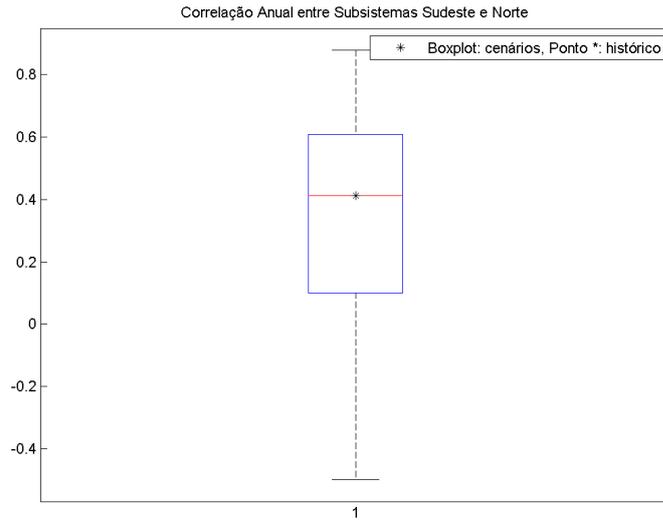


Figura 5.63 – Correlação cruzada: sudeste x norte, via Lognormal
Fonte: o autor (2009)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812730/CA

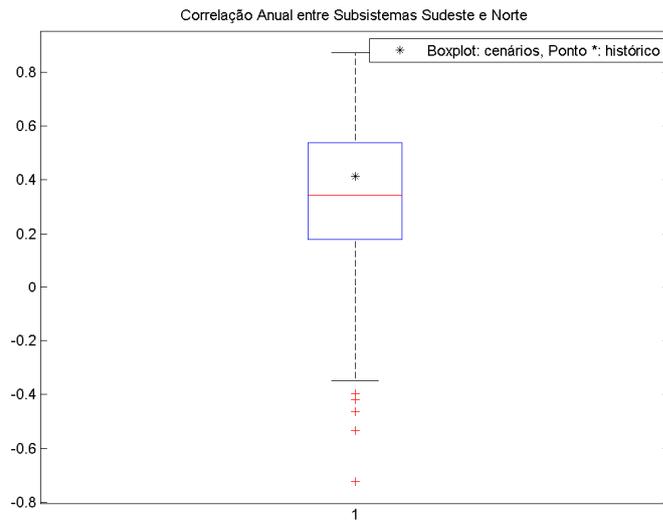


Figura 5.64 – Correlação cruzada: sudeste x norte, via Bootstrap
Fonte: o autor (2009)

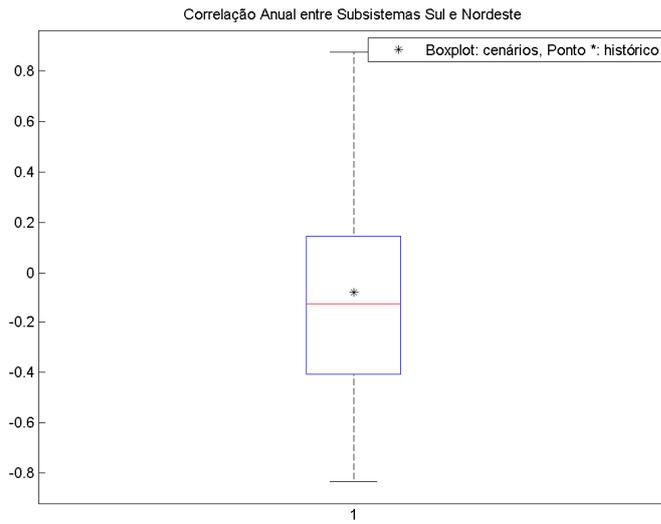


Figura 5.65 – Correlação cruzada: sul x nordeste, via Lognormal
Fonte: o autor (2009)

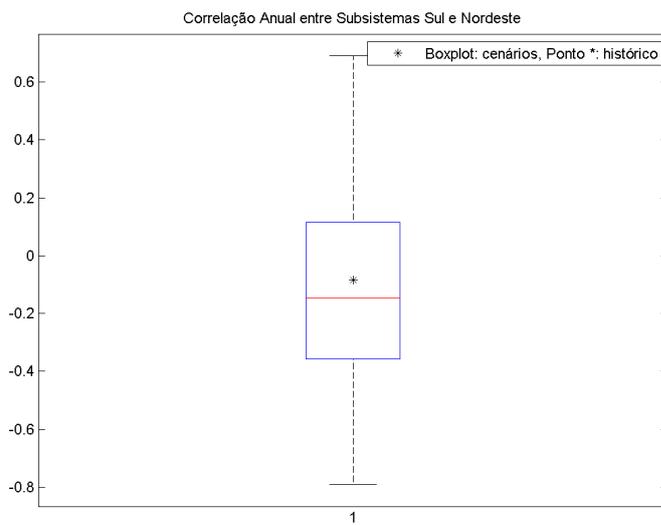


Figura 5.66 – Correlação cruzada: sul x nordeste, via Bootstrap
Fonte: o autor (2009)

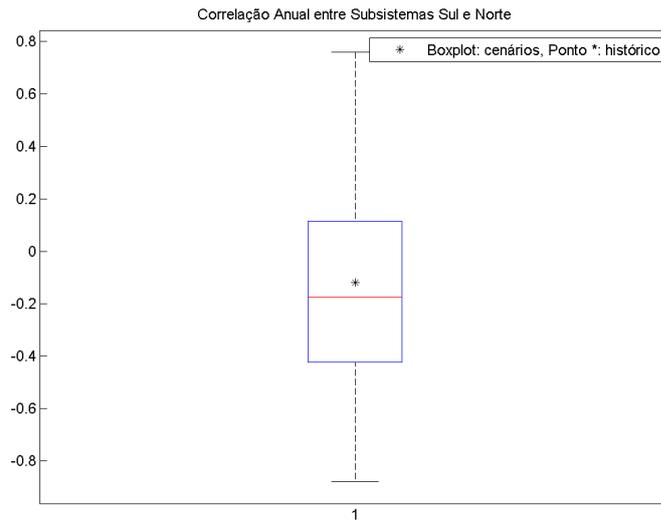


Figura 5.67 – Correlação cruzada: sul x norte, via Lognormal
Fonte: o autor (2009)

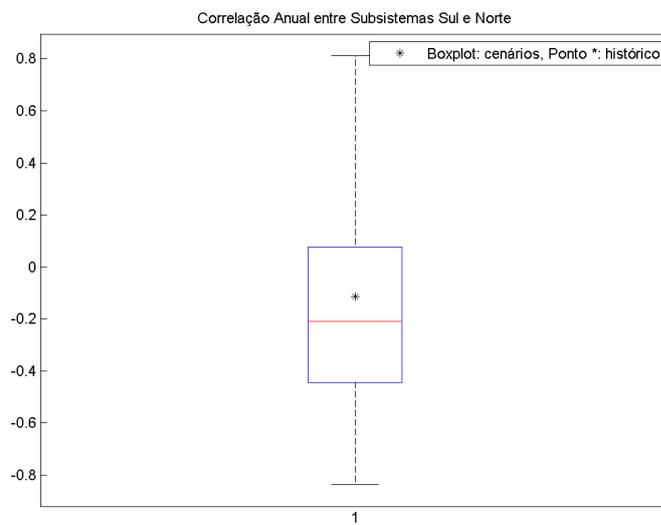


Figura 5.68 – Correlação cruzada: sul x norte, via Bootstrap
Fonte: o autor (2009)

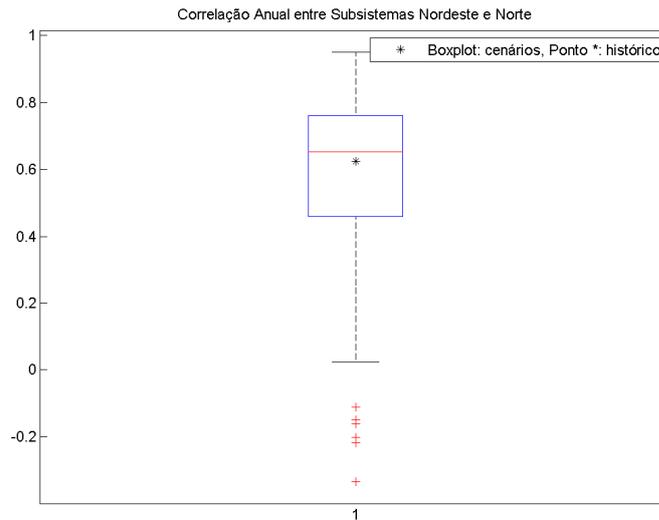


Figura 5.69 – Correlação cruzada: nordeste x norte, via Lognormal

Fonte: o autor (2009)

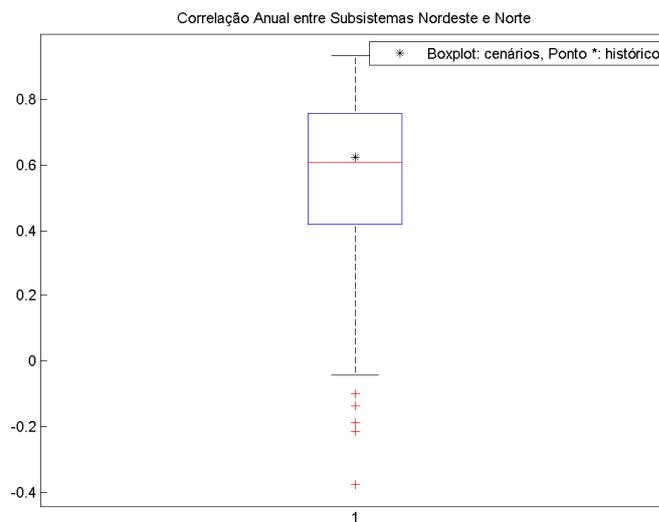


Figura 5.70 – Correlação cruzada: nordeste x norte, via Bootstrap

Fonte: o autor (2009)

Os Box-Plot mostram um comportamento semelhante entre o *shape* das distribuições para a geração via Lognormal e via *Bootstrap*. Isto posto, é possível concluir que a proposta reproduziu o comportamento do modelo clássico, podendo ser considerada efetiva quanto à preservação da correlação cruzada entre os pares de subsistemas.

5.2.5 Análise de sequências

O objetivo desta seção é verificar a capacidade dos cenários gerados em reproduzir os períodos críticos (secas) observados na série histórica original.

Para esta análise, conforme comentado na seção 4.3.4, é empregada-se o conceito de sequências. As variáveis aleatórias já foram definidas e são: comprimento, soma e intensidade de sequência.

O objetivo é avaliar se os cenários reproduzem as distribuições de probabilidades de cada variável, comparando-as com a respectiva distribuição histórica. São utilizados os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov (soma e intensidade, variáveis contínuas) e Qui-Quadrado (soma, variável discreta).

Para o teste de Kolmogorov-Smirnov a análise é feita com base no *p-value*, que deve ser superior ao nível de significância de 5%. No teste de Qui-Quadrado, a conclusão é dada com base no valor da estatística de teste. Para que a hipótese nula não seja rejeitada, o valor de teste deve ser menor que o valor tabelado. Este último é dado com base no número de graus de liberdade e no nível de significância (5%) considerados.

Tabela 5.1 – Análise das sequências negativas, via Lognormal

	Testes de aderência - Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado		
	Comprimento	Soma	Intensidade
	Valor crítico: 3,84	<i>p-value</i> mín: 0,05	<i>p-value</i> mín: 0,05
Sudeste	0,310	0,746	0,665
Sul	0,010	0,931	0,052
Nordeste	1,570	0,854	0,448
Norte	1,300	0,771	0,227

Fonte: o autor (2009)

Tabela 5.2 – Análise das sequências negativas, via *Bootstrap*

	Testes de aderência - Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado		
	Comprimento	Soma	Intensidade
	Valor crítico: 3,84	<i>p-value</i> mín: 0,05	<i>p-value</i> mín: 0,05
Sudeste	0,580	0,927	0,864
Sul	3,460	0,844	0,611
Nordeste	1,890	0,494	0,157
Norte	0,480	0,847	0,201

Fonte: o autor (2009)

Nota-se por meio dos valores dos *p-values* e estatísticas obtidos nos testes de aderência, as distribuições obtidas pelos cenários hidrológicos gerados pelas opções clássica (Lognormal) e alternativa (*Bootstrap*) são aderentes à distribuição histórica de sequências negativas. Em outras palavras, as séries sintéticas geradas são capazes de reproduzir os períodos críticos de secas ocorridos no histórico de ENAs disponível.

A seguir, nas Tabelas 5.3 e 5.4 são mostradas as proporções de índices gerados menores que o valor histórico com o intuito de analisar se os cenários gerados são capazes de reproduzir sequências negativas mais críticas que a pior sequência negativa do histórico. O complemento dos valores apresentados indica a probabilidade de ocorrência de eventos mais severos do que os observados na série original. De acordo com o observado em PENNA (2009), a ideia é que os cenários sejam capazes de reproduzir os períodos críticos, porém sem excesso de “pessimismo”.

Tabela 5.3 – Testes de máximos de sequências negativas, Lognormal

	Prob (Cenários < Histórico)		
	Comprimento	Soma	Intensidade
Sudeste	86%	77%	94%
Sul	99%	90%	83%
Nordeste	92%	92%	58%
Norte	100%	91%	81%

Fonte: o autor (2009)

Tabela 5.4 – Testes de máximos de sequências negativas, *Bootstrap*

	Prob (Cenários < Histórico)		
	Comprimento	Soma	Intensidade
Sudeste	93%	77%	93%
Sul	99%	88%	81%
Nordeste	96%	90%	58%
Norte	100%	88%	82%

Fonte: o autor (2009)

Analisando duas tabelas anteriores, é possível verificar que as alternativas utilizadas são capazes de gerar cenários hidrológicos com sequências negativas mais críticas do que a pior sequência negativa do histórico, reproduzindo bem os períodos críticos (secas).

Em ambas as opções de geração, Lognormal e *Bootstrap*, somente no subsistema Norte nenhum cenário gerado apresentou uma sequência negativa com comprimento mais crítico do que aquele observado no histórico, porém foram gerados cenários com períodos secos de soma e intensidade superior ao pior caso já observado.

Segundo PENNA (2009), em geral é desejável que os modelos escolhidos para representar um determinado processo probabilístico sejam capazes de gerar eventos mais favoráveis e mais críticos do que os observados no registro histórico. Finalmente é possível concluir, pelas análises realizadas, que a opção proposta (assim como a clássica implementada no Newave) é capaz de reproduzir os eventos críticos ocorridos no histórico.