

6. Aplicação à Séries de Velocidade do Vento

A geração eólica de energia elétrica vem sendo explorada com mais intensidade desde 2001 e para este tipo de geração, a principal variável a ser estudada é a velocidade do vento. A potência gerada guarda uma relação cúbica com a velocidade do vento (PESSANHA et al., 2010). Esta relação pode ser observada na curva de potência representada na figura 6.1 e na equação (49).

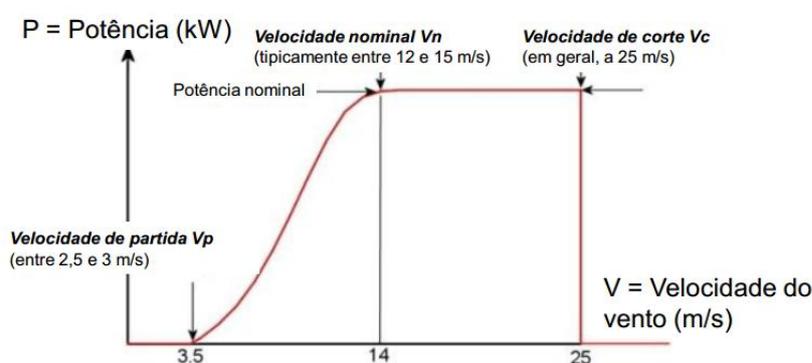


Figura 6.1. Curva de Potência

A figura 6.1 mostra a relação entre a potência gerada e a velocidade do vento através da Curva de Potência. Segundo esta relação, a potência gerada pela turbina é nula se a velocidade do vento for inferior a 3,5 m/s. Neste ponto, a velocidade do vento recebe o nome de “velocidade de partida” (V_p). À partir deste ponto até o ponto cuja velocidade do vento está entre 12 e 15 m/s, conhecida como “velocidade nominal” (V_n), a potência gerada é dada pela equação (49):

$$P = \frac{1}{2} C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, \quad (49)$$

onde:

P é a potência gerada;

ρ é a densidade do ar (kg/m^3);

A é a área de giro das lâminas da turbina eólica (m^2);

C_p, η_m, η_g são as constantes que expressão os rendimentos nos estágios da conversão de energia;

v é a velocidade do vento.

No intervalo em que a velocidade do vento está entre 15 m/s e 25 m/s, a potência gerada se estabiliza e se a velocidade do vento superar os 25 m/s, a turbina é desligada para evitar esforços mecânicos que possam danificá-la. Neste ponto, a velocidade do vento é chamada de “velocidade de corte” (V_c) e a partir destas informações, pode-se definir a potência como em (50):

$$P = \begin{cases} 0, & \text{se } v < V_p \\ P = \frac{1}{2} C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, & \text{se } V_p \leq v \leq V_n \\ P = \frac{1}{2} C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \rho \cdot A \cdot v^3, & \text{se } V_n \leq v \leq V_c \\ 0, & \text{se } v > V_c \end{cases} \quad (50)$$

Uma das contribuições desta tese trata da aplicação da modelagem PAR(p) – MSSA/SSA a séries de velocidade do vento. Este tipo de abordagem é inédito e com estes resultados desta aplicação, esta tese aponta para a possibilidade de se trabalhar com a previsão de velocidade do vento do mesmo modo com que é feito na geração hidrelétrica de energia.

Para a aplicação do método proposto foram utilizadas duas séries de médias mensais de Velocidade do Vento de duas estações anemométricas localizadas no Nordeste do Brasil: a saber, em Petrolina-PE e Pesqueira-PE entre os meses de janeiro de 1996 a dezembro de 2011. Os dados são do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As figuras 6.2 e 6.3 mostram as respectivas séries de médias mensais de Velocidade do Vento das estações de Petrolina e Pesqueira, medidos a 50 m de altura.

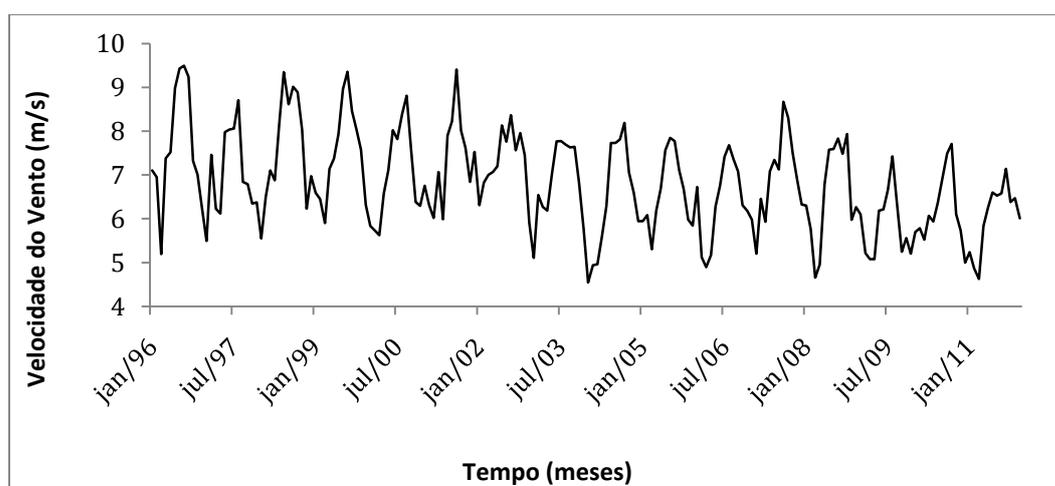


Figura 6.2: Médias mensais de velocidade do vento na Estação Petrolina - PE.

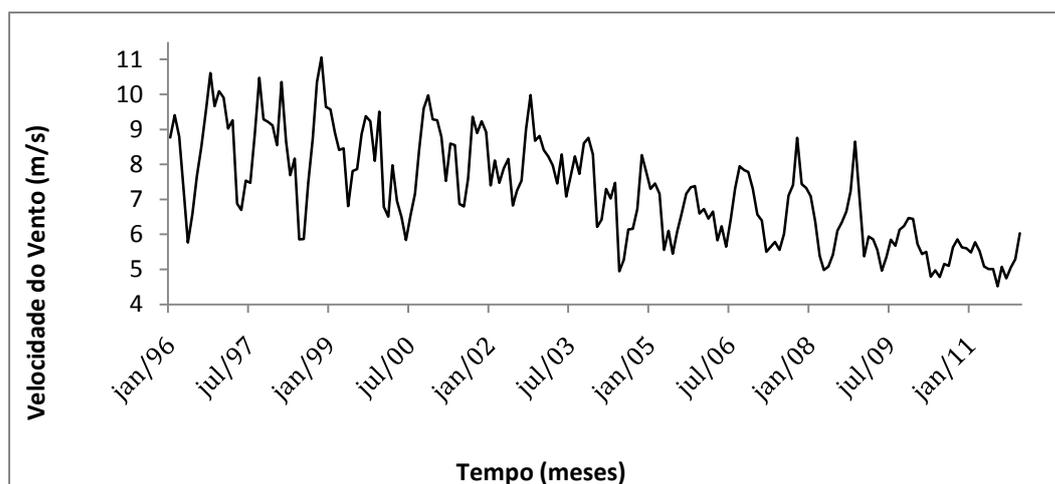


Figura 6.3: Médias mensais de Velocidade do vento na Estação Pesqueira - PE.

Antes dos procedimentos aplicados para a geração de cenários usando o $PAR(p)$ e as filtragens SSA/MSSA, são apresentadas algumas características destas séries temporais. As tabelas 6.1(a) e 6.1(b) apresentam algumas estatísticas dos conjuntos de dados de Petrolina e Pesqueira, respectivamente.

Tabela 6.1(a): Estatísticas da Série Original de Petrolina

| Estatística | Valor |
|---------------|--------|
| Tamanho | 192 |
| Média | 6,832 |
| Mediana | 6,768 |
| Mínimo | 4,543 |
| Máximo | 9,491 |
| Desvio Padrão | 1,110 |
| Assimetria | 0,182 |
| Curtose | -0,425 |

Tabela 6.1(b): Estatísticas da Série Original de Pesqueira

| Estatística | Valor |
|---------------|--------|
| Tamanho | 192 |
| Média | 7,250 |
| Mediana | 7,242 |
| Mínimo | 4,513 |
| Máximo | 11,057 |
| Desvio Padrão | 1,504 |
| Assimetria | 0,215 |
| Curtose | -0,838 |

Para esta aplicação, foram ajustados modelos $PAR(p)$ para as duas séries de médias mensais de velocidade do vento com os dados originais. Os resultados destas modelagens são apresentados conjuntamente com os resultados obtidos com a modelagem $PAR(p)$ após a filtragem MSSA. Também foram ajustados modelos PAR

(p) para estes dois conjuntos de dados após filtragem via SSA feitas nas duas séries separadamente. As três modelagens são comparadas.

6.1. Modelagem PAR(p) – MSSA

Para a modelagem PAR(p) – MSSA realiza-se inicialmente a filtragem MSSA nas duas séries de médias mensais de velocidade do vento. Para a filtragem MSSA utilizou-se o L escolhido igual a 96 conforme o resultado do teste BDS mostrado nas tabelas 6.4 e 6.5. Na decomposição de cada série, a identificação das componentes que formam o sinal foi realizada por meio da análise gráfica dos vetores singulares. Os primeiros vetores singulares obtidos na fase de incorporação MSSA são apresentados na Figura 6.4. Em seguida, na figura 6.5, são apresentados alguns pares de vetores singulares que auxiliam na análise para determinação das componentes.

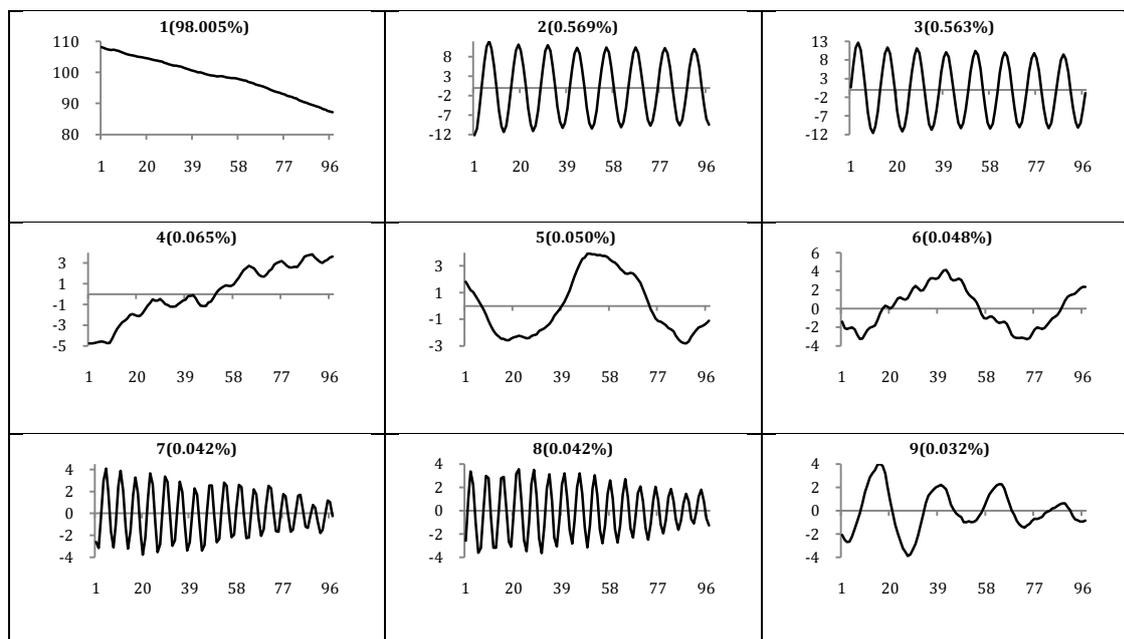


Figura 6.4: Os nove primeiros vetores singulares na filtragem MSSA.

De acordo com HASSANI (2007), os vetores singulares que apresentam um comportamento mais suave deve fazer parte da componente tendência. Na figura 6.4, os vetores 1, 4, 5, 6 e 9 apresentam esta característica, enquanto os vetores 2, 3, 7 e 8

apresentam um comportamento senoidal, indicando que eles podem fazer parte da componente harmônica.

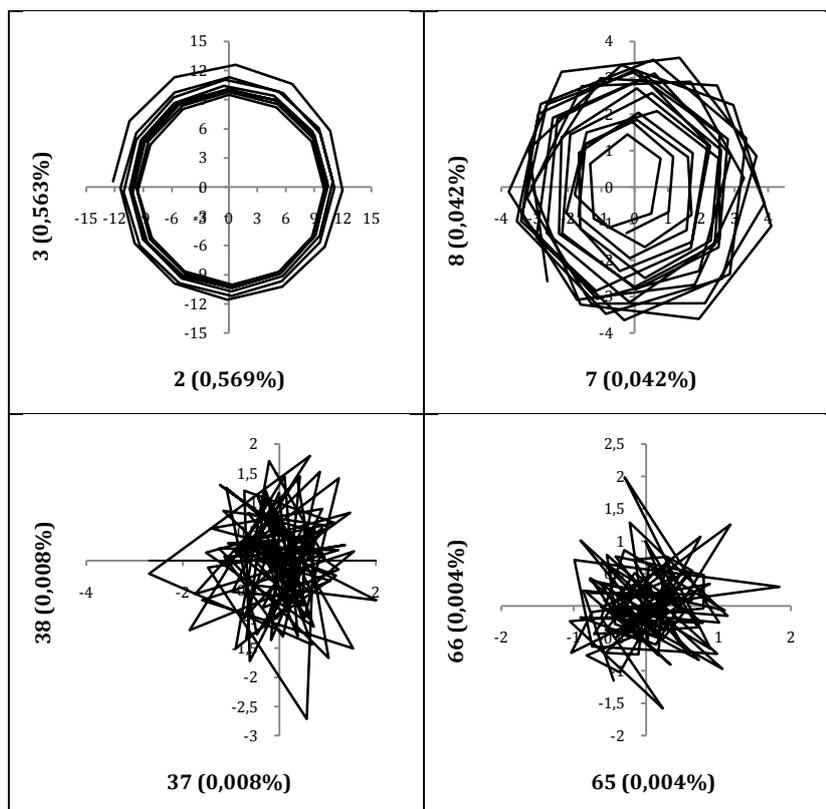


Figura 6.5: Alguns pares de vetores singulares na filtragem MSSA.

As análises gráficas feitas com base nos vetores singulares e os pares de vetores singulares nos direcionam a determinação dos vetores que irão compor cada uma das componentes. Na figura 6.5 onde os dois primeiros diagramas referentes aos pares de vetores (2 e 3) e (7 e 8) que formam um polígono regular de 12 lados, no primeiro caso e de 6 lados no segundo caso. Os lados destes polígonos são também as frequências das harmônicas a qual fazem parte os respectivos vetores. Esta mesma observação pode ser feita através da análise dos periodogramas dos respectivos pares. Esta análise é apresentada na figura 6.6 e confirma com uma segurança maior as componentes harmônicas observadas nas figuras 6.4 e 6.5.

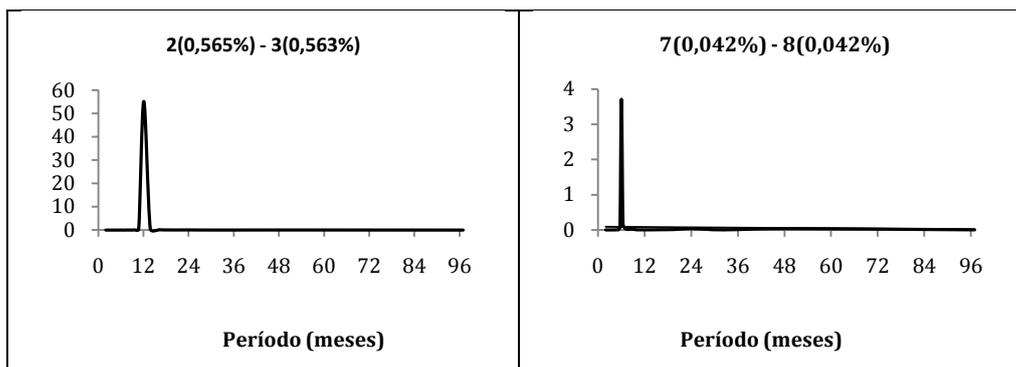


Figura 6.6: Periodogramas dos pares de vetores singulares (2 e 3) e (7 e 8) na filtragem MSSA confirmando a periodicidade das componentes harmônicas.

Ainda observando a figura 6.4, os dois últimos pares de vetores singulares, a saber, (37 e 38) e (65 e 66) indicam que estes fazem parte da componente ruidosa.

Após os passos de incorporação, SVD, Agrupamento e Média Diagonal da metodologia MSSA, a matriz trajetória foi decomposta em três componentes: tendência, harmônica e ruído conforme a tabela 6.2 e as figuras 6.7, 6.8 e 6.9.

Tabela 6.2.: Componentes geradas na abordagem MSSA.

| Subséries em cada componente | |
|------------------------------|--------------------|
| Tendência | 1, 4, 5, 6, 9, 10 |
| Harmônica | 2, 3, 7, 8, 11, 12 |
| Ruído | 13 - 100 |

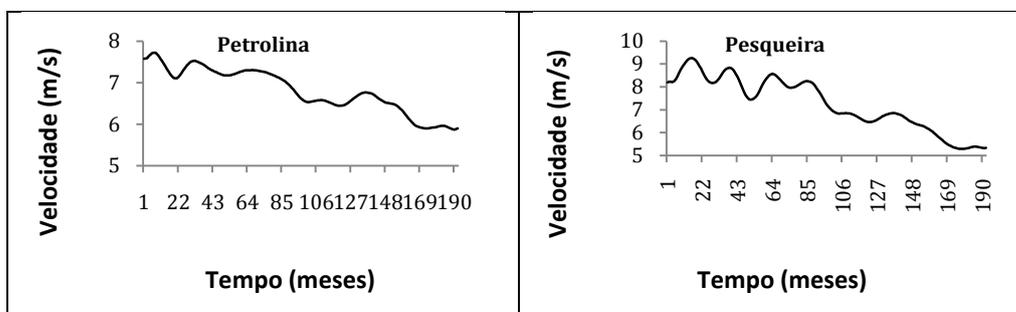


Figura 6.7. Componentes MSSA de Tendência.

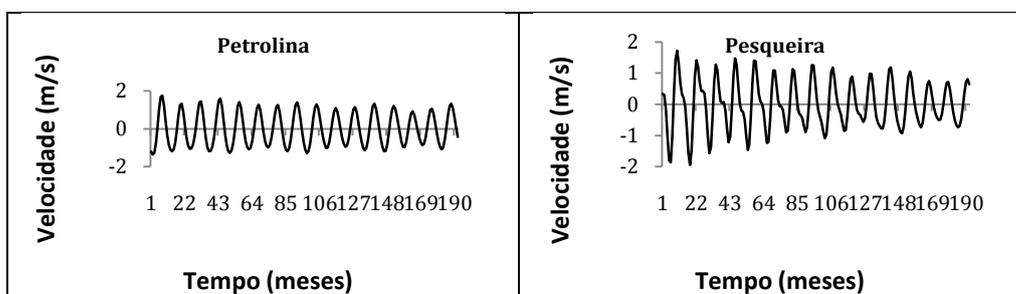


Figura 6.8. Componente MSSA Harmônica.

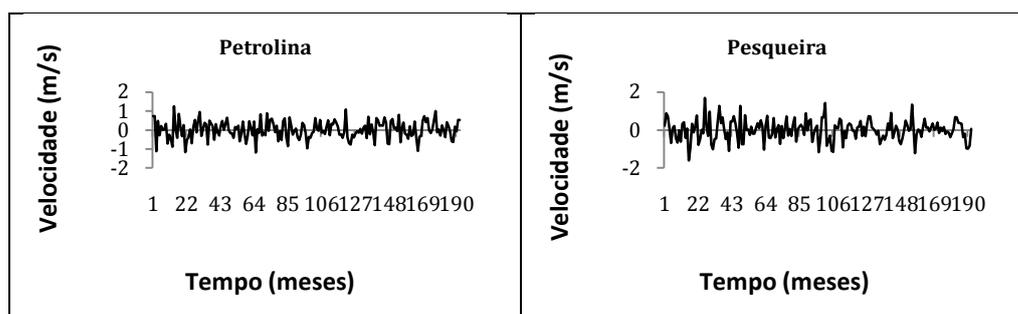


Figura 6.9. Componente MSSA de Ruído.

As correlações ponderadas ilustradas na Tabela 6.3 indicam a boa separação entre as componentes identificadas na Tabela 6.2. Portanto, o sinal (tendência + harmônica) não é contaminado pela componente ruidosa.

Tabela 6.3.: Correlação ponderada entre as componentes MSSA.

| Componentes | Tendência | Harmônica | Ruído |
|-------------|-----------|-----------|-------|
| Tendência | 1 | 0,001 | 0,003 |
| Harmônica | 0,001 | 1 | 0,029 |
| Ruído | 0,003 | 0,029 | 1 |

Após a filtragem MSSA, as séries aproximadas de médias mensais de velocidade do vento são obtidas removendo-se as séries de ruídos identificadas na filtragem MSSA. Tais séries de ruídos são submetidas ao teste BDS para testar a independência dos dados. Os resultados dos testes aplicados às duas séries de ruídos estão na tabela 6.4, referentes respectivamente às estações Petrolina e Pesqueira. Este resultado garante que os dados seguem uma estrutura de ruído e que a contaminação do ruído com dados do sinal nesta decomposição é mínima. Estes resultados também confirmam que o comprimento de janela foi bem escolhido.

Tabela 6.4.: Teste BDS para as séries de ruídos das estações anemométricas.

| | Dim | Estatística BDS | Estatística Z | Erro padrão | p-valor |
|-----------|-----------|-----------------|---------------|-------------|----------|
| Petrolina | 2 | 0,006156 | 1,379423 | 0,004463 | 0,1678 |
| | 3 | 0,005718 | 0,805545 | 0,007098 | 0,4205 |
| | 4 | 0,004280 | 0,506136 | 0,008457 | 0,6128 |
| | 5 | 0,004037 | 0,457835 | 0,008817 | 0,6471 |
| | 6 | 0,000435 | 0,051183 | 0,008504 | 0,9592 |
| | Pesqueira | 2 | 0,000525 | 0,925448 | 0,000568 |
| 3 | | 0,001376 | 1,114620 | 0,001234 | 0,2650 |
| 4 | | 0,001597 | 0,795097 | 0,002008 | 0,4266 |
| 5 | | 0,001581 | 0,553033 | 0,002859 | 0,5802 |
| 6 | | 0,005030 | 1,336379 | 0,003764 | 0,1814 |

Conforme ilustrado nas figuras 6.10 e 6.11 há uma sobreposição entre as séries originais e aproximadas via MSSA para as duas estações.

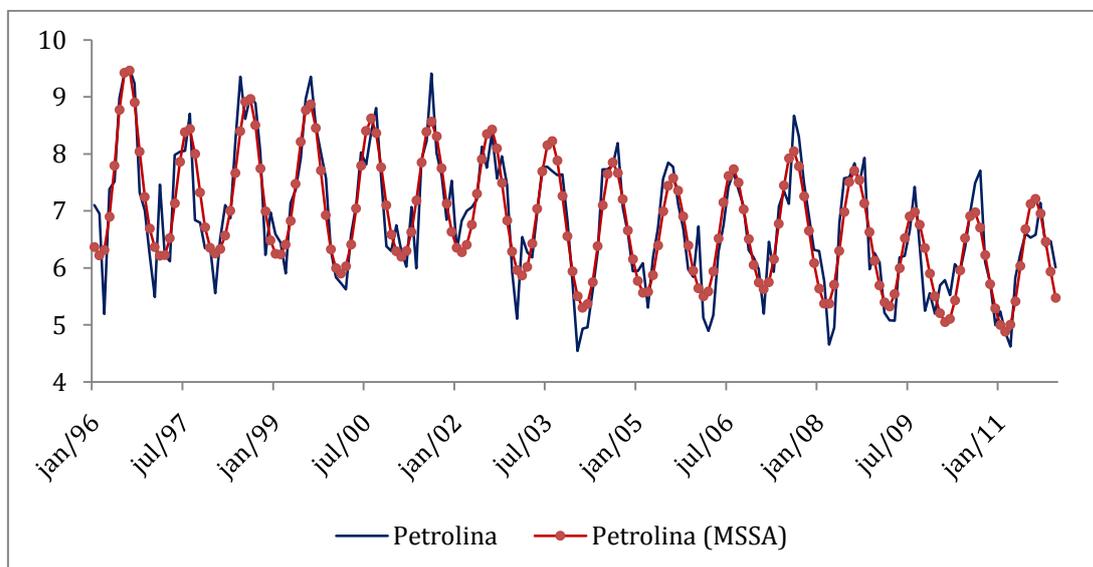


Figura 6.10. Comparação gráfica entre série original e série filtrada MSSA da estação anemométrica de Petrolina.

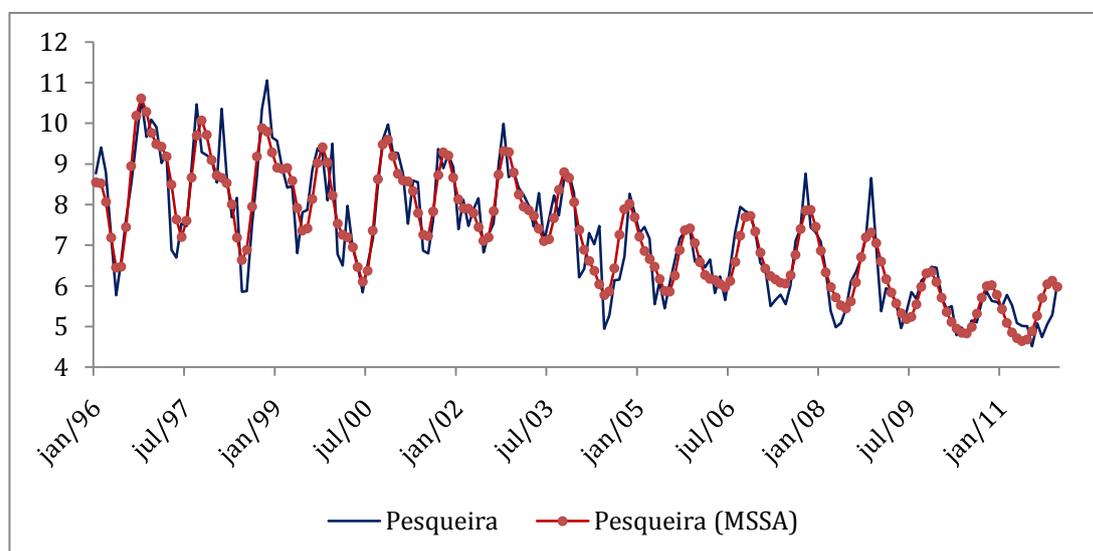


Figura 6.11. Comparação gráfica entre série original e série filtrada MSSA da estação anemométrica de Pesqueira.

As mesmas séries de médias mensais de velocidade do vento foram filtradas separadamente através da metodologia SSA e os resultados comparados juntamente com as séries filtradas MSSA e as não filtradas na modelagem $PAR(p)$.

Na ocasião da filtragem SSA das duas séries separadamente. O valor escolhido do parâmetro de defasagem (comprimento da janela) L foi 96 em ambos os casos. A comparação entre as séries originais e filtradas SSA das estações Petrolina e Pesqueira estão nas figuras 6.12 e 6.13 respectivamente.

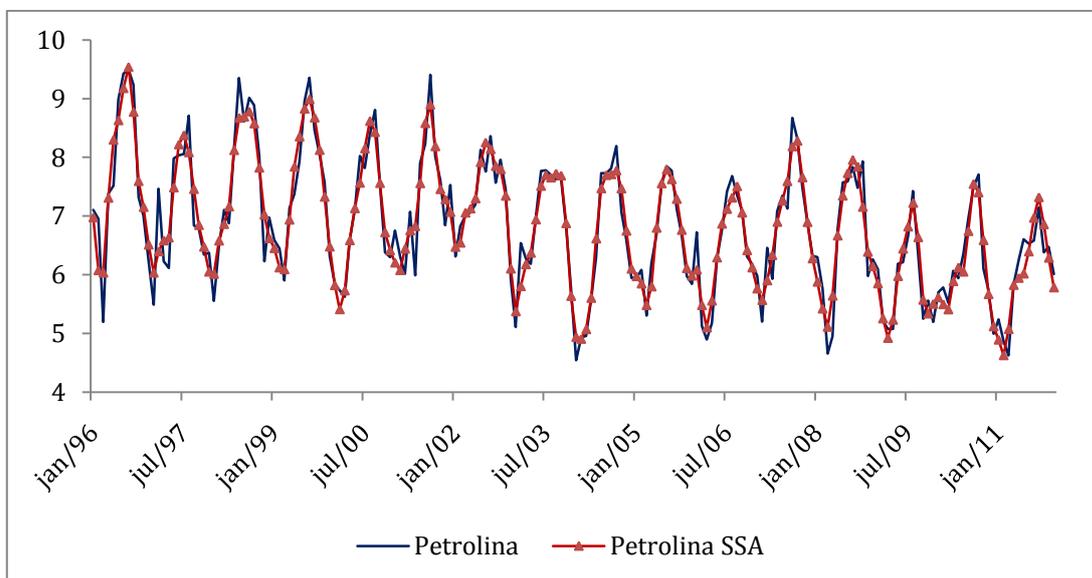


Figura 6.12. Comparação gráfica entre série original e série filtrada SSA da estação anemométrica de Petrolina.

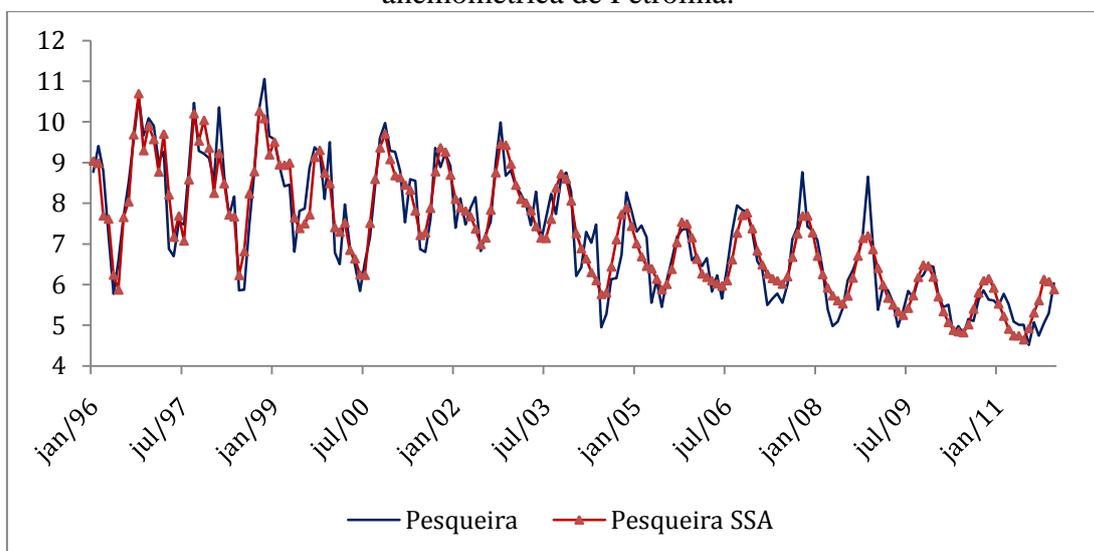


Figura 6.13. Comparação gráfica entre série original e série filtrada SSA da estação anemométrica de Pesqueira.

Na tabela 6.5 são apresentadas as ordens autorregressivas (p) do modelo PAR(p) em cada mês da série de médias mensais de velocidade do vento da estação de Petrolina nas três situações: sem filtragem, com filtragem SSA e com filtragem MSSA. Na tabela 6.6 são apresentadas as ordens autorregressivas (p) do modelo PAR(p) nas mesmas condições da tabela 6.5 aplicadas a série de Pesqueira.

Tabela 6.5.: Ordem AR por mês para cada abordagem PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) – MSSA na estação Petrolina.

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| PAR(p) | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| PAR(p)- SSA | 1 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| PAR(p) - MSSA | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabela 6.6.: Ordem AR por mês para cada abordagem PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) – MSSA na estação Pesqueira.

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| PAR(p) | 6 | 1 | 2 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| PAR(p)- SSA | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| PAR(p) - MSSA | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Para avaliar a consistência dos métodos aplicados, duas medidas estatística foram aplicadas *In sample*¹. As tabelas 6.7 e 6.8 comparam as medidas estatísticas de erro MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) dada por:

$$MAPE = \frac{100}{T_h} \sum_{t=1}^{T_h} \frac{|y_t - \hat{y}_t|}{y_t} \quad (51)$$

e RMSE (*Root-Mean-Square Error*) dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T_h} \sum_{t=1}^{T_h} (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (52)$$

onde y_t and \hat{y}_t são respectivamente os valores originais e previstos de velocidade do vento no período t e T_h é o horizonte de previsão. As medidas são aplicadas por período (mês) usando as três abordagens (PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) – MSSA) na estação Petrolina.

Para efeito de cálculo das medidas MAPE e RMSE, todos os valores originais y_t se referem a série original sem a filtragem SSA/MSSA e os valores previstos \hat{y}_t se referem aos três modelos avaliados.

¹ Nos casos avaliados nesta tese, são considerados períodos *in sample*, toda a série histórica, uma vez que o período de teste é feito através dos cenários gerados.

Tabela 6.7.: MAPE(%) *in sample* dos meses para os modelos PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) – MSSA. Estação Petrolina.

| PETROLINA | MAPE | | |
|-----------|--------|------------|------------------|
| | Mês | PAR(p) | PAR(p) – SSA |
| Janeiro | 6,1200 | 3,3072 | 1,48270 |
| Fevereiro | 8,7405 | 3,1330 | 0,87904 |
| Março | 6,1584 | 4,1720 | 0,81247 |
| Abril | 5,9539 | 2,4138 | 0,63071 |
| Mai | 4,4594 | 3,3287 | 0,51478 |
| Junho | 4,5123 | 2,1882 | 0,51592 |
| Julho | 2,9755 | 1,9037 | 0,54739 |
| Agosto | 3,5905 | 2,3111 | 0,61316 |
| Setembro | 5,0779 | 2,5236 | 0,70418 |
| Outubro | 5,6350 | 2,4985 | 0,73237 |
| Novembro | 4,1773 | 1,9260 | 0,62408 |
| Dezembro | 4,3738 | 2,5884 | 0,68437 |

Tabela 6.8.: RMSE *in sample* dos meses para os modelos PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) – MSSA. Estação Petrolina.

| PETROLINA | RMSE | | |
|-----------|--------|------------|------------------|
| | Mês | PAR(p) | PAR(p) – SSA |
| Janeiro | 0,3161 | 0,2150 | 0,0957 |
| Fevereiro | 0,2944 | 0,2029 | 0,1070 |
| Março | 0,2895 | 0,2381 | 0,1178 |
| Abril | 0,2665 | 0,1850 | 0,1290 |
| Mai | 0,2400 | 0,1867 | 0,1423 |
| Junho | 0,2596 | 0,1642 | 0,1567 |
| Julho | 0,2274 | 0,1802 | 0,1637 |
| Agosto | 0,2602 | 0,2212 | 0,1556 |
| Setembro | 0,2941 | 0,1977 | 0,1367 |
| Outubro | 0,1778 | 0,1637 | 0,1130 |
| Novembro | 0,2026 | 0,1574 | 0,0941 |
| Dezembro | 0,2085 | 0,1525 | 0,0877 |

A figura 6.14 faz a comparação gráfica dos valores da medida MAPE *in sample* observados na tabela 6.7 e a figura 6.15 faz esta mesma comparação em relação a tabela 6.8.

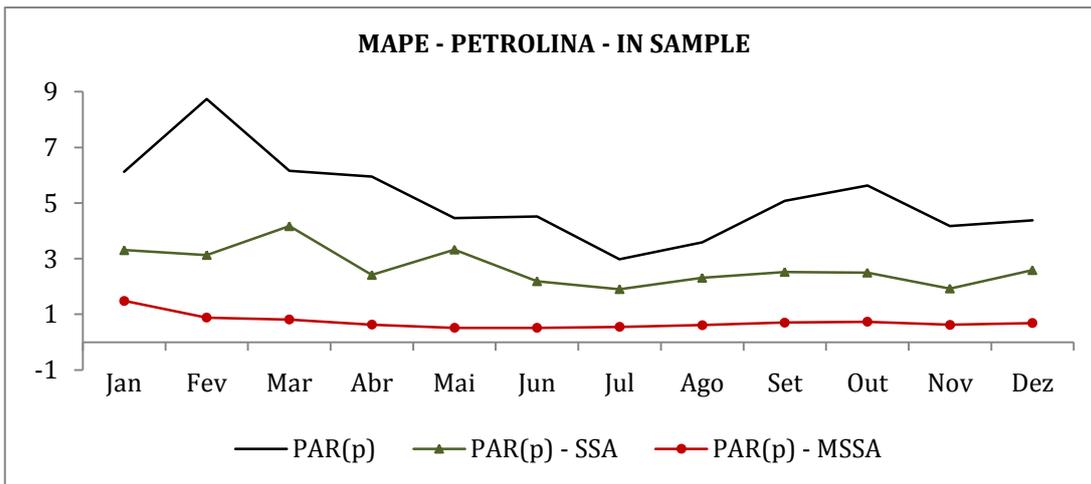


Figura 6.14. Comparação gráfica entre o MAPE *in sample* nas três modelagens em Petrolina.

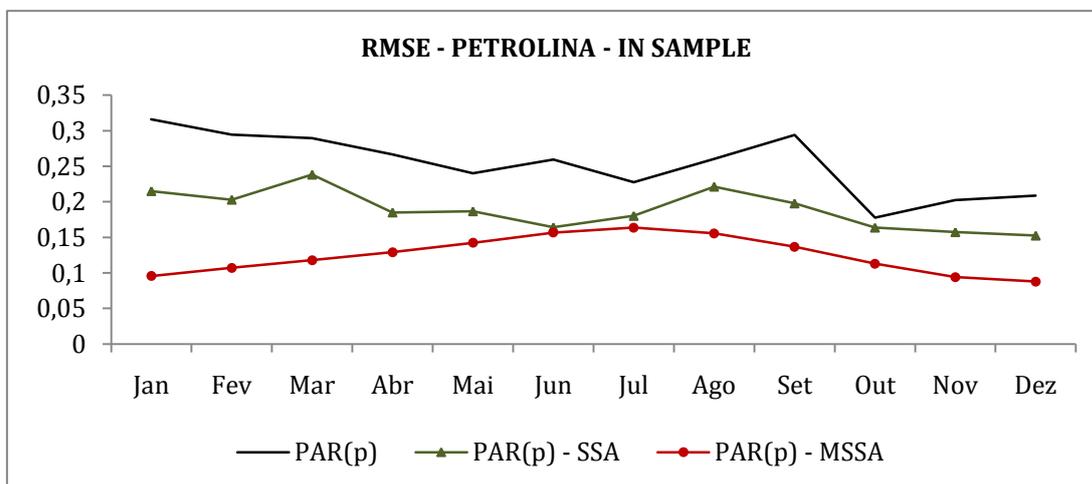


Figura 6.15. Comparação gráfica entre o RMSE *in sample* nas três modelagens em Petrolina.

As tabelas 6.9 e 6.10 a seguir comparam as medidas estatísticas de erro MAPE e RMSE *in sample* respectivamente por período (mês) usando as três abordagens (PAR(p), PAR(p)-SSA e PAR(p) – MSSA) na estação Pesqueira.

Tabela 6.9.: MAPE(%) *in sample* dos meses para os modelos PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) – MSSA. Estação Pesqueira

| PESQUEIRA | MAPE | | |
|-----------|--------|------------|------------------|
| | Mês | PAR(p) | PAR(p) – SSA |
| Janeiro | 6,1182 | 4,7278 | 3,5413 |
| Fevereiro | 5,1540 | 2,6814 | 1,1211 |
| Março | 7,1102 | 1,9755 | 1,4781 |
| Abril | 7,4127 | 3,1508 | 1,8216 |
| Mai | 5,7543 | 2,7266 | 1,7512 |
| Junho | 4,3649 | 2,4026 | 1,3590 |
| Julho | 3,8340 | 1,9483 | 1,4165 |
| Agosto | 4,5714 | 2,2650 | 1,7567 |
| Setembro | 5,3439 | 1,7724 | 1,4193 |
| Outubro | 5,9651 | 2,1032 | 1,4086 |
| Novembro | 7,0626 | 2,3336 | 1,2869 |
| Dezembro | 4,4704 | 0,8727 | 1,0379 |

Tabela 6.10.: RMSE *in sample* dos meses para os modelos PAR(p), PAR(p) - SSA e PAR(p) – MSSA. Estação Pesqueira.

| PESQUEIRA | RMSE | | |
|-----------|--------|------------|------------------|
| | Mês | PAR(p) | PAR(p) – SSA |
| Janeiro | 0,4879 | 0,3691 | 0,3005 |
| Fevereiro | 0,7270 | 0,3308 | 0,3167 |
| Março | 0,3734 | 0,3443 | 0,1756 |
| Abril | 0,3565 | 0,3427 | 0,3281 |
| Mai | 0,3714 | 0,2854 | 0,2590 |
| Junho | 0,3659 | 0,2773 | 0,2405 |
| Julho | 0,3342 | 0,2486 | 0,2301 |
| Agosto | 0,3438 | 0,2145 | 0,1851 |
| Setembro | 0,3830 | 0,2522 | 0,1888 |
| Outubro | 0,3853 | 0,2527 | 0,1777 |
| Novembro | 0,4051 | 0,2572 | 0,1987 |
| Dezembro | 0,2437 | 0,2336 | 0,2019 |

A figura 6.16 faz a comparação gráfica dos valores da medida MAPE *in sample* observados na tabela 6.9 e a figura 6.17 faz esta mesma comparação em relação a tabela 6.10.

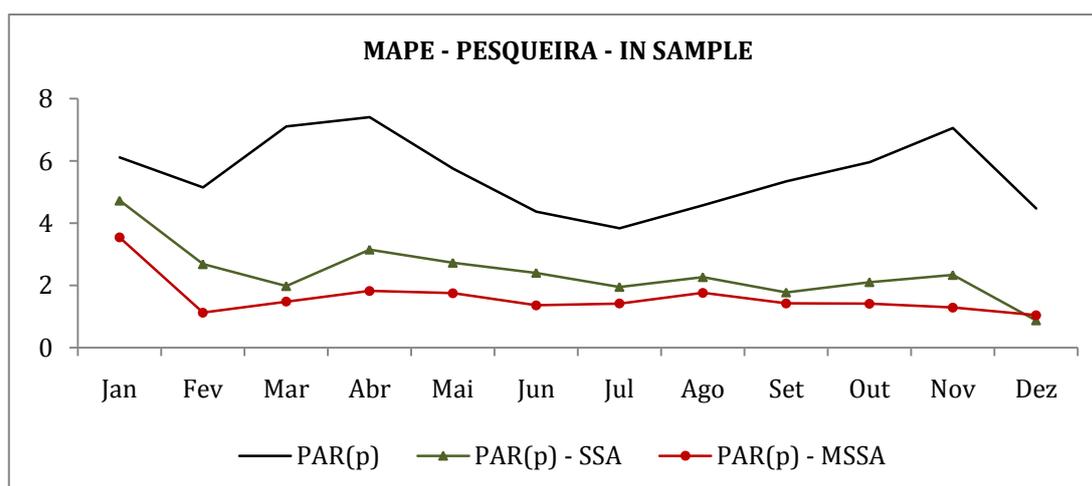


Figura 6.16. Comparação gráfica entre o MAPE *in sample* nas três modelagens em Pesqueira.

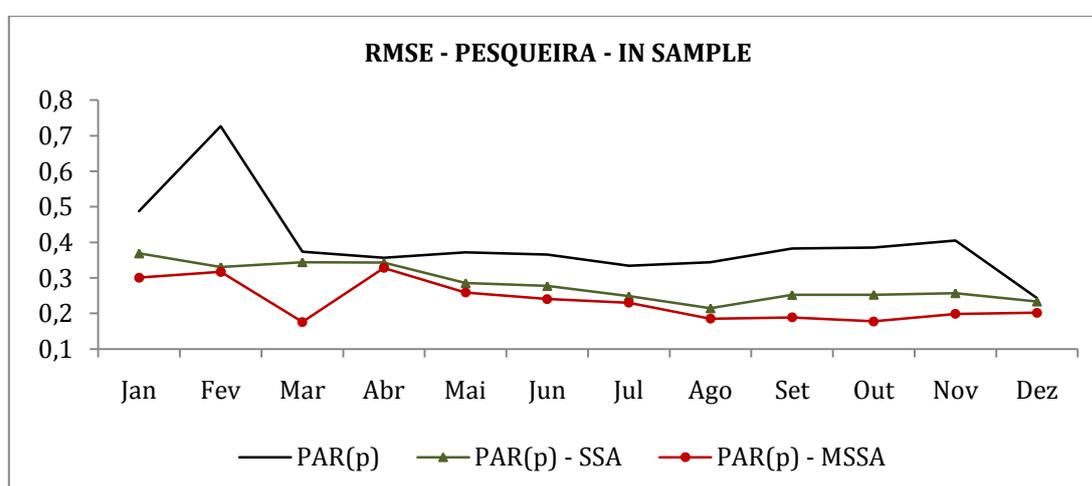


Figura 6.17. Comparação gráfica entre o RMSE *in sample* nas três modelagens em Pesqueira.

Segundo as medidas apresentadas nas tabelas 6.7 – 6.10, a modelagem PAR(p) aplicada a dados filtrados MSSA oferecem um bom ajuste, assim como a modelagem PAR(p) após a filtragem SSA, sendo a primeira ligeiramente melhor.

A tabela 6.11 faz uma comparação entre a média e o desvio padrão dos dados originais e dos dados filtrados SSA e MSSA para a estação Petrolina. O mesmo é feito para a estação Pesqueira na tabela 6.12.

Tabela 6.11.: Média e Desvio Padrão para os dados originais, filtrados SSA e filtrados MSSA da estação Petrolina.

| PETROLINA Mês | Média | | | Desvio Padrão | | |
|------------------|----------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| | Original | SSA | MSSA | Original | SSA | MSSA |
| Janeiro | 5,9543 | 5,8964 | 5,8769 | 0,6781 | 0,5346 | 0,4253 |
| Fevereiro | 5,9840 | 5,7254 | 5,7463 | 0,7830 | 0,5605 | 0,4731 |
| Março | 5,6774 | 5,8151 | 5,8361 | 0,7854 | 0,6873 | 0,5103 |
| Abril | 6,2017 | 6,2974 | 6,2044 | 0,7690 | 0,6592 | 0,5471 |
| Mai | 6,8644 | 6,9539 | 6,8117 | 0,6851 | 0,7181 | 0,6013 |
| Junho | 7,6414 | 7,4657 | 7,4933 | 0,8591 | 0,8153 | 0,6773 |
| Julho | 7,7811 | 7,8534 | 7,9907 | 0,7825 | 0,7988 | 0,7327 |
| Agosto | 8,2304 | 8,0778 | 8,1029 | 0,8315 | 0,7217 | 0,7240 |
| Setembro | 7,8183 | 7,8591 | 7,7982 | 0,7937 | 0,5923 | 0,6444 |
| Outubro | 7,1838 | 7,2509 | 7,2286 | 0,7849 | 0,6283 | 0,5360 |
| Novembro | 6,5103 | 6,6288 | 6,6171 | 0,5694 | 0,5843 | 0,4495 |
| Dezembro | 6,1359 | 6,1196 | 6,1214 | 0,5949 | 0,4691 | 0,4178 |

Tabela 6.12.: Média e Desvio Padrão para os dados originais, filtrados SSA e filtrados MSSA da estação Pesqueira.

| PESQUEIRA Mês | Média | | | Desvio Padrão | | |
|------------------|----------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| | Original | SSA | MSSA | Original | SSA | MSSA |
| Janeiro | 7,4462 | 7,5673 | 7,5564 | 1,4668 | 1,2730 | 1,1868 |
| Fevereiro | 7,4727 | 7,3122 | 7,2868 | 1,5060 | 1,3520 | 1,3128 |
| Março | 7,1856 | 7,1079 | 7,1051 | 1,3117 | 1,4208 | 1,3617 |
| Abril | 6,6024 | 6,8139 | 6,8232 | 1,2567 | 1,2780 | 1,2500 |
| Mai | 6,5351 | 6,4296 | 6,4366 | 1,2681 | 1,0040 | 1,0417 |
| Junho | 6,0356 | 6,1662 | 6,1926 | 0,9508 | 0,9059 | 0,8762 |
| Julho | 6,4069 | 6,3782 | 6,3835 | 0,9869 | 0,8739 | 0,9160 |
| Agosto | 7,1029 | 7,0080 | 7,0410 | 1,2106 | 1,0456 | 1,1713 |
| Setembro | 7,7802 | 7,8293 | 7,8385 | 1,6163 | 1,3940 | 1,4207 |
| Outubro | 8,2269 | 8,3272 | 8,3247 | 1,6727 | 1,4543 | 1,4857 |
| Novembro | 8,2244 | 8,2442 | 8,2756 | 1,5438 | 1,3472 | 1,3767 |
| Dezembro | 7,9872 | 7,8648 | 7,8461 | 1,4093 | 1,2842 | 1,2476 |

Pode-se observar nestas tabelas 6.11 e 6.12 que os valores médios dos dados dos meses das séries filtradas estão bem próximos dos valores médios das séries

originais. Em relação ao desvio padrão, nota-se que, em todos os meses, são menores nas séries filtradas SSA e MSSA.

Os resultados obtidos mostram que a filtragem prévia por SSA ou MSSA propiciou um melhor ajuste dos modelos PAR(p).

6.2. Geração de Cenários Eólicos

Assim como nas séries hidrológicas, foram gerados 5.000 cenários de velocidade do vento para um horizonte de previsão de 5 anos (60 meses) a partir dos modelos PAR(p) com as séries originais, do modelo PAR(p) – SSA com as séries filtradas via SSA separadamente e do modelo PAR(p) – MSSA com as duas séries filtradas simultaneamente. A metodologia usada para avaliar se as séries sintéticas possuem o comportamento estatístico idêntico ao das séries históricas foi a mesma utilizada nas séries hidrológicas. Assim, as figuras 6.18 e 6.19 que mostram o comportamento das médias históricas das duas estações anemométricas estudadas apresentam este comportamento em comparação com o comportamento das médias dos cenários gerados a partir de filtragens SSA e MSSA, além dos cenários gerados a partir das séries originais. Pode-se observar que as médias dos cenários sintéticos da estação Petrolina conseguem reproduzir melhor a média histórica desta estação anemométrica. Já na estação Pesqueira, esta configuração começa a ser observada aproximadamente a partir do mês 20 dos 60 meses gerados.

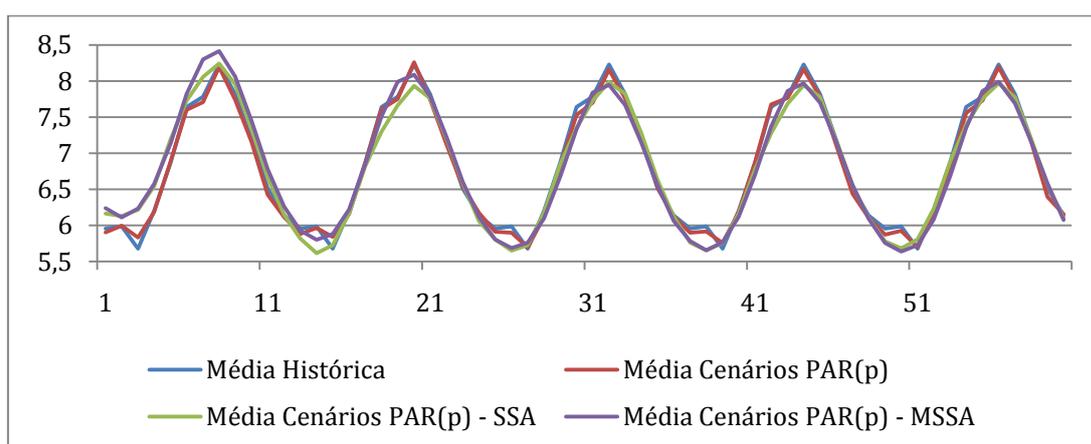


Figura 6.18. Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica de velocidade do vento na estação anemométrica Petrolina.

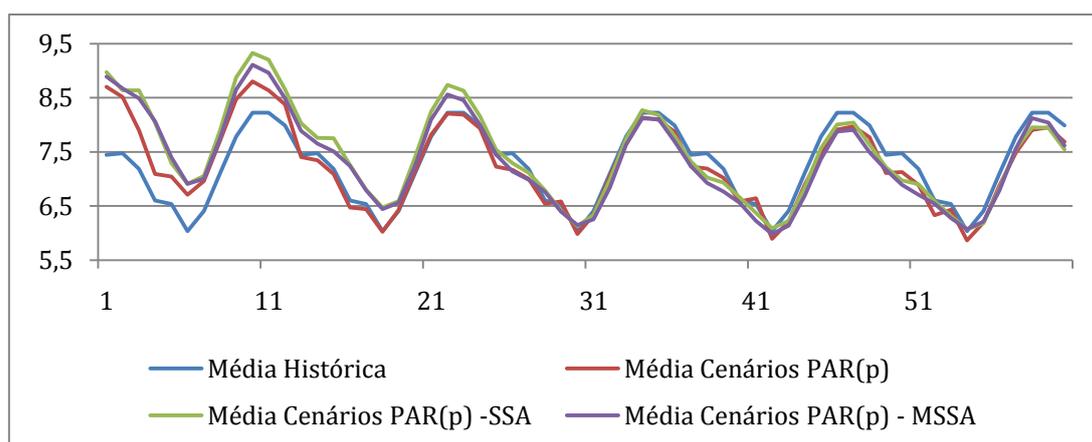


Figura 6.19. Comparação entre as médias dos cenários e a média histórica de velocidade do vento na estação anemométrica Pesqueira.

Como já foi discutida antes, a filtragem de séries temporais reduz o desvio-padrão dos erros e a geração de cenários depende das estatísticas dos erros na modelagem PAR(p), incluindo-se seu desvio-padrão. Com isso, os ruídos removidos na filtragem SSA e MSSA retornam aos cenários gerados para que possa ser feita a análise comparativa dos comportamentos desta medida. Na ocasião, tem-se duas séries de ruídos de comprimento 192, uma para cada estação anemométrica em estudo oriundas da filtragem SSA e mais duas oriundas da filtragem MSSA. A redistribuição destas séries é feita de modo que cada mês contenha uma série de ruídos de comprimento 16 (pois são 16 anos de 12 meses). Com isso, para gerar os 5 anos de cenários de ruídos, são necessárias amostragens Bootstrap de amostras de tamanho 5 para cada mês e a mesma operação repetida 5.000 vezes. Com isso, 5.000 séries de ruídos de comprimento 60 são obtidas e adicionadas aos cenários gerados via lognormal.

A partir dos novos cenários, desvios-padrão são calculados para serem comparados aos desvios-padrão das séries históricas e aos desvios-padrão dos cenários gerados pelo modelo PAR(p) com as séries originais. As figuras 6.20 e 6.21 mostram estas comparações nas respectivas estações anemométricas Petrolina e Pesqueira.

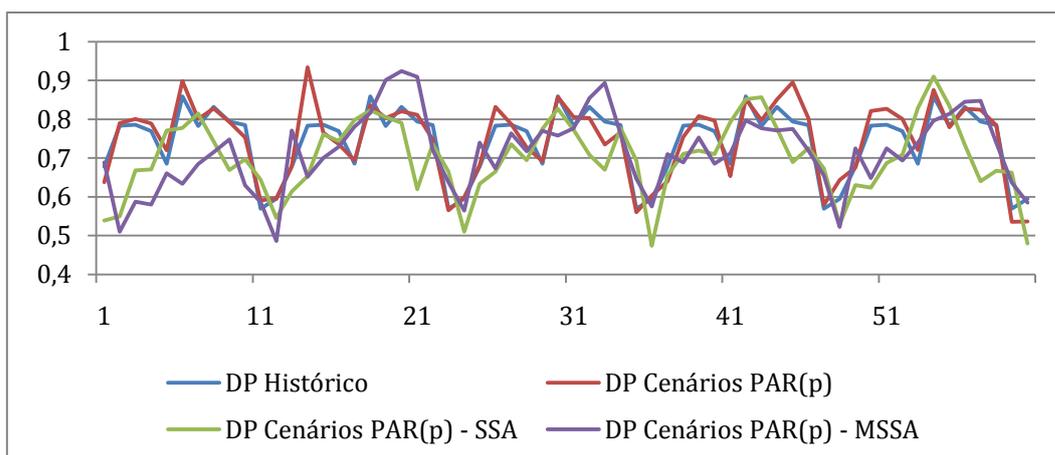


Figura 6.20. Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico de velocidade do vento na estação anemométrica Petrolina.

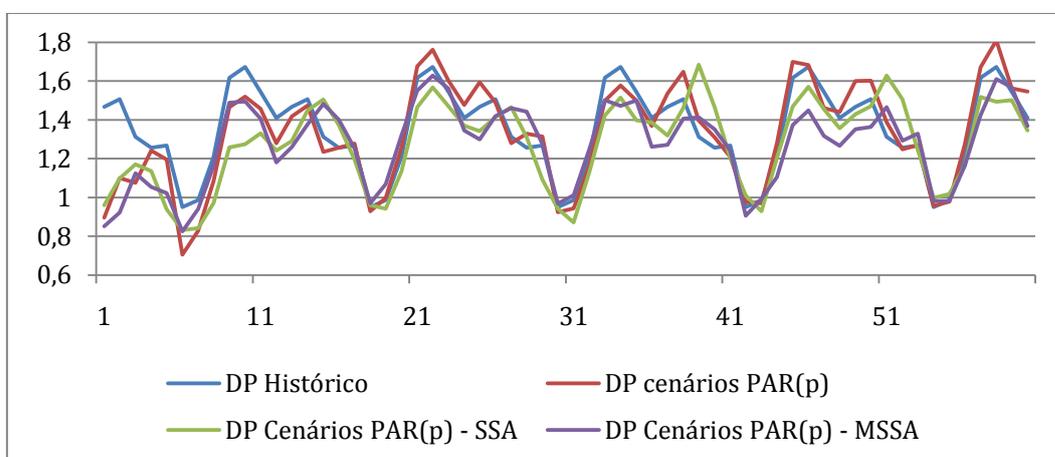


Figura 6.21. Comparação entre os desvios-padrão dos cenários e o desvio-padrão histórico de velocidade do vento na estação anemométrica Pesqueira.

Pode-se observar nas figuras 6.20 e 6.21 que os desvios-padrão dos cenários gerados a partir da modelagem PAR(p) sem e com a filtragem SSA/MSSA acompanham em parte o desvio-padrão histórico da estação anemométrica Petrolina. Na estação Pesqueira, pode-se observar uma semelhança maior entre estas medidas.

6.3. Análise do Desempenho do Modelo

Os mesmos testes utilizados para avaliação do desempenho dos modelos de ENA são aplicados nas séries de velocidade do vento. Os testes de comparação entre as médias e de comparação entre as variâncias são aplicados aos 60 meses de horizonte entre os cenários sintéticos e os dados históricos ao nível de 5% de significância. A tabela 6.13 apresenta os percentuais de não rejeição da hipótese nula

de igualdade entre as médias históricas das duas estações anemométricas e as médias dos cenários gerados pelos modelos avaliados. Pode-se perceber que os percentuais são bastante satisfatórios mostrando que é possível gerar cenários de velocidade do vento com a modelagem PAR(p) e com a aplicação da abordagem SSA/MSSA. A tabela 6.14 apresenta os percentuais de não rejeição da hipótese nula de igualdade entre as variâncias históricas e as variâncias dos cenários gerados pelos modelos avaliados nas duas estações anemométricas. Os resultados são melhores que os observados no caso das médias, uma vez que os percentuais são no mínimo de 94%.

Tabela 6.13. Percentuais de não rejeição da hipótese nula de igualdade entre as média no teste t – Student em comparação com a série histórica.

| Estação Anemométrica | Não Rejeita H_0 (%) | | |
|----------------------|-----------------------|--------------|---------------|
| | PAR(p) | PAR(p) – SSA | PAR(p) - MSSA |
| Petrolina | 100 | 95 | 90 |
| Pesqueira | 90 | 80 | 85 |

Tabela 6.14. Percentuais de não rejeição da hipótese nula de igualdade entre as variâncias no teste de Levene em comparação com a série histórica.

| Estação Anemométrica | Não Rejeita H_0 (%) | | |
|----------------------|-----------------------|--------------|---------------|
| | PAR(p) | PAR(p) – SSA | PAR(p) - MSSA |
| Petrolina | 100 | 99 | 94 |
| Pesqueira | 99 | 99 | 95 |

Os testes de sequências negativas quando aplicados a cenários de velocidade do vento avalia a capacidade de os cenários reproduzirem os períodos em que os ventos são insuficientes para gerar energia. As tabelas 6.15, 6.16 e 6.17 apresentam os resultados destes testes aplicados aos cenários gerados pela modelagem PAR(p), PAR(p) – SSA e PAR(p) –MSSA.

Tabela 6.15. Teste de sequências negativas para o modelo PAR(p).

| Estação Anemométrica | Comprimento Valor Crítico: 3,84 | Soma p - valor min: 0,05 | Intensidade p - valor min: 0,05 |
|----------------------|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Petrolina | 1,04 | 0,1206 | 0,2906 |
| Pesqueira | 0,17 | 0,9355 | 0,8842 |

Tabela 6.16. Teste de sequências negativas para o modelo PAR(p) - SSA.

| Estação Anemométrica | Comprimento Valor Crítico: 3,84 | Soma p - valor min: 0,05 | Intensidade p - valor min: 0,05 |
|----------------------|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Petrolina | 2,16 | 0,3840 | 0,8376 |
| Pesqueira | 0,36 | 0,6170 | 0,3226 |

Tabela 6.17. Teste de sequências negativas para o modelo PAR(p) - MSSA.

| Estação | Comprimento | Soma | Intensidade |
|--------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| Anemométrica | Valor Crítico: 3,84 | p - valor min: 0,05 | p - valor min: 0,05 |
| Petrolina | 5,78 | 0,1210 | 0,5450 |
| Pesqueira | 0,27 | 0,2046 | 0,1820 |

Os testes apresentados nas tabelas 6.15 a 6.17 mostram que os cenários gerados a partir dos modelos PAR(p) das séries sem e com a filtragem SSA/MSSA das suas estações são capazes de reproduzir os períodos críticos de velocidades dos ventos insuficientes para gerar energia, pois obteve bons resultados em todas as variáveis para todos os modelos e todas as duas estações medidas.