

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PESQUISA SOBRE O EFEITO DE FENÔMENOS
SOLARES NO POTENCIAL ENERGÉTICO
SOLAR-EÓLICO**

TESE DE DOUTORADO

Eduardo Bonnuncielli Marafiga

Santa Maria, RS, Brasil

2015

PESQUISA SOBRE O EFEITO DE FENÔMENOS SOLARES NO POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR-EÓLICO

Eduardo Bonnuncielli Marafiga

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de concentração em Processamento de Energia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Universidade Federal de Santa Maria
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

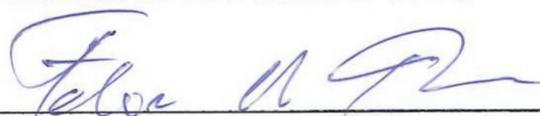
A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a tese de Doutorado

**PESQUISA SOBRE O EFEITO DE FENÔMENOS SOLARES NO
POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR-EÓLICO**

Apresentado por
Eduardo Bonnuncielli Marafiga

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:



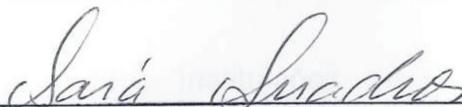
Felix Alberto Farret, PhD
(Presidente/Orientador)



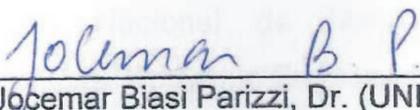
Lineu Belico dos Reis, Dr. (USP)



Luciane Neves Canha, Dra. (UFSM)



Nara de Fátima Quadros da Silva, Dra. (UFSM)



Jocemar Biasi Parizzi, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, 11 de setembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Ao Criador pela oportunidade de vivenciar novos desafios e assim sentir-me merecedor de seu amor incondicional.

Ao Prof. Felix Alberto Farret, meu orientador, pelo acompanhamento, dedicação, paciência e amizade demonstradas ao longo destes anos de trabalho, pela habilidade científica, correções, críticas e sugestões relevantes feitas no decorrer desta orientação.

Ao Prof. Andrei Piccinini Legg, pelo estimável apoio no desenvolvimento deste trabalho de tese.

À Francisca Mendonça, pela valiosa ajuda com seu conhecimento em estatística que em muito contribuiu para a realização desta tese.

À minha sobrinha Maria Alice Araujo, que incansavelmente em muito contribuiu nas correções e apoio durante a fase de revisão bibliográfica e estruturação dos dados para a execução desta tese e principalmente pela paciência amiga demonstrada nos momentos difíceis.

Aos amigos e colegas Prof. Nirvan Peixoto e Prof^a. Erika Goellner pela valiosa ajuda e disponibilidade nas correções e troca de informações que muito contribuíram para a execução desta tese.

A todos os amigos e colegas do CTISM da UFSM que de uma forma ou de outra ajudaram, sejam com palavras de incentivo, sugestões e principalmente pela amizade estimável que ajudaram a tornar mais leve esta jornada.

À Rachel, companheira e incansável incentivadora nos momentos de lassidão, e pela paciência e compreensão demonstradas nos contratempos ao longo destes anos.

Agradeço as seguintes Instituições pelas informações disponibilizadas: Laboratório de Agrometeorologia da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, FEPAGRO-RS, Instituto Nacional de Meteorologia, INMET e a Estação Agroclimatológica de Pelotas, Convênio Embrapa UFPel/INMET.

Mais uma vez, a todos os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

PESQUISA SOBRE O EFEITO DE FENÔMENOS SOLARES NO POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR-EÓLICO

Autor: EDUARDO BONNUNCIELLI MARAFIGA
Orientador: FELIX ALBERTO FARRET, PhD

Local e data da defesa: Santa Maria, 11 de setembro de 2015.

Esta tese analisa os dados mensais das séries históricas dos ciclos de insolação, radiação solar e velocidade média dos ventos para melhorar o prognóstico de longo prazo na localização de áreas para fontes eólicas e solares de geração de potência elétrica. Como estudo de caso, tomou-se o período de dados de 1961 a 2008 para definir imprecisões de longo prazo que podem ocorrer no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, na estimativa da tendência comportamental das variáveis meteorológicas e compará-las com dados medidos, testando assim, a homogeneidade das informações. As análises das variáveis climáticas foram realizadas através de modelos ARIMA (modelos autorregressivos integrados de média móvel), por meio da metodologia Box & Jenkins e do estudo da sazonalidade com modelos X11 ARIMA em níveis de significância estatística de 5%. Neste estudo, o período entre 1961 e 2011 indicou que os índices de insolação não foram suficientes para superar os valores verificados nas décadas de 1960 e 1970, em que os percentuais foram na maioria dos meses da ordem de -1% abaixo da média histórica. Os dados observados da insolação sugerem tendências decrescentes nas décadas de 1980 e 1990, pela presença do fenômeno “global dimming” sobre o estado do Rio Grande do Sul contribuindo para menores níveis de radiação solar. Foi constatada também uma possível quebra estrutural na série eólica em agosto de 2001 através do teste CUSUMQ (soma acumulada dos quadrados dos resíduos recursivos) e do teste de Lane et al. (2002), conduzindo a valores maiores e superestimando o prognóstico final do potencial eólico. Também foi constatada, redução em seis dos doze meses do ano na velocidade média dos ventos no período de 2003 a 2011. A estação da primavera, geralmente com o maior potencial eólico, indicou uma maior média de redução enquanto a estação de menor potencial eólico, o outono, mostrou um comportamento inverso para este mesmo período. Através da análise espectral, realizada pelo método de Fourier, as séries históricas de insolação e radiação solar mostraram também ciclos com amplitudes possíveis de influenciar as mensurações do potencial energético solar. Com estas variações

temporais nos dados, as previsões de localização de centrais eólicas e fotovoltaicas ficam seriamente prejudicadas, uma vez que as oscilações meteorológicas de longo prazo podem variar sensivelmente na melhor localização de áreas para geração de energia elétrica.

Palavras-chaves: Potencial Solar-Eólico, global dimming, Sazonalidade, Mudança Climática, X11-ARIMA, Modelo Box & Jenkins.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa De Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

RESEARCH ON THE EFFECT OF SOLAR PHENOMENA IN THE SOLAR-WIND ENERGY POTENTIAL

Author: EDUARDO BONNUNCIELLI MARAFIGA
Advisor: FELIX ALBERTO FARRET, PhD

Location and date of presentation: Santa Maria, 11 Sep, 2015

This thesis analyzes the monthly data from historical series of the heat stroke cycles, solar radiation and average wind speeds in the 1961 and 2008 period to identify long-term inaccuracies in the location of both wind and solar sources. The state of Rio Grande do Sul-Brazil, was chosen as a case study, to estimate the behavioral trend of these variables and compare them with the measured data, testing the homogeneity of information. Therefore, it aims at improving the long-term prognosis in locating projects of solar power generation plants. The analysis of these climatic variables was carried out using ARIMA models (autoregressive integrated moving average models) as well as the Box & Jenkins methodology and seasonality studies with the X11 ARIMA models with 5% statistical significance. In this study, the period between 1961 and 2011 indicated that heat stroke rates were not enough to overcome the values recorded in the 1960s and 1970s, when the percentages were in most months 1% below the historical average. The observed heat stroke data suggest decreasing trends in the 1980s and 1990s, due to the presence of the phenomenon called "global dimming", which contributed to lower levels of solar radiation. A possible structural break has been found in the wind series from August 2001 through the CUSUMQ test (cumulative sum of squares of recursive waste) and the Lane et al test. (2002), leading to higher values and overestimating the final prognosis of wind power. A decrease in the average wind speed was also observed from 2003 to 2011 during six months of these years. The spring season, often with the highest wind potential had the highest mean decrease while the season with the lowest wind potential, fall, had the opposite behavior during the studied period. By

spectral analysis, performed by Fourier method, the time series of sunshine and solar radiation also showed cycles with possible ranges of influence on measurements of the solar energy potential. Such temporal variations in the data, indicate that possible locations for the wind and photovoltaic plants may be seriously affected since long-term weather fluctuations can vary significantly even at the best location selected to generate electricity.

Keywords: Solar-wind Potential, Global dimming, Seasonality, Climate Change, X11-ARIMA, Model Box & Jenkins.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Valores verificados do consumo final de energia no Rio Grande do Sul, período 2005-2010 e projeção de crescimento até 2035.....	37
Figura 2.2 – Potencial fotovoltaico do Rio Grande do Sul.....	37
Figura 2.3 – Regiões representando o potencial fotovoltaico da Figura 2.2.....	38
Figura 2.4 – Potencial eólico do Rio Grande do Sul.	38
Figura 2.5 – T_p e T_a representam a posição da Terra no periélio e no afélio, respectivamente.....	40
Figura 2.6 – As estações do ano.....	41
Figura 2.7 – Espectro eletromagnético.....	42
Figura 2.8 – Espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera e na superfície da Terra.....	44
Figura 2.9 – Equilíbrio radiativo terrestre.....	47
Figura 2.10 – Estrutura vertical da atmosfera terrestre até 110 km de altura.....	49
Figura 2.11 – Composição do ar seco até 25 km de altitude.....	50
Figura 2.12 – Temperatura observada na superfície da Terra, em escala continental e global, comparadas com resultados de simulações matemáticas (azul e vermelha). As médias decenais de temperatura são relativas à média apresentadas para o período de 1906 a 2005 (linha preta).....	53
Figura 2.13 – Representação dos mecanismos de formação do aerossol atmosférico.....	55
Figuras 2.14 – Previsão do ciclo solar 24. As linhas pontilhadas mostram a previsão e as cheias os números de manchas solares já observadas.....	58
Figura 2.15 – Imagem detalhada de uma mancha solar no espectro de luz visível captada no observatório solar Big Bear da Califórnia no telescópio solar equipado com um espectrómetro de luz visível permitindo ver as diferentes capas da atmosfera solar.....	60
Figura 2.16 – Ciclo solar apresentando assimetria entre a fase ascendente, mais curta e a fase descendente.....	61
Figura 2.17 – Número de manchas solares anual por média.....	63
Figura 2.18 – Pirocumulus produzido por queimada em área de floresta no estado de Rondônia.....	65
Figura 2.19 – Variações na precipitação de chuvas para o hemisfério Norte nos períodos de menor e maior brilho solar.....	66
Figura 2.20 – Temperaturas nos hemisférios Norte (a) e Sul (b) durante e após o período do escurecimento global.....	68
Figura 2.21 – Concentração Atmosférica de CO_2 em parte por milhão (ppm), medidas feitas no observatório de Mauna Loa, Havaí pela agência oceânica e atmosférica americana (NOAA).....	70
Figura 2.22 – Valores mensais do SOI.....	72
Figura 3.1 – Esquema ilustrativo dos modelos univariados.....	81
Figura 3.2 – Comportamento das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial de um modelo AR(1).....	83
Figura 3.3 – Comportamento de uma função de autocorrelação parcial e autocorrelação de um modelo MA (1).....	84
Figura 3.4 – Fluxograma do ciclo iterativo de Box & Jenkins.....	91

Figura 3.5 – Distribuição das Regiões Funcionais do Rio Grande do Sul.....	100
Figura 4.1 – Histograma para série de insolação (insolação (h) x distribuição de frequência).....	118
Figura 4.2 – Série histórica original de insolação média mensal (período x insolação).....	119
Figura 4.3 – Correlograma da série insolação.....	121
Figura 4.4 – Série sazonal ajustada.....	126
Figura 4.5 – O comportamento da sazonalidade em diferentes anos e em diferentes meses.....	128
Figura 4.6 – Série sazonal original e ajustada (IN-Insolação, trans-transformada). ..	129
Figura 4.7 – Função de Autocorrelação.....	130
Figura 4.8 – Função de Auto correlação Parcial.....	130
Figura 4.9 – Histograma para série de radiação solar [radiação(cal.cm-2) x distribuição de frequência].....	133
Figura 4.10 – Série histórica original da radiação solar média mensal (período x radiação).....	134
Figura 4.11 – Correlograma da série radiação solar.....	135
Figura 4.12 – Série Sazonal Ajustada.....	140
Figura 4.13 – O comportamento da sazonalidade em diferentes anos e meses	142
Figura 4.14 – Série sazonal original e ajustada (trns – transformada).....	143
Figura 4.15 – Função de Autocorrelação.....	144
Figura 4.16 – Função de auto correlação parcial.....	144
Figura 4.17 – Histograma para série eólica.....	146
Figura 4.18 – Série histórica eólica.....	147
Figura 4.19 – Correlograma da série eólica.....	149
Figura 4.20 – Serie sazonal ajustada.....	153
Figura 4.21 – Série sazonal original e ajustada.....	155
Figura 4.22 – O comportamento da sazonalidade eólica em diferentes anos e em diferentes meses.....	156
Figura 4.23 – Função de autocorrelação.....	157
Figura 4.24 – Função de auto correlação parcial.....	158
Figura 4.25 – Teste de estabilidade – CUSUM e CUSUMQ, respectivamente.....	160
Figura 4.26 – Tendência linear da insolação da série histórica média anual no estado do Rio Grande do Sul. Período (1961-2000).....	166
Figura 4.27 – Tendência linear da insolação média anual no estado do Rio Grande do Sul. Período (1970-2000).....	167
Figura 4.28 – Tendência linear da insolação média anual no estado do Rio Grande do Sul. Período (1978-1998).....	167
Figura 4.29 – Tendência linear da insolação média anual no estado do Rio Grande do Sul. Período (1995-2011).....	169
Figura 4.30 – Ajuste polinomial da série histórica de insolação média anual para o estado do Rio Grande do Sul. Período (1975-2011).....	170
Figura 4.31 – Ajuste polinomial da insolação média anual para o estado do Rio Grande do Sul, (1975-2011).....	170
Figura 4.32 – Comparação entre as estações do ano da média de insolação em número de horas para diferentes períodos.....	172
Figura 4.33 – Características de um ciclo.....	173
Figura 4.34 – Série histórica original de insolação média mensal (período x amplitude em (h)).....	174

Figura 4.35 – Série histórica original da radiação média mensal (período x amplitude em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2}$)	174
Figura 4.36 – Série da insolação ajustada (amplitude x frequência) (freq./ano).....	176
Figura 4.37 – Série da radiação ajustada (amplitude x frequência) $\text{freq.}(1/\text{ano})$	176
Figura 4.38 – Série da insolação com seus respectivos períodos e amplitudes em (h)	177
Figura 4.39 – Série da radiação solar global com seus respectivos períodos e amplitudes em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2}$	178
Figura 4.40 – Série da insolação com as principais componentes de períodos	179
Figura 5.1 – Temperatura mínima (a - esquerda) e temperatura máxima (b - direita) em ($^{\circ}\text{C}$) por região.....	183
Figura 5.2 – Velocidade média (a - esquerda) e velocidade máxima (b - direita) dos ventos ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	184
Figura 5.3 – Insolação média (h) por região	185
Figura 5.4 – Radiação solar global em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$	185
Figura 5.5 – Comportamento da sazonalidade para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, estação verão. Dados medidos.....	187
Figura 5.6 – Ajuste linear da variação média da insolação em diferentes meses e anos.....	188
Figura 5.7 – Comportamento da sazonalidade para os meses de março, abril e maio, estação outono. Dados medidos.....	190
Figura 5.8 – Ajuste linear da variação média da insolação em diferentes meses e anos.....	192
Figura 5.9 – Comportamento da sazonalidade para os meses junho, julho e agosto, estação inverno. Dados medidos.	194
Figura 5.10 – Ajuste linear da variação média da insolação em diferentes meses e anos.....	195
Figura 5.11 – Dados medidos da sazonalidade para os meses setembro, outubro e novembro, e da estação primavera.....	197
Figura 5.12 – Ajuste linear da variação média da insolação em diferentes meses e anos para a primavera.	198
Figura 5.13 – Médias percentuais para variável insolação entre 2008 a 2011. Da esquerda para direita correspondem os meses que compõem as respectivas estações sazonais de acordo com a Tabela 5.5.	199
Figura 5.14 – Comparação entre as estações do ano da média de variação da insolação em (h) para diferentes anos	200
Figura 5.15 – Comportamento da sazonalidade para os meses dezembro, janeiro e fevereiro, estação verão para a radiação solar global, variação média dos dados medidos.....	206
Figura 5.16 – Ajuste linear da média da variação da radiação solar global em diferentes meses e anos para estação verão. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade	207
Figura 5.17 – Comportamento da sazonalidade para os meses março, abril e maio, estação outono para a radiação solar global, variação média dos dados medidos.....	208
Figura 5.18 – Ajuste linear da média da variação da radiação solar global em diferentes meses e anos para estação outono. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade	209
Figura 5.19 – Comportamento da sazonalidade para os meses junho, julho e agosto, estação inverno para a radiação solar global, variação média dos dados medidos.	210

Figura 5.20 – Ajuste linear da média da variação da radiação solar global em diferentes meses e anos para estação inverno. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade.....	211
Figura 5.21 – Comportamento da sazonalidade para os meses setembro, outubro e novembro, estação primavera, para a radiação solar global, variação média dos dados medidos.	212
Figura 5.22 – Ajuste linear da média da variação da radiação solar global em diferentes meses e anos para estação primavera. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade.....	213
Figura 5.23 – Médias percentuais para variável radiação solar global entre 2003 a 2008. Da esquerda para direita correspondem os meses que compõem as respectivas estações sazonais de acordo com a Tabela 5.8.	214
Figura 5.24 – Comparação entre as estações do ano da média de radiação solar global em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ entre, 2005 a 2008.....	215
Figura 5.25 – Comportamento da sazonalidade para os meses dezembro, janeiro e fevereiro, estação verão para a velocidade média eólica, variação média dos dados medidos	217
Figura 5.26 – Ajuste linear (linha vermelha) e polinomial (linha curva azul) da média da variação da velocidade eólica em diferentes meses e anos para estação verão.	218
Figura 5.27 – Comportamento da sazonalidade para os meses março, abril e maio, estação outono para a velocidade média eólica, variação média dos dados medidos	219
Figura 5.28 – Ajuste linear e polinomial da média da variação da velocidade eólica em diferentes meses e anos para estação outono.....	220
Figura 5.29 – Comportamento da sazonalidade para os meses junho, julho e agosto, estação inverno para a velocidade média eólica, variação média dos dados medidos.	221
Figura 5.30 – Ajuste linear e polinomial da média da variação da velocidade eólica em diferentes meses e anos para estação inverno. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade e R-Square o coeficiente de determinação.....	222
Figura 5.31 – Comportamento da sazonalidade para os meses setembro, outubro e novembro, estação primavera para a velocidade média eólica, variação média dos dados medidos	223
Figura 5.32 – Ajuste linear e polinomial da média da variação da velocidade eólica em diferentes meses e anos para estação primavera.....	224
Figura 5.33 – Médias percentuais para variável eólica entre 2003 a 2011. Da esquerda para direita correspondem os meses que compõem as respectivas estações sazonais de acordo com a Tabela 5.9.	226
Figura 5.34 – Comparação entre as estações do ano da média de variação na velocidade média dos ventos ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) em diferentes anos.....	227
Figura 5.35 – Variação da velocidade média do vento ao longo dos meses para o período de 1970 a 2008.....	228
Figura 5.36 – Representação da velocidade média dos ventos ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) para o mês de agosto entre 1970 a 2008.....	229
Figura 5.37 – velocidade média dos ventos em diferentes meses e anos entre 1970 a 2008.....	230
Figura 5.38 – Representação da velocidade média do vento em diferentes meses para os anos de 2000, 2001 e 2002.	231

Figura 5.39 – Amplitudes em $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$ dos ciclos mais significativos observados no espectro da insolação 235

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comportamento das FAC e da FACP de um processo ARIMA (p, d, q)	89
Tabela 3.2 – Coordenadas geográficas das estações meteorológicas localizadas em 30 municípios do Rio Grande do Sul.....	94
Tabela 4.1 – Teste de Wald	120
Tabela 4.2 – Testes para verificação da sazonalidade	122
Tabela 4.3 – Série Original Insolação (total: 673,241; média = 6,233; desvio padrão = 1,21)	123
Tabela 4.4 – Teste da sazonalidade estável.....	124
Tabela 4.5 – Finais não modificados, rácios, SI – (sazonalidades irregulares)	124
Tabela 4.6 – Valores finais de reposição para relações extremas.....	125
Tabela 4.7 – Mudança mensal mês a mês na série inicial.....	126
Tabela 4.8 – Mudanças mês a mês nas séries finais ajustadas sazonalmente.....	127
Tabela 4.9 – Final da série ajustada sazonalmente.....	127
Tabela 4.10 – Estatística descritiva das variáveis para a radiação solar.....	132
Tabela 4.11 – Teste de Wald	134
Tabela 4.12 – Testes para verificação da sazonalidade	136
Tabela 4.13 – Série original radiação solar (total: 26932,5; média = 320,62; desvio padrão = 11,098).....	138
Tabela 4.14 – Teste da sazonalidade estável.....	138
Tabela 4.15 – Finais não modificados, rácios, SI – (sazonalidades irregulares)	139
Tabela 4.16 – Valores finais de reposição para relações extremas.....	139
Tabela 4.17 – Mudança mensal mês a mês na série inicial.....	141
Tabela 4.18 – Mudanças mês a mês nas séries finais ajustadas sazonalmente....	141
Tabela 4.19 – Estatística descritiva das variáveis para velocidade média eólica ...	146
Tabela 4.20 – Teste Wald	148
Tabela 4.21 – Testes para verificação da sazonalidade	149
Tabela 4.22 – Série original eólica	151
Tabela 4.23 – Teste da sazonalidade estável.....	151
Tabela 4.24 – Finais não modificados rácios SI - (sazonalidades irregular).....	152
Tabela 4.25 – Os valores finais de reposição para relações extremas.....	152
Tabela 4.26 – Mês a mês mudanças na série inicial	154
Tabela 4.27 – Mês a mês mudanças na séries finais ajustada sazonalmente	154
Tabela 4.28 – Final da série ajustada sazonalmente, mudanças mês a mês.....	155
Tabela 4.29 – Testes de raízes unitárias Lanne et al. (2001, 2002), par Série eólica	161
Tabela 4.30 – Variação média do brilho solar em diferentes meses e em diferentes períodos (dados medidos).....	163
Tabela 4.31 – Variação média do brilho solar em diferentes períodos e em diferentes meses.....	164
Tabela 4.32 – Diferença entre períodos e a variação destes.....	165
Tabela 4.33 – Valores das amplitudes da insolação (h)	178
Tabela 4.34 – Valores dos períodos (em anos) dos mesmos gráficos acima da direita para esquerda	179

Tabela 4.35 – Amplitude, fase e frequências de alguns períodos observados na variável insolação	180
Tabela 5.1 – Média da variação do brilho solar na estação de verão em diferentes períodos.....	189
Tabela 5.2 – Média da variação do brilho solar na estação do outono em diferentes períodos.....	191
Tabela 5.3 – Média da variação do brilho solar na estação inverno em diferentes períodos.....	196
Tabela 5.4 – Média da variação do brilho solar na estação primavera em diferentes períodos.....	198
Tabela 5.5 – Média da variação do brilho solar no período entre 2008 a 2011 nas quatro estações do ano.	200
Tabela 5.6 – Decréscimo da irradiação solar global diária média anual em kWh·m ⁻² ·dia ⁻¹ no plano horizontal dos dados apresentado no Atlas Solar Brasileiro (2008), para Região Sul	204
Tabela 5.7 – Decréscimo da irradiação solar global diária média anual em kWh·m ⁻² ·dia ⁻¹ no plano inclinado apresentado no Atlas Solar Brasileiro (2008), para Região Sul.....	204
Tabela 5.8 – Média da variação da radiação solar global no período entre 2003 a 2008 nas quatro estações do ano.....	215
Tabela 5.9 – Média da variação eólica para os diferentes meses do ano entre 2003 e 2011, dados medidos.	225
Tabela 5.10 – Média da variação eólica entre os diferentes anos para as quatro estações do ano.	227
Tabela 5.11 – Amplitude, fase e frequências dos períodos mais significativos observados na variável insolação.....	234
Tabela 5.12 – Amplitude dos períodos mais significativos observados nas variáveis insolação e radiação solar global	235

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Comportamento das Funções FAC e FACP para modelos estacionários	87
Quadro 3.2 – Regiões do Rio Grande do Sul com seus respectivos municípios.....	99
Quadro 4.1 – Estatística descritiva das variáveis para a insolação	117

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Objetivo geral	31
1.2	Objetivos específicos	31
1.3	Estrutura desta tese	33
2	REVISÃO DA LITERATURA	35
2.1	Panorama solar eólico no Estado do Rio Grande do Sul	35
2.2	Radiação solar	39
2.2.1	Radiação Solar Direta e Difusa	43
2.2.2	Balanço da radiação solar e gases atmosféricos	45
2.2.3	Estrutura vertical da atmosfera	48
2.3	Estimativa da radiação solar a partir do brilho solar	51
2.4	Variabilidade climática	52
2.4.1	Os aerossóis e nebulosidade	54
2.5	Mudanças na radiação solar	56
2.5.1	Ciclo solar	57
2.6	Escurecimento global (Global Dimming)	63
2.6.1	Causas e consequências do escurecimento global	66
2.7	Variabilidade no brilho solar e controle do clima	68
2.7.1	O dióxido de carbono (CO ₂)	69
2.7.2	O fenômeno El-Niño	71
3	MATERIAL E MÉTODOS UTILIZADOS NAS SÉRIES TEMPORAIS	75
3.1	Metodologia	75
3.2	Conceitos gerais e definições	76
3.2.1	Série temporal	77
3.2.2	Processo Estocástico	77
3.2.3	Processo estacionário	78
3.2.4	Ruído branco	79
3.2.5	Modelo	79
3.2.6	Análise das componentes de uma série temporal	80
3.2.7	Modelos univariados	81
3.3	Modelos estacionários AR, MA e ARMA	81
3.3.1	Modelos não estacionários (ARIMA (p,d,q))	88
3.4	Modelos Box & Jenkins	90
3.4.1	Critérios penalizadores de uma seleção para escolha do método	93
3.5	Estruturação do banco de dados	93
3.5.1	Aplicação da técnica proposta por Box & Jenkins no preenchimento dos dados ausentes do banco de dados	96
3.5.2	Etapas de identificação do modelo (Ver, Figura 3.4 – Fluxograma do ciclo iterativo de Box & Jenkins)	98
3.6	Os métodos X11 e X11-ARIMA	101
3.7	Análise espectral de séries temporais – Estudo do ciclo na série	106
3.7.1	Análise espectral através do método de análise de Fourier	106
3.8	Estudo sobre a estabilidade da série e possíveis quebras estruturais	107
3.8.1	Teste para estabilidade	108

3.9	Generalidades da insolação	110
3.9.1	Instrumentos para registro da insolação	111
3.10	Síntese do capítulo	112
4	RESULTADOS OBTIDOS COM AS METODOLOGIAS APLICADAS NAS SÉRIES TEMPORAIS.	115
4.1	Introdução	115
4.2	Análises descritivas para obtenção das componentes tendência e sazonalidade da variável insolação	116
4.2.1	Análise descritiva	117
4.2.2	Teste de Normalidade – Jarque-Bera	118
4.2.3	Tendência	120
4.2.4	Sazonalidade	121
4.2.5	Resultados dos ajustes com o modelo X11 ARIMA.....	122
4.2.6	Avaliando o modelo série original e ajustada.....	129
4.3	Análise descritiva para a obtenção das componentes tendência e sazonalidade da variável radiação solar global	131
4.3.1	Análise descritiva	131
4.3.2	Testes de normalidade – Jarque-Bera (JB)	133
4.3.3	Análise de tendência.....	134
4.3.4	Análise da sazonalidade	135
4.3.5	Pesos associados às componentes irregulares.....	140
4.3.6	Avaliando o modelo das séries original e ajustada	142
4.4	Análise descritiva para a obtenção das componentes tendência e sazonalidade da variável eólica - (velocidade média do vento)	145
4.4.1	Análise descritiva	145
4.4.2	Testes de normalidade – Jarque-Bera (JB)	147
4.4.3	Análise da sazonalidade	148
4.4.4	Resultados dos ajustes com o modelo X11 ARIMA.....	150
4.4.5	Pesos associados aos componentes irregulares.....	153
4.4.6	Avaliando o modelo da série original e ajustada.....	156
4.5	Análise sobre a estabilidade da série eólica e possíveis quebras estruturais	158
4.5.1	Teste de estabilidade	159
4.5.2	Teste Lanne	160
4.6	Análise do fenômeno escurecimento global no Estado do Rio Grande do Sul	161
4.6.1	Estações do ano-comparação	171
4.7	Análise espectral de séries temporais – Estudo do ciclo na série de insolação e radiação	172
4.7.1	Equações utilizadas na Transformada de Fourier	175
4.7.2	Gráficos obtidos com a Transformada de Fourier.....	175
4.7.3	Fases dos principais componentes da série para a variável insolação	180
4.8	Síntese do capítulo	181
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS VARIÁVEIS ANALISADAS	183
5.1	Informações das variáveis do banco de dados	183
5.2	Análise da tendência do comportamento sazonal da insolação	186
5.2.1	Comentários sobre a análise do comportamento sazonal da insolação.....	199
5.3	Evidências de tendência da redução do brilho solar no Estado do Rio Grande do Sul entre 1975 e 2000	202

5.4 Análises da tendência do comportamento sazonal da variável radiação solar global.	205
5.4.1 Comentários sobre a análise de tendência do comportamento sazonal da radiação solar global	213
5.5 Análises da tendência do comportamento sazonal da variável eólica. ..	216
5.5.1 Comentários sobre a análise de tendência do comportamento sazonal da variável eólica.....	225
5.5.2 Comentários sobre a estabilidade da série eólica e possíveis quebras estruturais.....	229
5.5.3 Comentários gerais sobre a análise de tendência do comportamento sazonal da variável eólica e possíveis quebras estruturais.....	231
5.6 Análises do comportamento cíclico das variáveis insolação e radiação solar global	232
6 CONCLUSÃO	237
6.1 Principais contribuições desta tese	239
6.2 Sugestões para a continuidade desta pesquisa.....	240
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	241
APÊNDICES	257
ANEXOS	289

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a humanidade vive momentos que podem se denominar a síndrome dos três E's, marcada pela crise energética, econômica e ecológica que assola o planeta com consequências negativas para os recursos naturais. Nem mesmo os melhores modelos matemáticos ou mesmo estimativas não formais, podem prever a complexidade das variações climáticas ao longo da história de sucessivas mudanças geológicas e climatológicas. Diante deste cenário, quando se discutem as mudanças climáticas oriundas das ações antrópicas, insere-se mais um "E", o da ética, que em qualquer resposta refletida pesa interesses conflitantes entre os diferentes atores da sociedade. Como as reações da sociedade organizada tem sido fracas e titubeantes, a própria natureza reage contra esse estado de desleixo e abuso do homem no uso das coisas que existem, exigindo que se tome uma decisão preventiva, rápida e eficaz, sob sérias ameaças de uma destruição irreversível e global (Farret A. F. 2014). Sendo assim, pode-se dizer que existe uma síndrome dos quatro E's, ou seja energética, econômica, ecológica e ética.

Com a crise que abalou o Japão em 2011, a comunidade ambiental mundial questionou o emprego de usinas nucleares como forma de atender à necessidade energética. Além desta fonte, têm-se as usinas hidroelétricas que dependem das variações climáticas e as usinas termoelétricas que contribuem na emissão de partículas para a atmosfera aumentando o risco para saúde e meio ambiente. Nestas diferentes formas de geração de energia destacam-se os problemas originados pela poluição tanto de origem natural como antrópica.

Conforme Goldemberg & Vilanueva (2003) a taxa de crescimento do Brasil no consumo de energia deverá ter nas próximas décadas um consumo superior ao dos países desenvolvidos. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEM 2013), se comparado apenas o consumo de energia elétrica no Brasil, entre 2006 e 2010 foi de 390 para 464,8 TWh, aproximando-se de países como a França e a Alemanha em 2010, com um consumo de energia elétrica na ordem de 471 e 549,1 TWh, respectivamente. Esta tendência de crescimento indica que, nas próximas décadas, o consumo de energia nos países desenvolvidos será ultrapassado pelo consumo nos países em desenvolvimento.

Para suprir as necessidades energéticas pode-se lançar mão de outras fontes preferencialmente de energias renováveis, como a solar e a eólica, que figuram entre as mais promissoras. Estas fontes podem fornecer energia elétrica, térmica e mecânica sem grandes impactos ao meio ambiente. Ainda dentro deste contexto, a preocupação com as mudanças climáticas e os avanços na tecnologia levam os pesquisadores a buscarem mecanismos de desenvolvimento de energia limpa que amenizem as emissões de gases tóxicos e de aquecimento, e que atendam as demandas cada vez mais acentuadas do consumismo global.

Sabe-se que a conversão da radiação solar e da velocidade do vento em energia utilizável depende das tecnologias disponíveis, e do conhecimento comportamental das variáveis climáticas através dos estudos da sazonalidade, ciclo e tendências destes elementos climáticos, ou seja, da frequência das condições de disponibilidade destas energias no local onde se pretende servir, bem como, as variações climáticas efetivas.

Conforme Echer, (2003), no século 17, o sol apresentou um período muito baixo de atividade solar, isto é, de manchas solares, que ficou conhecido como Mínimo de Maunder, no qual se observou no Hemisfério Norte um dos piores invernos. Também menciona que atualmente, apesar do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera da Terra, não se pode descartar a possibilidade de redução da atividade solar nas próximas décadas ou séculos, o que contribuiria para o resfriamento do clima, como aconteceu no século XVII. Foi quando o Sol mergulhou em um período de 70 anos de baixa irradiância, que ainda intriga os cientistas.

Conforme Echer, atualmente está se vivenciando um paradoxo, tanto nas observações medidas como nas simuladas em modelos climáticos, o que vem apresentando resultados preocupantes.

A concentração de CO₂ na atmosfera, que superou as 400 partes por milhão (ppm) que, segundo Cristiana Figueres (2013) das Nações Unidas para o Clima, coloca o planeta em uma situação de perigo. Se permanecer este quadro, com uma média de 400 ppm de concentração de CO₂, o aquecimento global previsto será de pelo menos 2,4 °C, segundo o relatório do Painel Intergovernamental da ONU sobre Mudanças Climáticas (IPCC), podendo chegar a valores nada animadores de aumento entre 3° e 5°C ao final deste século.

Ao mesmo tempo, observa-se uma diminuição da insolação levando a um paradoxo do clima.

Em relação à radiação solar, Stanhill, G. e Cohen, Shabtai (2001) publicaram uma pesquisa em que comparavam os registros em Israel nos anos cinquenta de raios solares e observaram uma diminuição de 22 % neste período. Verificaram com dados similares de outros pontos do planeta, e encontraram a mesma tendência.

De acordo com Wild Martin, (2005), em média, a quantidade de radiação solar que alcançava a superfície da Terra teria diminuído entre 0,23 e 0,32 % por ano, entre os anos de 1958 e 1992 e no período de 1960 a 1980, a diminuição da radiação foi grande o suficiente para contrabalançar o aumento induzido dos gases do efeito estufa e diminuir as grandes ondas de radiação.

Outro acontecimento foi publicado na revista *Geophysical Research Letters* em 2008, (Fonte: www.carbonobrasil.com) em que pesquisadores do Laboratório Nacional do Noroeste do Pacífico em Washington observaram que a quantidade de luz solar que chegava à China havia diminuído em aproximadamente $4,42 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ nos últimos cinquenta anos.

Para Krivova et al. (2007) os modelos recentes indicam que o aumento da irradiância solar a partir do fim do Mínimo de Maunder, foi aproximadamente de $1,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. De acordo com novo estudo publicado na revista *Scientific American*, (2013) certos fenômenos climáticos como: oceanos mais quentes, maior quantidade de chuvas tropicais, menor quantidade de nuvens subtropicais, circulação mais intensa de ventos, parecem estar relativamente associados a um ciclo de atividade solar de onze anos, resultando em variações na emissão total da radiação solar. Sendo assim, os possíveis efeitos do ciclo solar na mudança do clima do planeta e as evidências que indicavam uma variação de 11 anos em muitos parâmetros climáticos já haviam sido colocados por Hoyt & Schatten (1997).

Diante desse quadro paradoxal, tentar compreender o comportamento dos ciclos solar e da terra e sua implicação na variação climática e conseqüentemente na velocidade dos ventos é tão importante quanto o controle de emissão de poluentes na atmosfera causadores do aquecimento global.

Observa-se que os dados disponíveis quando se trata de entender mais sobre o comportamento do clima, ainda não são suficientes, pois diagnósticos e prognósticos apresentados pela comunidade científica, como comentado acima, demonstram ainda surpresa com os resultados das mudanças climáticas. Sendo assim cada vez mais se evidencia a relevância de pesquisas nesta área, como urge também a necessidade de pesquisadores inserirem mais ferramentas matemáticas

que possam elucidar com clareza o comportamento dos elementos do clima, como radiação, insolação e velocidade do vento na busca de minimizar os efeitos da mudança climática na sustentabilidade do potencial energético, como usinas eólicas e solares, e impactos no meio ambiente.

Segundo Kratzenberg, M. et al, (2003) também faltam informações de dados de radiação solar, há um número reduzido de estações radiométricas e existem falhas nos dados coletados de velocidade do vento, temperatura, insolação e outras informações relevantes, relacionadas ao clima. Estes fatos, levaram o Brasil a deixar de figurar nos bancos de dados de radiação solar de São Petersburgo, pois o que restou das estações Solarimétricas instaladas pelo governo federal no país em 1978 foram desativadas.

Apesar de muitas estações climatológicas terem sido desativadas no Rio Grande do Sul no passado, importantes dados foram preservados em conjunto com os dados medidos atuais. Este é o caso das informações utilizadas neste estudo, coletadas nas 30 estações meteorológicas de diferentes municípios e regiões do Estado. Estas informações foram preservadas pelos órgãos do Laboratório de Agrometeorologia da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária, FEPAGRO-RS, pelo Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, e Estação Agroclimatológica de Pelotas Convênio Embrapa UFPel/INMET, e atualmente mais informações sobre o clima são computadas diariamente pelas estações que restaram e são armazenadas em seus bancos de informações.

Com tantas alterações climáticas, quem pode garantir então que os estudos realizados para a melhor localização de uma central eólica ou solar permaneça sendo a melhor solução entre as opções disponíveis? Observe-se que este não é um problema localizado ou pontual numa área pretendida para se instalar a central geradora onde normalmente existirão apenas diferenças tópicas de intensidade dos ventos ou solar, digamos de uma torre eólica para outra, ou de uma área fotovoltaica para outra. As diferenças a que os estudos desta tese se referem são diferenças nas tendências climáticas em macrorregiões, influenciadas não pelas características do relevo da região, mas por uma variação que não depende da localização na superfície do planeta Terra, mas sim da disposição temporária cíclica dos astros no Universo. Contudo, acredita-se que modificações antrópicas, mas não cíclicas na superfície do planeta também influenciam. Quer pelas tantas queimadas, desmatamento, inundações, monoculturas, florestamento de áreas, poluição no mar

e no continente, alterações na variação no brilho solar, entre outras, possam alterar de sobremaneira os fundamentos dinâmicos sobre os quais se basearam os estudos para localização das atuais centrais de geração de energia solar e eólica que eles possam não ser mais válidos. Que fique bem claro que existem outras tantas fontes de variação da intensidade solar que provêm de fora do planeta Terra que são cíclicas, e estas também fazem parte do assunto desta tese (campo magnético terrestre, precessão do eixo terrestre, ventos solares).

Como decorrência do que foi acima discutido, esta tese busca entender um pouco mais sobre o comportamento das variáveis climatológicas e suas influências, através de estudos da sazonalidade, ciclo e tendências em séries históricas. Pretende-se contribuir para a melhoria do conhecimento sobre o clima e sua influência direta no rendimento da geração de energia e pressuposto, na qualidade desta geração em caso de estiagens ou nas grandes precipitações. Os dados resultantes, também contribuem para o planejamento e implementação de futuros parques de geração eólica e solar, bem como servem de subsídio de informação para outras tantas áreas de pesquisa.

1.1 Objetivo geral

Esta tese analisa o efeito de fenômenos solares no comportamento tendencial cíclico dos componentes climáticos com causas fora e dentro do planeta Terra com o intuito de contribuir para o conhecimento das variáveis que influenciam na localização das fontes alternativas dependentes direta ou indiretamente do clima, com consequências para a geração sustentável de energia.

1.2 Objetivos específicos

Observar as variações meteorológicas cíclicas que dependem de fatores internos e externos ao planeta Terra através de dados medidos e estimados nas

estações climatológicas do estado do Rio Grande do Sul numa tentativa de extrapolar estas conclusões para outras regiões do planeta. Para isto procurou-se:

a) analisar o comportamento da sazonalidade na insolação, radiação solar e velocidade média do vento; a frequência, fase, potência e ciclo da insolação e radiação solar através de amostras em séries temporais realizadas no domínio do tempo, por meio das funções de autocorrelações, e da frequência, por meio da análise espectral;

b) verificar e discutir o fenômeno do escurecimento global no planeta tomando como base dados do estado do Rio Grande do Sul e o impacto na geração de potência elétrica, sendo este o primeiro estudo a ser realizado relacionado ao estudo do fenômeno “global dimming”;

c) propor uma metodologia para previsibilidade das intensidades climáticas no potencial solar eólico válido para qualquer área do planeta;

d) melhorar a acurácia dos dados climatológicos por um tratamento estatístico, pela escassez de informações que se dispõe nos dados coletados ao longo dos anos nas estações meteorológicas, possibilitando elaborar sugestões e informações para diferentes áreas que tratem sobre estudos energéticos sustentáveis e climáticos;

e) estruturar um banco de dados modelados com preenchimento de lacunas por séries temporais para radiação solar, insolação, temperaturas médias, máximas e mínimas, e velocidade máxima e média dos ventos uma vez que até o momento não existem informações delineadas por modelos de previsão para o preenchimento das lacunas em séries históricas;

f) estimar os ciclos para os elementos climáticos insolação e radiação objetivando verificar as potências máxima e mínima no período e suas influências nas medições convencionais quando não se leva em conta tais variações periódicas. Os métodos atuais não levam em consideração esta proposta, nem a influência dos ciclos nas medidas realizadas e nem as consequências destas diferenças que podem superestimar ou subestimar os valores medidos resultando em quantidades diferentes de potência gerada por metro quadrado.

1.3 Estrutura desta tese

A pesquisa motivo desta tese foi estruturada em sete capítulos. O primeiro apresenta uma introdução sobre o tema da pesquisa e a contribuição original do trabalho, mostrando o objetivo geral e a estrutura para atingi-lo.

No segundo capítulo, faz-se uma revisão de literatura. Na qual se busca por meio de citações de autores da área em estudo, indicar a aplicabilidade e a fundamentação teórica para o desenvolvimento da pesquisa no que se refere aos elementos que influenciam o clima e suas consequências para a humanidade de forma geral e, em particular, para a geração de energia elétrica. Procurou-se descrever as principais causas de poluição, tanto de origem antrópica como naturais, que contribuíssem com informações para um discernimento melhor entre os efeitos das transformações antrópicas e as variações cíclicas com causas no sistema solar.

No capítulo terceiro, tratam-se alguns conceitos básicos das séries temporais, da classe geral dos modelos ARIMA, X11 e X11-ARIMA no domínio do tempo, o comportamento da sazonalidade e sua tendência com o objetivo à previsão. A metodologia para verificar possíveis quebras estruturais em série eólicas e a análise espectral no domínio da frequência, pelo método de Fourier na detecção de existência de ciclos na série, também são demonstrados. São descritos a estruturação do banco de informações e o preenchimento dos dados faltantes por meio de técnicas de previsões que serviu de consulta para elaboração desta tese. As principais ferramentas teorias de matemática e estatísticas no sentido de se obter estes resultados.

No capítulo quarto, são apresentadas as teorias aplicadas ao clima na obtenção das componentes, sazonalidade, tendência e ciclo nas séries e possíveis quebras estruturais na sequência dos dados e os resultados referentes às análises sobre o escurecimento global com efeitos particulares no estado do Rio Grande do Sul. Estimar previsões e verificar com os dados medidos no capítulo quinto.

No capítulo quinto ocorre à discussão dos resultados obtidos no capítulo quarto referentes às variáveis analisadas. Comparam-se os resultados do capítulo quarto com os dados medidos e verifica-se a evidência de que o escurecimento global pode ter reduzido seus índices no estado do Rio Grande do Sul, assim como

constatado em outras partes do planeta por diferentes estudos científicos. Descrevem-se também quais as prováveis causas desse escurecimento e suas possíveis consequências, principalmente para sua utilização como fonte de geração elétrica e térmica.

No capítulo sexto são apresentadas considerações finais, as principais contribuições desta tese as sugestões para prosseguimento desta pesquisa.

Constam no capítulo sétimo às referências bibliográficas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

É difícil falar em energia sem relacioná-la ao meio ambiente e ao sistema solar, já que qualquer uma de suas formas de transformação exige modificações substanciais no local das instalações, praticamente proporcionais às quantidades de energia a serem geradas (Farret. F. 2010, Houghton et. al (2001). Além disto, as mudanças no potencial eólico e as variações de incidência de radiação solar sobre o sistema gerador de potência elétrica fotovoltaico, de qualquer maneira, está relacionado com as mudanças climáticas, sejam estas provocadas pelo homem ou pela natureza universal em que está incluído o planeta Terra.

Compreender as mudanças climáticas e fazer previsões com séries temporais com modelos matemáticos e estatísticos possibilita um melhor entendimento da estimativa, localização e previsão do potencial elétrico a ser gerado em planejamentos energéticos alternativos.

A seguir, apresenta-se a revisão bibliográfica dos principais temas abordados nesta proposta de tese.

No estudo de caso considerado nesta tese com vista à generalização dos resultados, é utilizado o panorama energético do Rio Grande do Sul com relação à geração solar-eólica de energia elétrica. Também é apresentado o balanço radiativo da atmosfera, as principais causas possíveis de diminuição da radiação solar, as variações climáticas e, conseqüentemente sua influência nas velocidades dos ventos.

2.1 Panorama solar eólico no Estado do Rio Grande do Sul

Nesta seção, é dada ênfase ao estado do Rio Grande do Sul por ser esta a região enfocada como estudo de caso para comprovar a teoria proposta nesta tese.

Quase todas as fontes de energia tais como hidráulica, biomassa, eólica, e energia dos oceanos, são formas indiretas de energia solar além dos combustíveis fósseis. A radiação solar quando usada diretamente como fonte de energia térmica

através de coletores ou concentradores solares, serve para aquecimento dos fluidos no ambiente e para geração de potência mecânica ou elétrica. Outra maneira da utilização da energia solar é a conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio dos efeitos termoelétrico e fotovoltaico sobre determinados materiais em especial os semicondutores (Aneel, Energia Solar 2008).

O Brasil possui fortes motivos para utilizar a energia do Sol já que possui uma extensão territorial privilegiada de incidência dos raios solares principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país. A maior parte do território brasileiro se localiza relativamente próximo da linha do Equador onde não se observa grandes variações na duração solar do dia. Mas, por outro lado, a maioria da população brasileira e das atividades socioeconômicas se concentra em regiões mais afastadas desta linha. No estado do Rio Grande do Sul, a cidade de Porto Alegre a capital mais extrema do Brasil (próxima de 30°S), a duração solar do dia varia de 10h 31min a 13h 47min, aproximadamente, no período compreendido entre 21 de junho a 22 de dezembro, respectivamente (Aneel, Atlas de energia solar 3).

O estado do Rio Grande do Sul terá a mesma taxa de crescimento no consumo final de energia de 2,4 % ao ano, valores previstos para o Brasil no IEO (*International Energy Outlook*, 2010), no período de 2007 a 2035. No cenário mais otimista, conforme valores apurados no BERS (Balanço Energético do RS) o estado do Rio Grande do Sul deverá chegar a uma taxa de crescimento no consumo final de energia de 5% ao ano conforme, Figura 2.1.

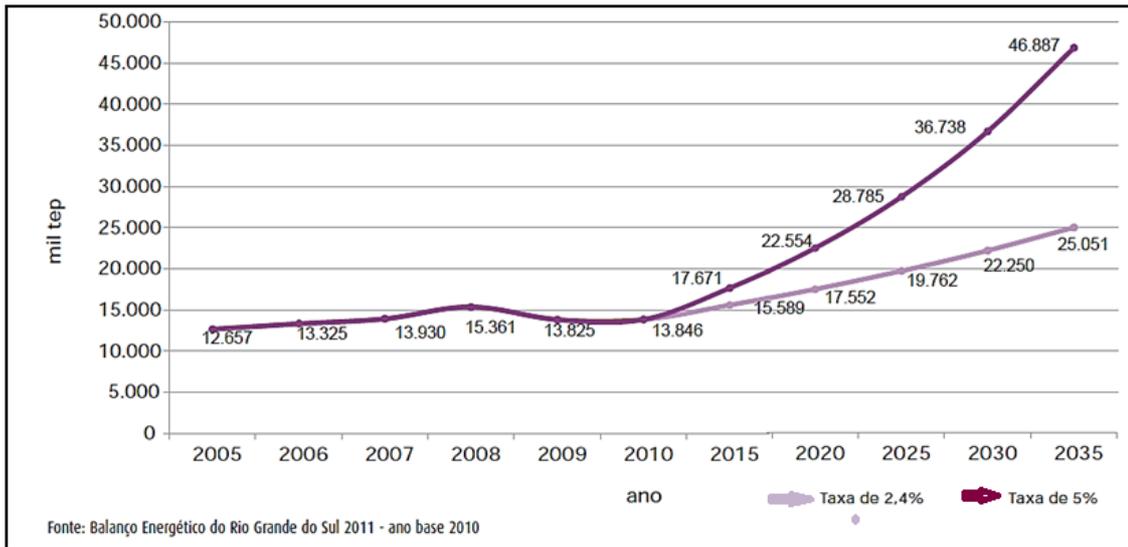


Figura 2.1 – Valores verificados do consumo final de energia no Rio Grande do Sul, período 2005-2010 e projeção de crescimento até 2035

Fonte: BERS, 2011.

Com relação à energia solar, o estado do Rio Grande do Sul possui uma média anual de insolação diária em torno de 6 horas efetiva, isto é seis horas em que o brilho solar está presente podendo ser aproveitado para geração de energia, índice este, superior à média da região norte do Brasil (BERS 2011), ver Figura 2.2. Notas: Supondo a conversão de 15% da energia irradiada para a energia elétrica. Considerando a utilização de 0,01% da área total do Rio Grande do Sul (282.062 km²) com coletores solares. A Figura 2.3, mostra as regiões 1 e 2 da Figura 2.2.

Região	Radiação Solar Global Diária MJ/m ² /dia	Radiação Solar Global Anual MJ/m ² /ano	Radiação Solar Global Anual kWh/m ² /ano	Produção Anual de Energia Elétrica kWh/m ² /ano	Produção Anual de Energia Elétrica MWh/km ² /ano
Região 1	16	5.840	1.621,77	243,27	6.861.586,88
Região 2	14	5.110	1.419,05	212,86	6.003.888,52
Total RS		5.353	1.486,62	222,99	6.289.787,98

Figura 2.2 – Potencial fotovoltaico do Rio Grande do Sul.

Fonte: BERS, 2011.

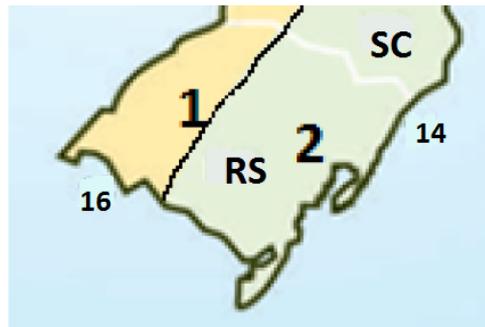


Figura 2.3 – Regiões representando o potencial fotovoltaico da Figura 2.2

Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil, Recife: Editora Universidade da UFPE, 2000.

Em particular, a geração de energia elétrica usando a energia eólica no Rio Grande do Sul teve o seu início com o parque eólico na região de Osório em 2006. O projeto consta de três parques: Osório, Sangradouro e Índios. Os três parques juntos formam o maior parque eólico da América Latina, com potência instalada de 150 MW. No ano de 2011, entraram em operação o parque Cidreira I (70 MW), o parque de Palmares Sul (30 MW) e o Cerro Chato III (32 MW), Figura 2.4.

Local de Implantação	Velocidade do Vento	50m		75m		100m***	
		Potencia*	Fator de Carga	Potencia*	Fator de carga %	Potencia*	Fator de carga
Solo Firme (on shore)	7,0 - 7,5	12.290	>29	42.320	>27		>24
	7,5 - 8,0	2.990	>34	10.120	>32	82.650	>28
	8,0 - 9,0	560	>39	1.990	>37	27.600	>37
Total (on shore)	>7,0	15.840	>29	54.430	29	4.950	>24
Sobre a água (off shore)	7,0 - 7,5	9.220	>30	4.610	>28	115.200	>24
	7,5 - 8,0	8.040	>35	10	>33	1.610	>29
	8,0 - 9,0	1.260	>39	4.920	>37	10.810	>35
Total (off shore)	>7	18.520	>30	9.540	>30	7.320	>24
Total Global	>7	34.360	>30	63.970	>30	134.940.119.740	>24

* Para a hipótese do uso de 20% das áreas disponíveis para instalação dos parques Eólicos.

** Hipótese formulada sobre as lagoas Patos, Mirim e Mangueira, com áreas extensas e pequenas profundidades.

*** Valores Estimados

Figura 2.4 – Potencial eólico do Rio Grande do Sul.

Fonte: BERS, 2011 – Atlas Eólico do Rio Grande do Sul e Balanço Energético do Rio Grande do Sul 2001-2004.

Observa-se que o estado do Rio Grande do Sul apresenta excelentes condições tanto para geração de energia elétrica como para o aproveitamento térmico utilizando as fontes naturais de radiação solar e eólica.

2.2 Radiação solar

O Sol é a estrela mais próxima do nosso sistema planetário, sendo a principal fonte de energia que impulsiona o ciclo de vida da Terra (Baldocchi, 2003) e mantém a superfície terrestre a uma temperatura confortável. Sua idade é estimada de 4,5 bilhões de anos com aproximadamente 90% na sua composição de hidrogênio e aproximadamente 10% de hélio e de 0,1% de elementos mais pesados como carbono, nitrogênio e oxigênio. Sua temperatura na superfície é de 5780 K, sendo que no núcleo alcança milhões de graus, fazendo com que os gases sejam quase totalmente ionizados, formando um plasma. Esta energia recebida pela terra é a radiação solar na forma de ondas eletromagnéticas, sendo o fator mais importante para o desenvolvimento dos processos físicos que influenciam as mudanças climáticas. O Sol consiste em uma fonte primária de energia disponível no globo terrestre e responsável por todos os processos atmosféricos (Tubelis e Nascimento, 1992). A quantidade de energia solar absorvida na superfície depende da irradiância que penetra no sistema e das propriedades reflexivas da Terra. Ocorrendo qualquer mudança nestes parâmetros, a distribuição da temperatura do sistema atmosfera-superfície tende a se ajustar para retornar ao equilíbrio (Pidwirny, 2006). Este balanço de energia determina a temperatura de equilíbrio global média da Terra, ocorrendo entre a energia adquirida pela absorção de radiação e a perda por emissão de radiação infravermelha térmica para o espaço. Assim, o sistema Terra-atmosfera está constantemente absorvendo radiação solar e emitindo-a para o espaço, sendo que as taxas de absorção e emissão são aproximadamente iguais (Lutgens, Tarbuck, 1989).

A distância média do Sol em relação à Terra é de 149,6 milhões de quilômetros, variando em relação ao movimento de translação da Terra (movimento elíptico que o planeta realiza em torno do Sol) e à forma geoide deste astro. De acordo com as leis clássicas da dinâmica e da gravidade Newtoniana (Kreider e

Kreith, 1979) e como afirma a primeira lei de Kepler (publicada em 1609), a órbita que a Terra descreve em torno do Sol é uma elipse, situando-se o Sol em um ponto dessa elipse conhecido como foco. O plano elíptico se apresenta muito próxima da geometria circular devido ao valor da excentricidade (ϵ - medida do desvio da elipse em relação a um círculo) estimada em 0,0167 (Ferreira Máximo e Almeida Guilherme, 2004), conforme pode ser visualizado na Figura 2.5.

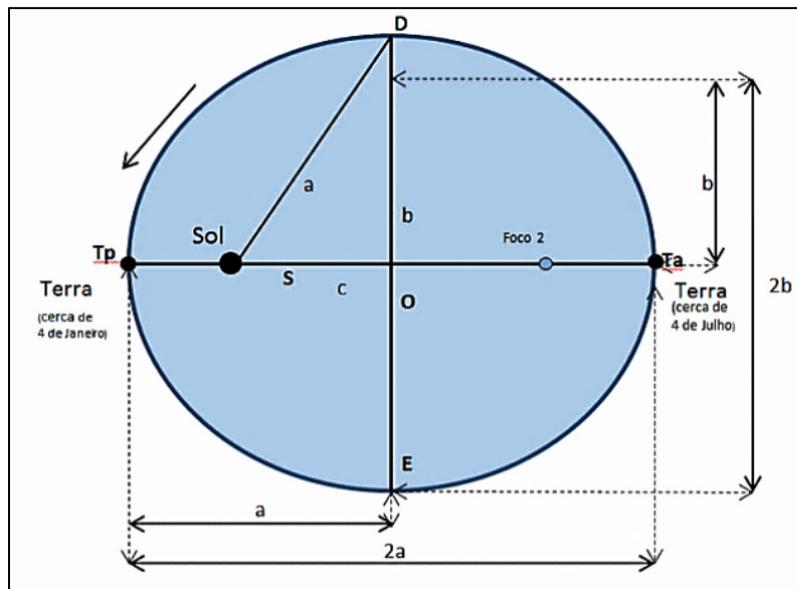


Figura 2.5 – T_p e T_a representam a posição da Terra no periélio e no afélio, respectivamente

A órbita da Terra tem:

$a = 149,598$ milhões de quilômetros

$b = 149,572$ milhões de quilômetros

$c = 2,498$ milhões de quilômetros

Uma primeira manifestação cíclica das condições meteorológicas são as alternâncias do dia pela noite. Uma segunda manifestação cíclica são as estações do ano. As estações do ano ocorrem devido ao movimento da translação e da inclinação do eixo de rotação da Terra em relação à linha perpendicular do plano elíptico, com o valor do ângulo de inclinação de $23^\circ 27'$ chamada de declinação

solar. Conforme o movimento de translação e rotação da Terra, estabelece-se um plano que recebe os raios do Sol com ângulos de incidência diferentes segundo a hora do dia e a época do ano que se modificam com a orientação e inclinação do plano. Quando as posições do Sol têm inclinação igual ao valor extremo de $23^{\circ} 27'$, são denominadas de solstícios. As posições nulas são denominadas de equinócio, isto é, quando o sol, em seu movimento aparente, posiciona-se sobre o plano do equador terrestre. Isto acontece duas vezes ao ano, uma em 20 e 21 de março e a outra em 22 e 23 de setembro. Tal evento acontece quando os dois hemisférios se posicionam igualmente em relação ao Sol e os hemisférios norte e sul recebem a mesma quantidade de luz, fazendo com que tenham a mesma duração o dia e a noite. Assim, cada solstício ou equinócio define o início de uma estação do ano, ver Figura 2.6.

Uma terceira manifestação cíclica, entre outras, é a precessão do eixo da Terra. Um movimento de rotação inclinado, o que provoca a cada 25.770 anos, uma volta completa em torno do eixo de sua elíptica.

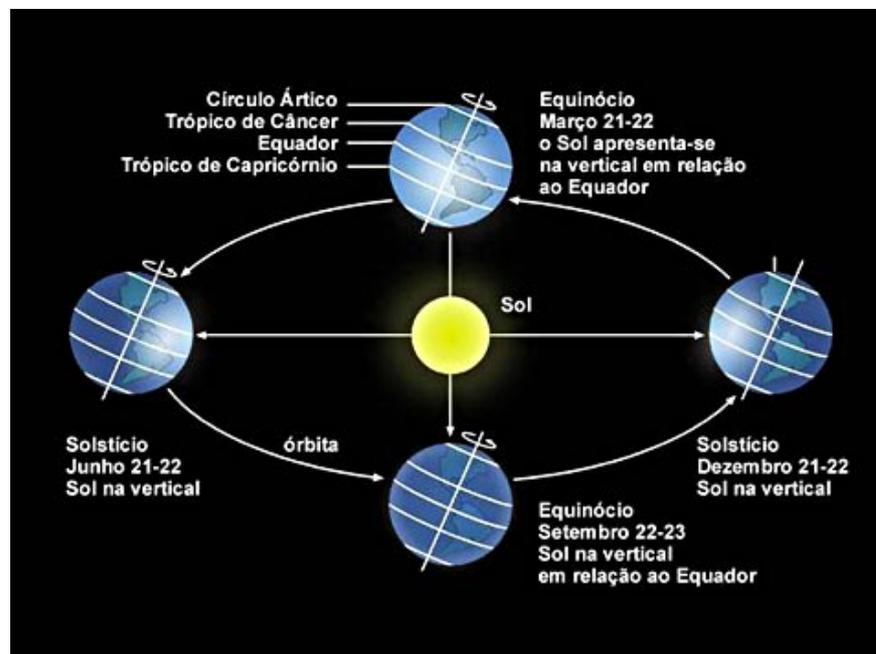


Figura 2.6 – As estações do ano

Fonte: [http://www.infopedia.pt/\\$solsticios-e-equinocios](http://www.infopedia.pt/$solsticios-e-equinocios).

A radiação eletromagnética possui importante atuação na transferência de calor entre a superfície da terra e a atmosfera, e entre as diferentes camadas da atmosfera. A Figura 2.7 mostra as diferentes formas de radiação, caracterizada pelo comprimento de onda que compõe o espectro eletromagnético. A faixa espectral chamada radiação visível, se localiza entre 0,38 e 0,78 μm . A irradiação entre 0,78 e aproximadamente 1,103 μm é a faixa espectral do infravermelho que se divide infravermelho próximo e infravermelho térmico. Um comprimento de ondas maiores que 1,103 μm são as ondas de radar e rádio e para os comprimentos de onda menores do que a da luz visível é denominada de ultravioletas, raios x e raios gamas. A maior parte da radiação enviada pelo Sol está entre os comprimentos de onda 0,1 e 4,0 μm . Correspondendo às bandas do ultravioleta, do visível e do infravermelho próximo (Brutsaert, 1982). A energia radiante do Sol, concentrada na parte visível do espectro ou próxima dele, é da ordem de 43% de luz visível, 49% de infravermelho próximo e 7% de ultravioleta em relação ao total. Uma vez que esta energia é absorvida por um corpo, isto resulta num aumento do seu movimento molecular e conseqüentemente de sua temperatura (Lutgens, Tarbuck, 1989).

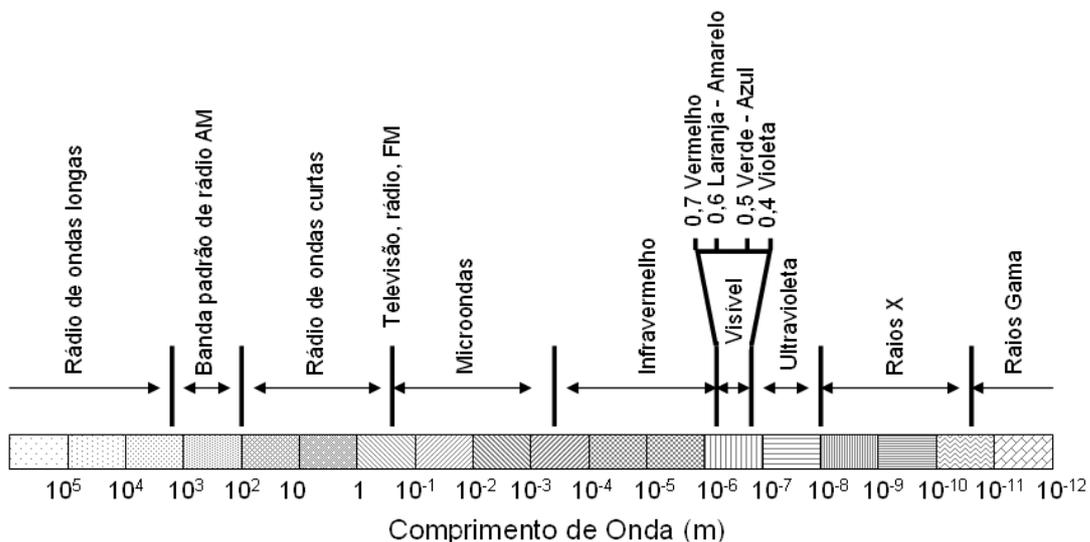


Figura 2.7 – Espectro eletromagnético

Fonte: Lutgens et. al, 2004.

2.2.1 Radiação Solar Direta e Difusa

Quando a atmosfera não oferece obstáculos à passagem da radiação, a maior parte que chega à superfície terrestre é a radiação denominada direta. Ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar é afetada por processos seletivos de reflexão, difusão e absorção (Tubelis e Nascimento, 1992). Parte desta radiação (a radiação direta) atinge diretamente a superfície e a outra parte atinge a mesma superfície somando-se a anterior, após sofrer o processo de difusão. Esses dois fluxos de energia, que chegam juntos, representam o total de radiação solar que chega à superfície terrestre denominada de radiação global. Essa radiação solar global que alcança a superfície é constituída pela radiação solar difusa e direta (Correia, 2000). Na presença de nebulosidade, a radiação solar global pode aumentar ou diminuir, pois a nebulosidade e a elevação solar são os fatores de primeira ordem na determinação da variação da irradiação solar à superfície (Kondratyev.,1969). Em dias límpidos, para um mesmo local e época do ano, predomina a fração direta. Em dias encobertos predomina a fração difusa da radiação solar (Buriollet al., 1995).

Analisando a variação da radiação global à superfície, Ohmura (2006) observou uma quarta manifestação cíclica do universo sobre a Terra, que é a radiação global que diminuiu num ritmo médio de $0,7 \text{ Wm}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ entre 1960 e 1990. Nos anos seguintes esta manifestação apresentou um aumento médio de $0,7 \text{ Wm}^{-2} \text{ ano}^{-1}$. Ohmura comenta ainda que as estações da região polar, que estão longe das fontes de aerossol, também mostram esse padrão de variação (Ohmura, 2006).

Quando a energia recebida do Sol tem sua trajetória alterada através da reflexão e espalhamento pela atmosfera, é dita difusa. Esta radiação é função da latitude local, ângulo de elevação solar, índice de turbidez atmosférica, quantidade de água presente na atmosfera e nebulosidade, que contribuem para a quantidade da radiação solar difusa à superfície terrestre (Villa Nova e Salati, 1997). A Figura 2.8, mostra o espectro de radiação eletromagnético da radiação solar que atinge o topo da atmosfera e a superfície da Terra, indicando as absorções dos diversos componentes no processo de interação.

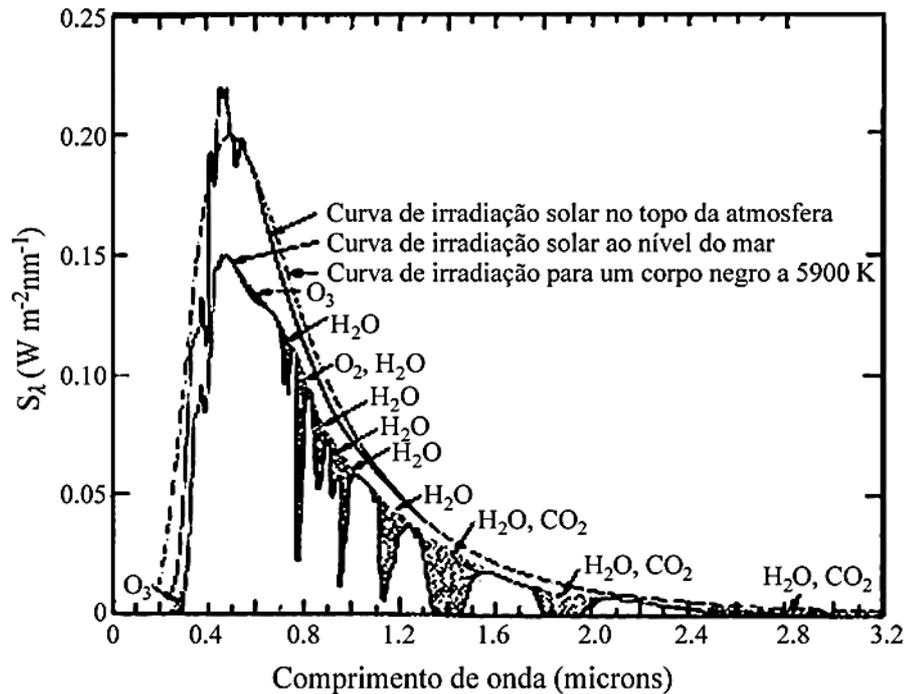


Figura 2.8 – Espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera e na superfície da Terra

Fonte: Modificada de Martins, 2001.

As partículas suspensas na atmosfera podem produzir espalhamento de partículas de tamanho muito pequeno comparado com o comprimento da onda incidente e denominado Rayleigh. Por outro lado, quando as dimensões das partículas são de tamanho igual ou maior que o comprimento da onda incidente, o fenômeno é chamado de onda Mie. Segundo Sem e Tam, (2001) a radiação solar difusa em um dia completamente nublado, representa de 10 a 29% da irradiação solar global, podendo chegar a 100% em um dia completamente encoberto. Para Duchon e O'Malley (1999) a radiação solar difusa em um dia de céu limpo, à superfície terrestre, é aproximadamente 15% da radiação solar global.

O espalhamento pode se dar por difração, ou seja, ondas que não entram em contato com a partícula, mas que têm alteradas a sua direção de propagação devido à presença destas partículas, ou por reflexão na superfície da esfera terrestre. Elas também são desviadas por refração através das ondas que surgem ao penetrarem

na esfera terrestre e ao serem parcialmente absorvidas, propagando-se em diferentes direções.

A medida da radiação solar é realizada com aparelhos como o pireliômetro, instrumentos destinados a medir a irradiância solar direta. Nas medições da radiação solar global, são utilizados equipamentos como o piranômetro e o actinógrafo. As medições da componente difusa da irradiação global são feitas com os piranômetros ou actinógrafos sombreados por uma banda ou disco, de forma a não incidir irradiação solar direta. Segundo Varejão-Silva, (2006), por serem equipamentos de alto custo de aquisição e manutenção, não eram disponibilizados em muitas estações meteorológicas que predominaram no Brasil até o final de 1990. Não raramente, as aquisições de uma série histórica longa de radiação solar é estimada através de variáveis meteorológicas de mais fácil medição, em equipamentos que funcionaram nas estações meteorológicas por período longo de tempo. Como, por exemplo, os heliógrafos, aparelhos destinados a medir o brilho solar no intervalo de tempo entre o nascer e o pôr do sol sem nuvens que possam ocultá-lo.

Para se estimar dados da energia solar incidente na superfície da Terra, existem dois processos baseados em medidas meteorológicas. Os que necessitam da utilização de modelos para serem desenvolvidos, para o qual os dados registrados em estações terrestres são essenciais, e aqueles que utilizam informações de dados vindos de imagens de satélites geoestacionários. Os dados mais disponíveis na maioria das estações meteorológicas do mundo são os dados do brilho solar comumente denominados na literatura de insolação. Segundo Aguiar, (1996), a fração do número de horas de insolação que chega à superfície terrestre é melhor relacionada com a irradiação incidente em médias mensais. Como a escala de medição da insolação é quantitativa, ela é mais apropriada para estimar a irradiação solar.

2.2.2 Balanço da radiação solar e gases atmosféricos

A composição atmosférica da Terra é constituída principalmente por concentrações moleculares de nitrogênio (78%) e o oxigênio (21%) de uma forma

praticamente constante e de outros gases com concentração variável. Em conjunto com o argônio acima de 60 km, essa composição gasosa permanente, representa 99,99 % dos gases. Também estão contidas na camada atmosférica inúmeras partículas sólidas e líquidas variando no espaço de tempo, entre elas, os cristais de gelo, aerossóis atmosféricos e água em forma de gotículas que desempenham importante função com relação à absorção e ao espalhamento da irradiação solar em concentrações variáveis tanto no espaço quanto no tempo (Yamasoe, 2006). A concentração de outros gases como dióxido de carbono, ozônio, monóxido de carbono e metano, que constituem a atmosfera, pode ser altamente variável e depende da atividade humana da Terra. A presença anormal de poeira eventualmente pode causar mudanças no comportamento radiativo da atmosfera (Moura, 2001).

A constante solar é definida como a irradiância sobre uma superfície normal aos raios solares, à distância média Terra-Sol (Vianello e Alves, 2000). O fluxo total da irradiação solar extraterrestre é medido fora da atmosfera terrestre e integrado sob todo o espectro solar. O valor adotado pelo WRC (*World Radiation Center*) é de $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, com erro estimado de 1 % (Duffie e Beckman, 1991).

A radiação que chega ao topo da atmosfera é distribuída sobre a superfície terrestre e o espalhamento pela atmosfera terrestre é maior quanto menor for o comprimento de onda de radiação. Segundo os dados de Kiehl e Trenberth (1997), $107 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, ou seja, cerca de 31 % da energia solar que chega ao topo da atmosfera da Terra na forma de ondas curtas do espectro eletromagnético é refletida de volta para o espaço pelas nuvens, aerossóis, moléculas atmosféricas e superfície. Apenas $235 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ é absorvido pelo sistema terrestre. Parte da radiação incidente na atmosfera $67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ($\pm 20\%$) é absorvida por ela e $168 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ pela superfície que é utilizada para aquecê-la, (Figura 2.9). Isto mostra que a radiação total interceptada pela Terra é a constante solar multiplicada pela área da secção transversal da Terra que, quando dividida pela área da superfície terrestre, fornecerá a quantidade de radiação solar recebida em média, por um metro quadrado de superfície da Terra, um valor aproximadamente igual a $342 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, ou seja, um quarto do valor da constante solar. Como comentado antes, a atmosfera absorve cerca de $67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ e reflete $107 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ o que resulta em média $168 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ($\pm 49\%$) atingindo a superfície da Terra.

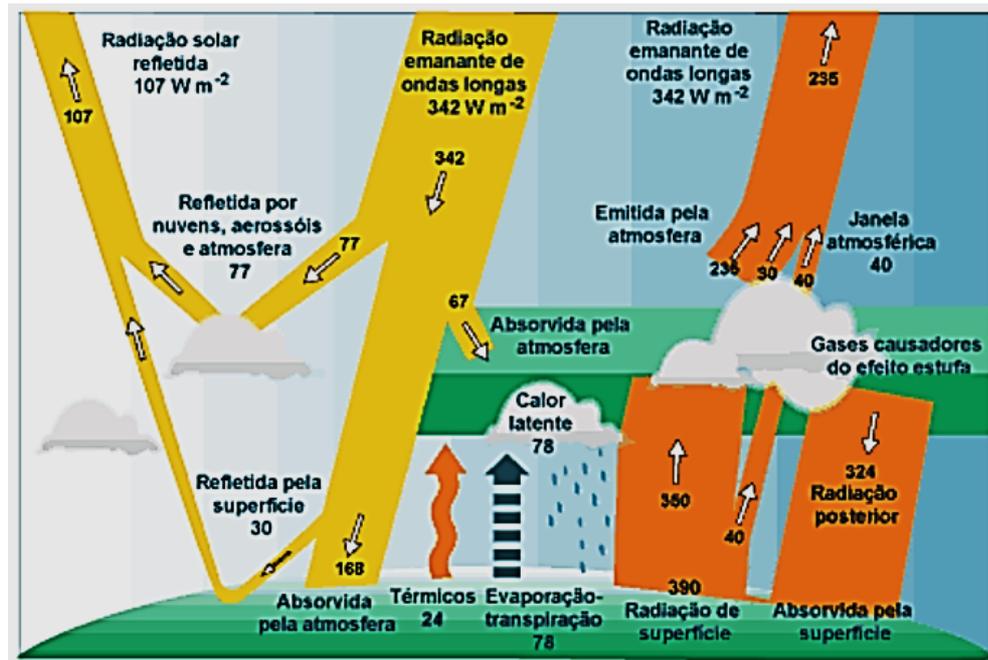


Figura 2.9 – Equilíbrio radiativo terrestre

Fonte: Extraída do artigo Mudanças Climática Global Conceitos e Aplicações por Paulo Artaxo – USP.

Na Figura 2.9 a radiação solar está representada em amarelo e em laranja a radiação de onda longa. A radiação de onda longa consiste da radiação emitida pela superfície terrestre. Segundo Moura (2001), parte da radiação emitida pela atmosfera e nuvens na faixa do infravermelho, é denominada radiação atmosférica. A emissão de energia radiante situa-se na faixa do infravermelho, tanto pela superfície como pela atmosfera sendo que suas temperaturas são mais baixas já que os elementos sobre a Terra possuem temperaturas mais baixas que a do Sol. O comprimento da onda emitida pela radiação desses materiais são maiores que o da radiação global. O saldo de radiação de ondas longas ou infravermelha é a diferença entre a radiação de ondas longas que chega a superfície, proveniente da atmosfera, e aquela por ela emitida para atmosfera. Segundo Brien (1963), a maior parte da absorção da radiação solar que ocorre nos comprimentos de onda infravermelho é causada pelo vapor d'água que desempenha o papel de um agente termorregulador da atmosfera ao absorver a radiação solar infravermelha (Vianello e Alves, 1991).

Se o fluxo radiativo médio anual e global no topo da atmosfera for igual a zero, eles estão em equilíbrio. As temperaturas da superfície e atmosférica precisam

de um tempo mínimo para se reajustar e estabelecer um novo equilíbrio caso o equilíbrio do fluxo radiativo no topo da atmosfera seja perturbado.

O conceito de forçante radiativo tem sido largamente utilizado no meio científico. Trata-se de um método para analisar a resposta da temperatura na superfície da Terra pela imposição de perturbações radiativas na atmosfera. Assim, se a forçante radiativa é positiva, a energia do sistema aumenta, provocando seu aquecimento, até que este retorne ao seu estado de equilíbrio. Mas, se a forçante é negativa, a energia do sistema diminui, causando seu resfriamento até retornar a um novo estado de equilíbrio (Haigh, 2007). As forçantes radiativas climáticas são tipos de energia capazes de impor mudanças no balanço de energia planetária e são medidas em $W \cdot m^{-2}$. Podem ser de origem natural, como mudanças na irradiância solar, ou antrópica como o aumento de CO_2 atmosférico, ou por outros mecanismos.

2.2.3 Estrutura vertical da atmosfera

A estrutura vertical da atmosfera terrestre é descrita por um modelo padrão, adotado em 1976 pela *U.S. Standard Atmospheres* (IQBAL, 1983). O perfil da estrutura vertical e de acordo com nomenclatura padrão pela *International Union of Geodesy and Geophysics*, 1960, se divide em troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera (Liou, 1980). Para cada camada existem variações de temperatura enquanto a pressão e a densidade decrescem continuamente, Figura 2.10.

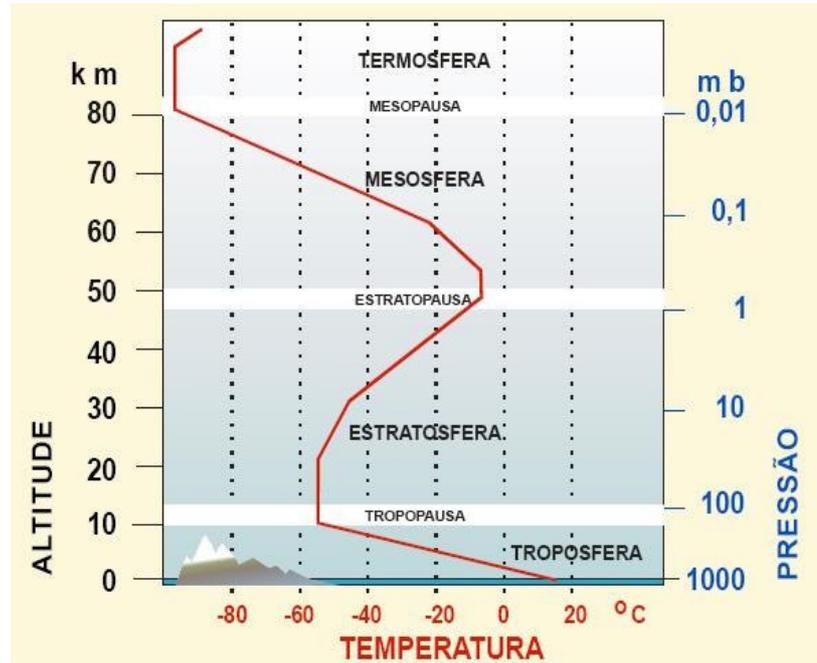


Figura 2.10 – Estrutura vertical da atmosfera terrestre até 110 km de altura

Fonte: Vianello e Alves, 1991.

Segundo alguns autores, entre eles Vianello e Alves (1991), Varejão-Silva (2001), Zuñiga (1985), cada camada apresenta suas características próprias. A troposfera é a camada de ar que se encontra em contato com as superfícies da Terra e dos mares sendo uma camada de movimento e mistura, contém em torno de 75% da massa total da atmosfera. A troposfera caracteriza-se por um gradiente médio de temperatura na ordem de $6,5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ em relação à altitude podendo, no entanto, sob certas condições haver inversão do gradiente, com a temperatura do ar aumentando com a altitude. A troposfera apresenta uma variação em função da latitude na sua espessura de 10 km nas regiões polares e 15 km no equador e a velocidade dos ventos nesta camada normalmente aumenta com a altura devido ao efeito da fricção com a superfície do planeta. Vapores de água, nuvens, precipitação e ventos fazem parte desta camada. Tal camada é a mais importante para a vida em suas diferentes formas afetando todos os seres vivos tanto pela composição química quanto pela dinâmica de movimento e mistura.

A estratosfera se caracteriza por uma camada isotérmica que se estende desde a tropopausa (topo da atmosfera) até uma altura de 50 km. Nesta camada se

observa um acréscimo de temperatura com a altitude até a estratopausa alcançando um máximo em torno de 0°C no seu lado superior. Um dos principais constituintes da atmosfera é o ozônio O₃, encontrado em maior concentração na estratosfera e estratopausa. Nesta camada os ventos alcançam velocidades maiores que 100 km·h⁻¹.

A mesosfera é a região acima da estratopausa, onde a temperatura decresce rapidamente com a altitude. Nesta região são importantes os efeitos fotoquímicos sendo que as reações químicas que afetam os constituintes do ar determinam importantes modificações no comportamento da atmosfera. No limite superior a temperatura alcança valores próximos a -95°C. As camadas tropopausa, estratopausa e mesopausa são camadas de transição onde não há variação de temperaturas.

A composição da atmosfera é praticamente constante até a altitude de 80 km, com exceção do vapor d'água e do dióxido de carbono, (CO₂) podendo variar sua concentração, nas proximidades da superfície terrestre, Figura 2.11.

Constituinte	Fração molar (% do volume)	Massa molecular (g mol ⁻¹)
Nitrogênio (N ₂)	78,084	28,013
Oxigênio (O ₂)	20,946	31,999
Argônio (A)	0,934	39,948
Dióxido de carbono (CO ₂)	0,031	44,010
Neônio (Ne)	1,8·10 ⁻³	20,183
Hélio (He)	5,24·10 ⁻⁴	4,003
Criptônio (Kr)	1,5·10 ⁻⁴	83,800
Hidrogênio (H ₂)	5·10 ⁻⁵	2,016
Xenônio (Xe)	8·10 ⁻⁶	131,300
Ozônio (O ₃)	1·10 ⁻⁶	47,998
Radônio (Rn)	6·10 ⁻¹⁸	222
Massa molecular média (aparente)		28,964

Figura 2.11 – Composição do ar seco até 25 km de altitude

Fonte: Varejão-Silva, 2001.

2.3 Estimativa da radiação solar a partir do brilho solar

Quando não se dispõe de informações sobre a radiação solar global incidindo em uma superfície em um determinado local, pode-se estimar a densidade de fluxo de radiação solar global para uma determinada localidade de uma região. Isto pode ser feito quando se dispõe de dados sobre a insolação (brilho solar), através da equação de Angström (2.1), mais tarde modificada por Prèscott. As informações sobre o brilho solar, geralmente, estão disponíveis na maioria das estações meteorológicas.

A série de dados mensais sobre a densidade de fluxo de radiação solar global recebida em uma superfície horizontal ao nível do solo, num dia qualquer ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$), pode ser estimada pela equação de Ångstrom-Prèscott que propõe um modelo empírico (Vianello e Alvez, 2004) como segue.

$$R_g = R_a \cdot [b_0 + b_1 \cdot \left(\frac{n}{N}\right)] \quad (2.1)$$

onde:

R_g é a densidade de fluxo de radiação solar global recebida em uma superfície horizontal ao nível do solo em ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$)

R_a é a densidade de fluxo de radiação solar recebida no topo da atmosfera ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$)

b_0 e b_1 são os coeficientes empíricos estimados através de regressão linear (adimensionais), n o número médio de horas de brilho solar (insolação), em ($\text{h}\cdot\text{dia}^{-1}$)

N é a duração do período diurno ($\text{h}\cdot\text{dia}^{-1}$).

Os coeficientes b_0 e b_1 da equação de regressão linear são influenciados conforme a região climática por fatores como latitude, altitude, umidade do ar, nebulosidade, tipos das nuvens predominantes, variando mensalmente (Martinez-Lozano et. al, 1984). Quando os valores de b_0 e b_1 são determinados para cada região climática ou localidade a equação de Ångstrom-Prèscott, torna-se mais precisa.

Berlato (1971) estimou equações para o cálculo da radiação solar global média mensal para 17 municípios do estado do Rio Grande Sul. Estafanelo et. al. (1990) estimaram a radiação solar global incidente a partir do brilho solar para a região central do estado do Rio Grande do Sul. Segundo Fontana, Oliveira (1996) fizeram estudos através de equações para estimar a radiação solar global a partir de informações sobre o brilho solar em nível decendial, realizados no período de 1980 a 1990 em vinte locais do estado. Estes trabalhos realizados, não somente no Estado do Rio Grande do Sul, mas ao redor do globo terrestre, demonstram que a equação de Ångstrom fornece uma boa estimativa da radiação solar global.

2.4 Variabilidade climática

O planeta Terra vive em constante alteração climática, ocorrendo em escalas temporais de meses, anos ou talvez muitos milênios. As causas naturais que alteram o clima estão associadas às variações na quantidade de radiação solar incidente na Terra, erupções vulcânicas que injetam gases e aerossóis na atmosfera, variações nas correntes oceânicas e variações na circulação da atmosfera, entre outras.

O aumento na concentração de gases de efeito estufa e aerossóis na atmosfera e em conjunto com as profundas alterações no uso do solo evidenciam que as mudanças ambientais observadas nos últimos 100 anos são resultados de uma complexa interação entre ações humanas e causas naturais. Com base em dados científicos de credibilidade e de qualidade consolidada, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) considera que a ação do homem na variação das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera e do clima na Terra é sem dúvida evidente.

A Figura 2.12 mostra a importância da forçante antropogênica nos valores da temperatura do planeta nos últimos 100 anos. A nuvem vermelha representa as simulações de 14 modelos matemáticos que considera ambas forçantes, as naturais e as antropogênicas e, em azul, os processos naturais na variação da temperatura do planeta. Dependendo do cenário de emissão e das alterações importantes no regime e distribuição das chuvas, estas simulações projetam para o século 21 um aumento da ordem de 3 a 4°C na temperatura média da superfície terrestre.

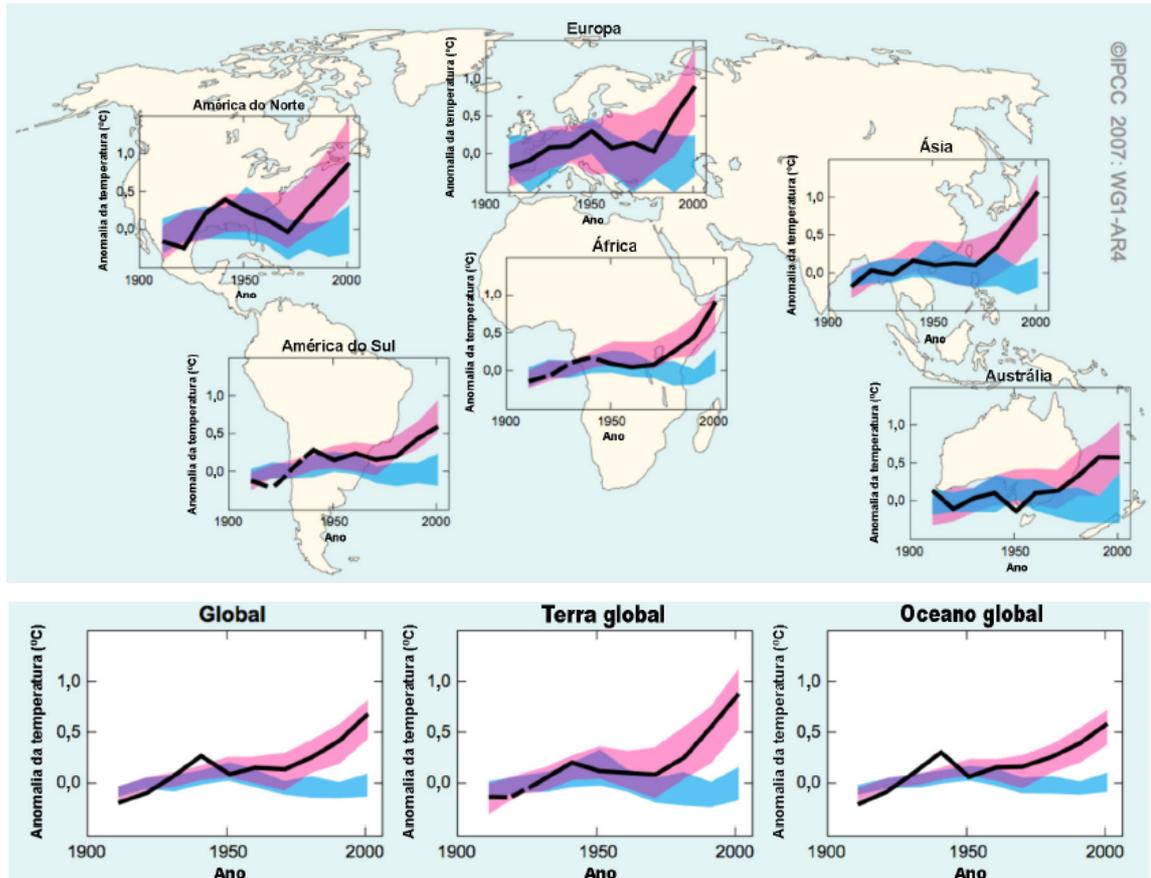


Figura 2.12 – Temperatura observada na superfície da Terra, em escala continental e global, comparadas com resultados de simulações matemáticas (azul e vermelha). As médias decenais de temperatura são relativas à média apresentada para o período de 1906 a 2005 (linha preta)

Fonte: IPCC WGI SPM, 2007.

Segundo Arnell, (2004) e Garcia Vargas (1997), a diminuição drástica na precipitação da região do semiárido brasileiro e aumento na frequência de eventos intensos e de precipitação para a região sul do país trazem incertezas quanto à disponibilidade de água para agricultura e população bem como para a geração de energia elétrica e capacidade estrutural das hidroelétricas a eventos de grandes precipitações. Para o sul da América do Sul, o IPCC (2001) mostra tendências de aquecimento de 0,6 a 0,8°C no período de 1976 a 2000 e de 0,4 a 0,6°C no período de 1940 a 1975. O relatório do IPCC (2007) mostra tendências de aquecimento de 0,5°C no período de 1950 a 2000.

Para as 27 estações no sul do Brasil, entre 1940 e 2002, Marengo e Camargo (2008) constataram tendências de aquecimento na maioria das estações das temperaturas mínimas e máximas e nas amplitudes diurnas, em torno de 0,5 a 0,8°C por decênio nas temperaturas mínimas e de 0,4°C por decênio nas máximas. Também constataram um aumento na frequência dos dias quentes no verão e no inverno.

A seguir, comentam-se os principais fenômenos cíclicos que podem contribuir para as mudanças climáticas e as possíveis implicações na geração de energia elétrica em sistemas alternativos como o solar-eólico.

2.4.1 Os aerossóis e nebulosidade

As forçantes radiativas podem ser de origem antrópica ou natural. Em geral, os aerossóis são de origem antrópica com exceção dos de origem vulcânica ou das poeiras do solo. Os de origem antrópica podem ser emitidos através do desmatamento florestal e da queima de biomassa, emissões industriais, entre outros. Inclui-se entre os principais vetores da poluição e da radiatividade atmosféricas, os aerossóis que participam em vários fenômenos naturais abrangendo o balanço radiativo da atmosfera, a formação de nuvens e de precipitação, a visibilidade, as trocas térmicas entre o oceano e a troposfera e as eventuais modificações na camada de ozônio (Alves C., 2005).

As forçantes radiativas representadas pelas partículas em suspensão influenciam fortemente o balanço radiativo da atmosfera e do clima, a química da atmosfera e a visibilidade, desde a escala local até as escalas regional e global (Artaxo et al., 2006). O efeito direto ocorre a partir da absorção ou espalhamento de radiação solar pelas partículas suspensas na atmosfera sendo que, parte da radiação é refletida de volta para o espaço a partir do espalhamento, o que resulta na redução da quantidade de radiação disponível no sistema. Já o efeito indireto é o resultado das partículas de aerossol atuando como núcleos de condensação das nuvens alterando desta forma, suas propriedades físicas e óticas, Figura 2.13.

Segundo Liepert e Lukla (1997), é esperada uma redução da radiação solar que chega à superfície pela presença de aerossóis visto que a radiação solar pode

sofrer influências diretas e indiretas com a concentração de aerossóis. A principal causa para diminuição da radiação solar para Liang e Xia, (2005) é a variabilidade da carga dos aerossóis na atmosfera.

As forçantes de origem natural podem ser de origem solar ou vulcânicas e elas podem contribuir fortemente para as mudanças climáticas do planeta. As forçantes de origem vulcânica como os aerossóis vulcânicos são de origens transitórias e ocorrem quando existem erupções. Todavia, a quantidade de material que é injetado na atmosfera mesmo sendo transitório, pode trazer mudanças significativas no clima da Terra (Shindell et al., 2004). Calcula-se que as erupções vulcânicas de décadas passadas tenham provocado um arrefecimento global de 0,1 -0,5°C (Salstein D., 1995).

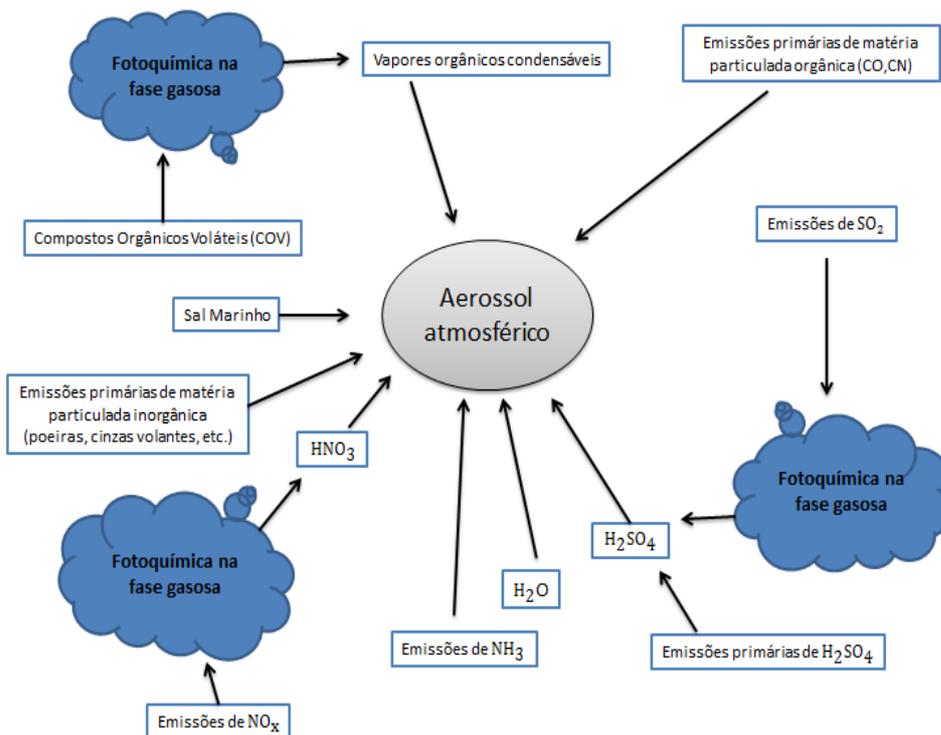


Figura 2.13 – Representação dos mecanismos de formação do aerossol atmosférico

Fonte: Alves C., 2005.

As forçantes de origem solar relacionam-se com qualquer efeito da atividade solar que atinja a atmosfera terrestre. A atividade solar em sua superfície pode gerar

partículas energéticas que eventualmente se deslocam em direção a Terra. Estas partículas energéticas podem causar mudanças significativas na dinâmica da estratosfera e da troposfera, cobertura de nuvens e fluxo líquido radiativo (Marsh e Svensmark, 2000).

A nebulosidade é vista como a cobertura de nuvens em um determinado local atuando como uma barreira para a radiação solar que chega à atmosfera e conseqüentemente influenciando no aproveitamento desta energia para geração fotovoltaica e para aquecimento em coletores solares. Segundo, Lestrade et al, (1990), num céu sem a presença de nuvens, a radiação direta corresponde a algo entre 60 e 87% da radiação global e seu albedo planetário é em torno de 30%, sendo que 50% são devido às nuvens. Sem a presença de nuvens na atmosfera, o albedo da Terra apresentaria um albedo médio de mais 15% elevando-o para 30%.

As nuvens refletem e transmitem a radiação térmica infravermelha emitida na superfície e na atmosfera. Ao mesmo tempo, de acordo com a estrutura no interior da nuvem, pode haver emissão de radiação infravermelha influenciando no balanço da radiação na superfície relacionada com a variação térmica de um determinado local e seu regime pluviométrico (Liou, 1992).

No artigo de Custódio et. al, (2009), utilizando dados de insolação (brilho solar), no período de 1960 a 2005 para avaliar o índice de nebulosidade diurna (IND) no estado do Rio Grande do Sul, foi constatado que, em média, os meses de junho, julho, agosto e setembro apresentam os maiores valores de IND. Os meses com menor índice de nebulosidade diurna ocorrem em janeiro e dezembro sendo que, o IND no estado apresenta uma tendência significativa de aumento na nebulosidade para o ano, no outono e no verão.

2.5 Mudanças na radiação solar

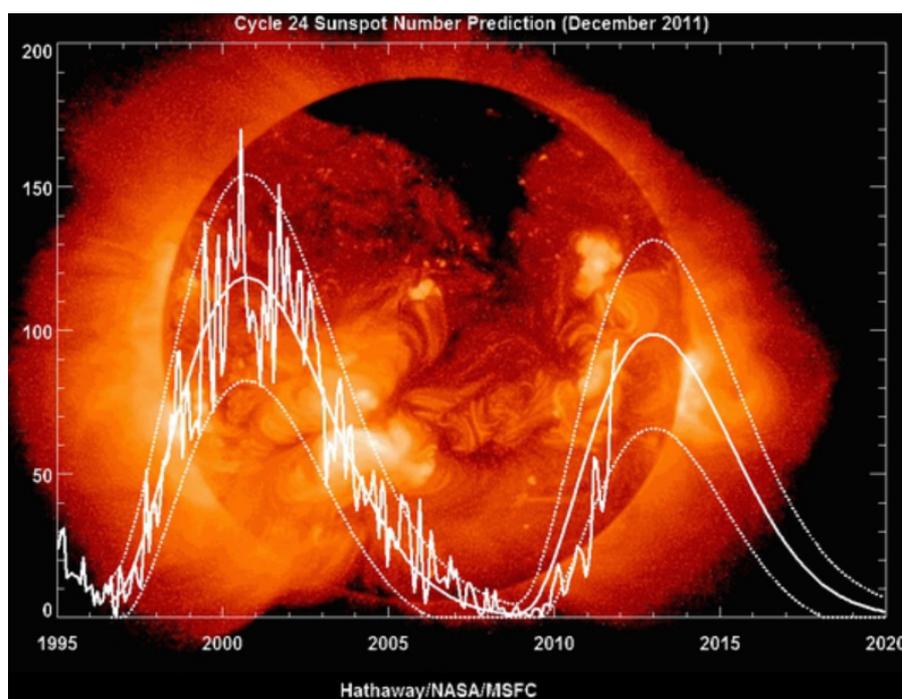
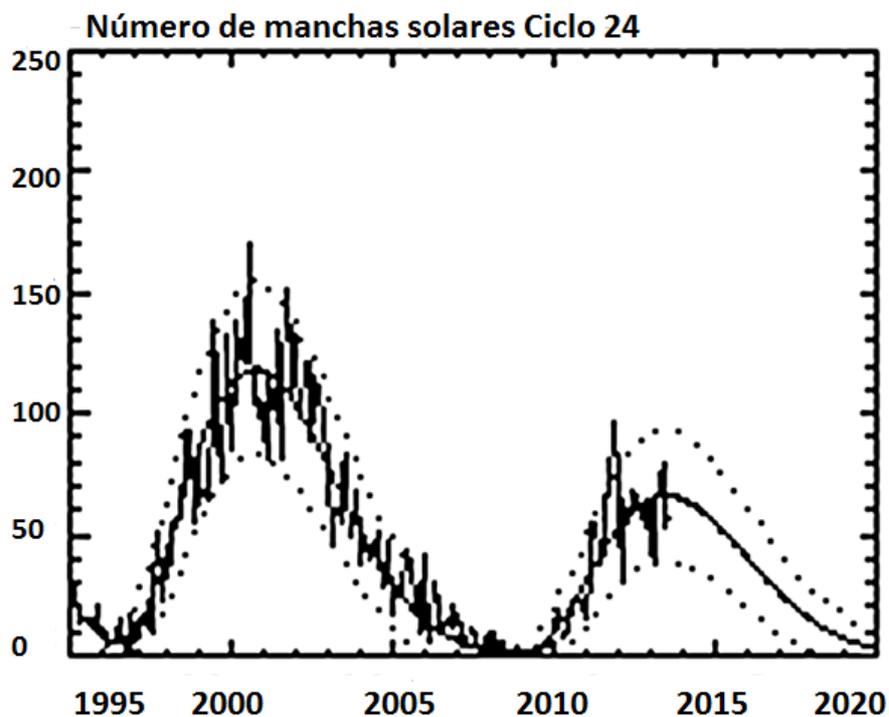
Sendo o Sol a principal fonte de energia do sistema terrestre é de suma importância conhecer as alterações do fluxo radiativo solar devido às variações na estrutura térmica da atmosfera da Terra e as conseqüências desta variabilidade para o clima. Evidentemente, haverá conseqüências para os sistemas de geração de energia elétrica sensíveis a estas mudanças climáticas e radiativas. Por exemplo, as

correlações entre os fenômenos de longo e curto prazo influenciados pela variabilidade solar e índices de chuvas em regiões do hemisfério sul são importantes para se entender a ação de interação Sol-Terra. Isto possibilita fazerem-se previsões dos períodos de cheias e de secas facilitando o planejamento e o controle da operacionalidade das redes hidroelétricas e sistemas PV (fotovoltaico), no estado do Rio Grande do Sul. Segundo Almeida, (2001), as séries das chuvas de Fortaleza e Pelotas apresentam fases de anti-correlação consistentes e bem definidas com a série de ciclos solares magnéticos e períodos de mudança de fase de correlação. Entre as séries de chuvas e ciclos solares magnéticos, ocorreu a polaridade negativa do campo magnético solar. O mesmo autor em seu trabalho observou que existem correlações de curto prazo entre a variabilidade de polaridade do campo magnético interplanetário com os níveis de chuvas de Fortaleza e Pelotas, ocorrendo um incremento significativo do nível de chuvas durante alguns dias, após “zero” de eventos MSB (*Magnetic Sector Boundary*). Estes resultados sugerem que o mecanismo de penetração de partículas na magnetosfera acontece durante os períodos de troca dos sinais de polaridade do campo magnético interplanetário (IMF- extensão do campo magnético solar no espaço interplanetário), seja qual for o sinal de troca.

2.5.1 Ciclo solar

A cada 11 anos o Sol passa por momentos alternados de alta e baixa atividade eletromagnética, conhecidos por mínimos e máximos solares. Esse período é chamado de ciclo solar ou de Schwabe. Desde que as observações começaram a ser realizadas foram contados 23 ciclos até o ano de 2007, agora encontra-se no vigésimo quarto ciclo.

Durante o máximo solar, grandes manchas e intensas explosões ocorrem quase diariamente. As auroras surgem nas latitudes médias e violentas tempestades de radiação danificam os satélites em órbita. A última vez que isso ocorreu com tal intensidade foram entre os anos de 2000 e 2001, conforme mostra as Figuras 2.14.



Figuras 2.14 – Previsão do ciclo solar 24. As linhas pontilhadas mostram a previsão e as cheias os números de manchas solares já observadas

Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>.

As características claras da variabilidade solar são as mudanças com o tempo no número de manchas solares vistas na metade visível do Sol (Stuiver e Quay, 1980). Os registros observados dos números de manchas solares têm demonstrado um ciclo regular médio de 11 anos conhecido como o ciclo de atividade magnética solar.

Segundo Eddy, (1976), as variações solares podem afetar potencialmente o clima terrestre e, em períodos em que a atividade solar permanece baixa ou alta por um período mais prolongado, podem forçar um ajuste do clima terrestre para as novas condições radiativas. E segundo Eddy, (1976), não existem ainda estudos do ciclo solar para explicar a variação de amplitude nas épocas de máxima e de outras mudanças características de longo período.

Manchas solares são regiões mais frias e mais escuras (cerca de 2000 K) do que a fotosfera solar e emitem menos energia do que a fotosfera em geral, como pode-se visualizar na Figura 2.15. Elas possuem intensos campos magnéticos que parcialmente bloqueiam a energia na região sub-fotosfera (Eddy, 1976; Kivelson e Russel, 1995). Sendo que a cada 11 anos a polaridade magnética solar se inverte, manchas mais proeminentes em dado hemisfério terão polaridade oposta em cada fase do ciclo solar de Hale (22 anos), ou seja, a polaridade do campo magnético inverte a cada novo máximo solar do ciclo de 11 anos, caracterizando assim um ciclo solar magnético de 22 anos.

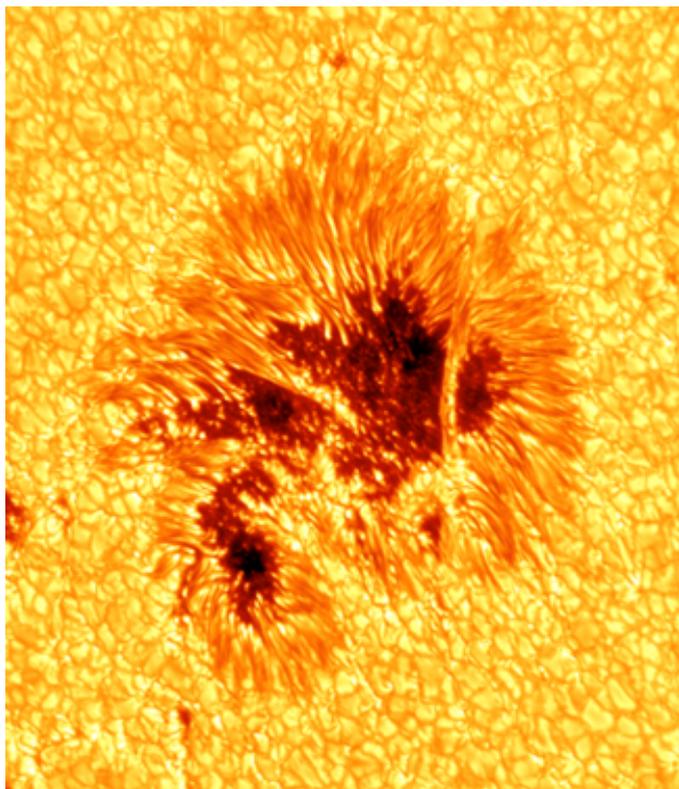


Figura 2.15 – Imagem detalhada de uma mancha solar no espectro de luz visível captada no observatório solar Big Bear da Califórnia no telescópio solar equipado com um espectrômetro de luz visível permitindo ver as diferentes capas da atmosfera solar

Fonte: Tintasbaratas, 2013 (<http://io9.com/ behold-the-clearest-photo-of-a-sunspot-ever-taken-1054493465>).

O número de manchas solares (R) pode ser calculado a partir do índice de Wolf, expresso pela equação 2.2 (Davies, 1990).

$$R = k(10g + s) \quad (2.2)$$

onde:

g representa o número de grupos de manchas

S é o número de manchas observadas individualmente

k é um fator de correção usado para possibilitar a comparação de resultados obtidos por diferentes observadores em locais distintos e com diferentes equipamentos.

No mínimo solar, que é o início do ciclo, a polaridade em um polo é positiva e as linhas de campo magnético saem do Sol. Na polaridade negativa com as linhas de campo magnético entrando no Sol. Parece não existir polaridade dominante em nenhum polo próximo ao máximo solar, e uma reversão da polaridade do Sol começa a tornar-se aparente cerca de dois anos após o máximo solar (Kivelson e Russel, 1995; Hoyt e Schatten, 1997). Ao longo do ciclo de atividade magnética a variação da irradiância acontece junto com as alterações da estrutura da atmosfera solar. Como a Terra está imersa na atmosfera solar, estas variações afetam diretamente o geoespaço (Kivelson e Russel, 1995).

O maior número de manchas solares ocorre durante o período de máxima e mínima atividade solar. A Figura 2.16 mostra as médias mensais do período de 1980 a 2002. Observa-se a variabilidade mês a mês e a assimetria no ciclo solar é mais curta onde a fase é ascendente, indo do mínimo para o máximo, variando de 4 e 5,5 anos, do que a fase descendente, do máximo para o mínimo, entre 5 e 6,5 anos. Isto se repete nos ciclos solares em geral.

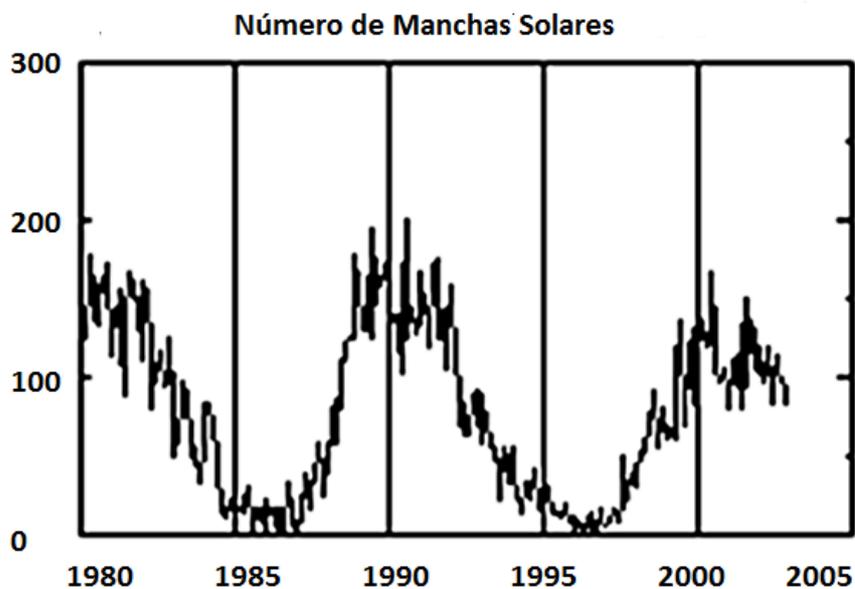


Figura 2.16 – Ciclo solar apresentando assimetria entre a fase ascendente, mais curta e a fase descendente

Fonte NASA, Solar Physics (<http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/sunspots.htm>).

Com relação à análise espectral, Rigozo et al, (2001) mostrou que os componentes espectrais estatisticamente mais significativos para o período entre 1700 e 1999, foram de 65,3; 52,0; 12,0; 11,0; 10,0; e 8,5 anos. Segundo Kane R. P. (1999), a partir da análise dos espectros entre 1914 e 1996 (83 anos), os ciclos mais expressivos de 5,3; 8,3; 10,5; 12,2 e 47 anos, foram utilizados para a reconstrução do número de mancha solares para o ciclo 23 que indicou um número máximo de 140 ± 9 para o ano 2000 e, no caso do ciclo 24, foi de 105 ± 9 entre os anos 2010 e 2011.

Atualmente se observa uma tendência no aquecimento global do clima, atribuída principalmente ao efeito estufa com o aumento de CO₂ na atmosfera. Todavia, nem toda variação global de temperatura deve ser atribuída a este gás. O papel da atividade solar no clima da Terra, como e quando o influencia, é debatido e amplamente estudado na comunidade científica (Hoyt e Schatten, 1997). Não se pode descartar a possibilidade de uma redução da atividade solar nas próximas décadas ou séculos contribuindo para o resfriamento do clima, apesar do aumento de concentração de CO₂ (Echer, E. et al, 2003).

Os possíveis efeitos do ciclo solar na mudança do clima do planeta têm várias evidências que indicam uma variação de 11 anos em muitos parâmetros climáticos (Hoyt e Schatten. 1997).

Se a previsão estiver correta, o ciclo solar 24 terá um número de manchas solares com pico de 90, a mais baixa de todo o ciclo desde 1928, “quando o ciclo solar 16 atingiu um pico de 78”, diz o presidente do painel Doug Biesecker do NOAA *Space Weather Prediction Center*. “Acontece que nenhum dos nossos modelos foi totalmente correto”, diz Dean Pesnell do Goddard Space Flight Center, representante principal da NASA no painel. O sol está se comportando de uma forma inesperada e peculiar que não tinha sido percebido antes (fonte: http://science.nasa.gov/headlines/y2009/29may_noaaprediction.htm). Segundo o mesmo artigo, a baixa atividade solar tem um profundo efeito sobre a atmosfera terrestre, pois permite esfriar-se e contrair-se. O lixo espacial se acumula na órbita da Terra, pois há menos arrasto aerodinâmico. O tranquilo vento solar produz menos tempestades magnéticas ao redor dos polos da terra. Os raios cósmicos que normalmente são empurrados para fora da órbita terrestre pelos ventos solares, agora permanecem no meio-ambiente.

No século XVII o sol mergulhou em um período de 70 anos conhecido como o Mínimo de Maunder, que ainda intriga os cientistas, conforme pode ser visualizado na Figura 2.17. O sol apresentou um período muito baixo de atividade solar isto é, de manchas solares no período entre 1645 a 1715 que ficou conhecido como Mínimo de Maunder. Este período coincide com temperaturas abaixo da média na Terra (Eddy, 1976), em que foram observados alguns dos piores invernos no Hemisfério Norte.

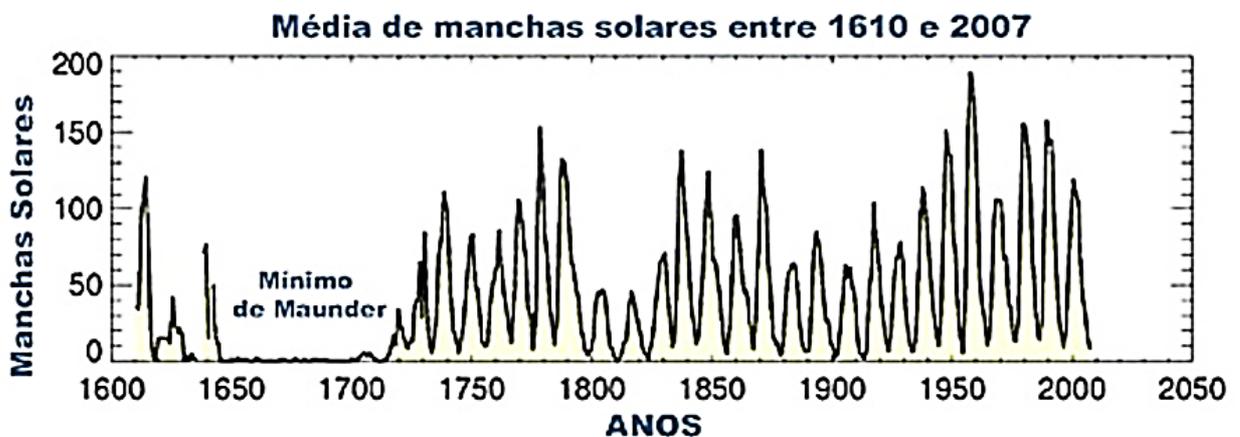


Figura 2.17 – Número de manchas solares anual por média

Fonte: http://www.apolo11.com/imagens/etc/media_de_manchas_solares.jpg

2.6 Escurecimento global (Global Dimming)

O escurecimento global ou “global dimming” descoberto a mais de três décadas, não teve muita repercussão na comunidade científica até alguns anos atrás, pois se tratava de um paradoxo. Trata-se de um fenômeno natural que mantém o planeta resfriado e se contrapõe ao aquecimento global, aquecimento na base da troposfera, denominada efeito estufa.

Em 1985, o pesquisador geográfico Atsumo Ohmura (1985), do Instituto Federal de Tecnologia da Suíça, observou que os níveis de radiação solar haviam

diminuído mais de 10% em três décadas sendo o primeiro cientista a publicar um estudo sobre o escurecimento global.

No início da década de 90, Gerald Stanhill e Shabtai, membros da Organização Agrícola de Israel, analisaram entre 1950 e 1980 informações sobre a luz solar incidente sobre essa região, constatando que havia uma redução bastante acentuada na quantidade de luz solar sobre Israel. Stanhill, e Cohen (2001), concluíram em uma pesquisa que comparava os registros dos raios solares em Israel nos anos 50 com os atuais. Eles constataram quem em média, para o período de vinte e sete anos, a superfície de todo o planeta estava sofrendo uma redução na taxa de radiação solar que atinge a superfície terrestre de $0,51 \pm 0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$, equivalente a uma redução de 2,7% por década e eles denominaram tal fenômeno de “global dimming”.

Observações realizadas em algumas localidades dos Estados Unidos, entre 1961 e 1990, também mostraram um declínio forte de $19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ou 10% da radiação solar na superfície em três décadas em comparação com outras médias em diferentes regiões do planeta com $7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ou 4% de diminuição da radiação solar para esse mesmo período (Liepert, 2002).

No centro da questão se encontram os aerossóis em suspensão na atmosfera, a maioria de origem natural ou por ação antrópica. Em níveis mais altos da atmosfera, estão os aerossóis de origem mineral que refletem parte da radiação proveniente do sol. Este efeito tende a resfriar as camadas mais baixas da atmosfera, onde se localizam a maioria dos gases do efeito estufa, reduzindo a temperatura próxima à superfície (Ottoboni J. 2007). De acordo com estudos sobre a radiação solar que chega a superfície terrestre, verificou-se que uma diminuição desta variável poderia estar associada a um aumento das quantidades das partículas de aerossóis na atmosfera nas localidades estudadas (Stanhill et al, 1994, Liepert et al, 1997 e 2002).

Vide et al. (2006) constataram entre 1971 e 2000 uma diminuição da insolação na Espanha, entre 1973 e os primeiros anos da década de 80, que poderia ser consistente com o fenômeno “global dimming”, mas que a partir da metade da década de 80, inicia claramente uma evolução ascendente. Eles encontraram um aumento significativo da insolação de aproximadamente 50 h por década, sendo que foi mais significativo na segunda metade da série estudada, já que até o início dos anos 80 a insolação parecia diminuir. Com relação à periodicidade, segundo os

autores, as séries apresentaram uma variabilidade importante com períodos de 2,5 e 5,3 anos, mas não foi possível associar estes ciclos a algum fenômeno conhecido. Por outra parte, não é a primeira vez que se observam ciclos de 5 e 6 anos em séries climáticas (Lana et. al, 2005), que poderia estarem relacionadas com ciclos similares na atividade solar (Kane 1999).

Segundo Saulo Freitas et. al, (2005), as queimadas ocorrem numa escala espacial muito maior na América do Sul, sendo frequente em outras regiões do planeta, principalmente nos continentes africano e asiático que também apresentam um ciclo anual de queima que emitem grandes quantidades de poluentes para a atmosfera. Assim, as queimadas têm um impacto relevante no processo de mudanças climáticas em escala planetária. O mesmo autor comenta que as nuvens de fumaça oriunda das queimadas, podem ultrapassar os 8 km e, em determinados casos e dependendo da latitude, podem alcançar a estratosfera a 12 km de altitude formando grandes núcleos de condensação formadores de nuvens, Figura 2.18. As micropartículas associadas às gotículas de água funcionam como imensos espelhos refletores da radiação solar. Aerossóis e água na constituição das nuvens, além de permanecerem mais tempo em altitudes maiores, refletiriam a radiação para o espaço minimizando o aquecimento da superfície do planeta.



Figura 2.18 – Pirocumulus produzido por queimada em área de floresta no estado de Rondônia

Fonte: Freitas J., 2005.

2.6.1 Causas e consequências do escurecimento global.

Existe uma forte suspeita de que o escurecimento global seja causado pela poluição, isto é, pelo aumento de partículas de aerossóis antropogênicos em escala global, variações na cobertura de nuvens e presença de aerossóis vulcânicos. Estes elementos refletem a luz solar ao espaço, não a deixando chegar ao solo e mudando as propriedades óticas das nuvens e consequentemente nas variações de precipitação de chuvas. São citados como prováveis causas da diminuição na taxa de radiação solar (Liebert e Kukla, 1997). Já para Liang, (2005), a principal causa na diminuição da radiação solar é a variabilidade da carga de aerossóis na atmosfera, como mostra a Figura 2.19.

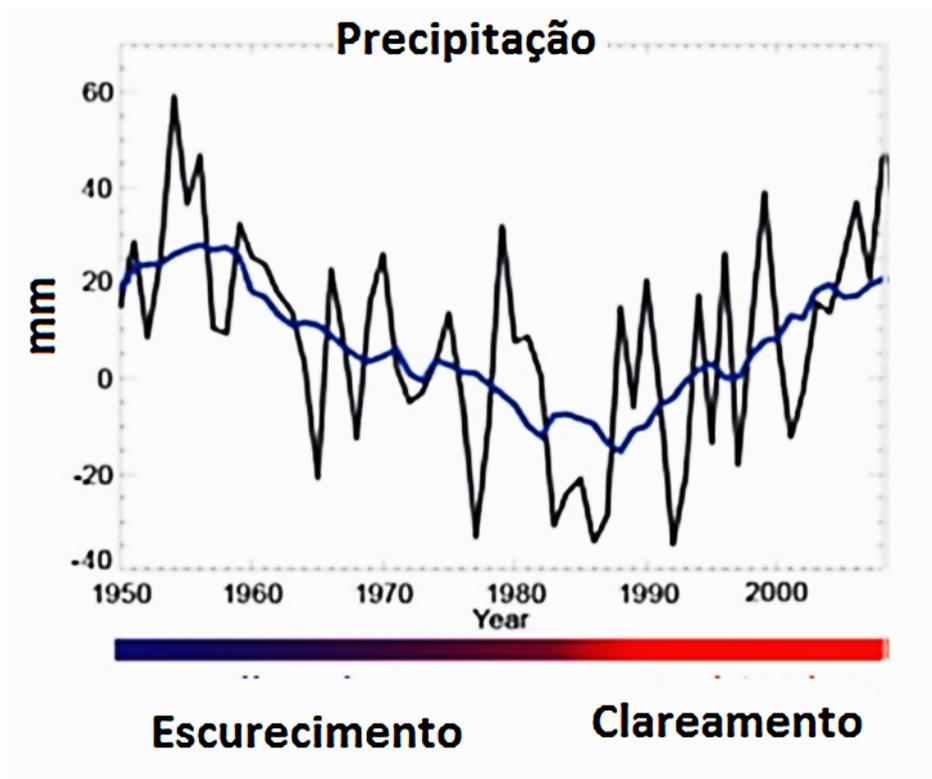


Figura 2.19 – Variações na precipitação de chuvas para o hemisfério Norte nos períodos de menor e maior brilho solar

Fonte: Peterson and Vose, 1997.

A inversão no escurecimento global, observada a partir de 1990 em alguns locais, pode ter sua origem na redução da emissão de aerossóis. Neste caso, as erupções ocorridas em 1963 no Monte Agung na Indonésia, Chichón em 1982 no México e o Pinatubo 1991 nas Filipinas têm uma parcela de contribuição na diminuição da radiação solar sobre o planeta.

Foi observado que durante os primeiros meses após a erupção do Monte Pinatubo em julho de 1991, ocorreu um aumento da radiação da ordem de 2 a 3 % no albedo planetário e uma redução na radiação solar sobre a Amazônia de $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Minnis et al. 1993). A geração das centrais de energia solar após a erupção foram 30% menores comparada com os anos sem poluentes vulcânicos (Michalsky et al. 1994). O aumento na quantidade de nuvens pode esclarecer, em parte, os declínios observados na radiação solar nas regiões onde se tem uma série temporal de nebulosidade para análise.

O cientista atmosférico do Instituto Federal de Tecnologia da Suíça, Martin Wild (2005) mostra que houve um significativo escurecimento sobre a Terra até cerca de 1990, quando os dados sugerem que se iniciou um processo gradual de aumento da luz solar, possivelmente devido ao esforço mundial no controle da poluição. Um aumento significativo nos valores da radiação de onda longa descendente para as estações dos Alpes Suíços, no período de 1995 e 2002, foi relatado por Philipona et al. (2004).

Diversos estudos sugerem que a energia solar na superfície terrestre não foi estável ao longo do tempo, mas mostrou alterações significativas de variabilidade. Os aerossóis atmosféricos de origem antropogênicas são considerados importantes contribuintes para essas alterações (Wild. et al. 2007) e segundo estes autores, as análises mostraram que as alterações nas médias das temperaturas da superfície terrestre estão em acordo com a transição do escurecimento para o clareamento. Este estudo sugere que o escurecimento solar, possivelmente favorecido pelo aumento da poluição atmosférica, foi eficaz no mascaramento do aquecimento global até a década de 1980.

De acordo com o artigo de Wild (2012), no hemisfério Norte com concentração maior de aerossóis, o aquecimento foi menor durante esta fase do escurecimento global e com a diminuição destes poluentes na atmosfera, houve um aumento de brilho solar nesse hemisfério. Para o hemisfério Sul, com menor

concentração de poluentes antrópicos no ar, o aquecimento observado foi semelhante em ambos os períodos analisados, conforme Figura 2.20.

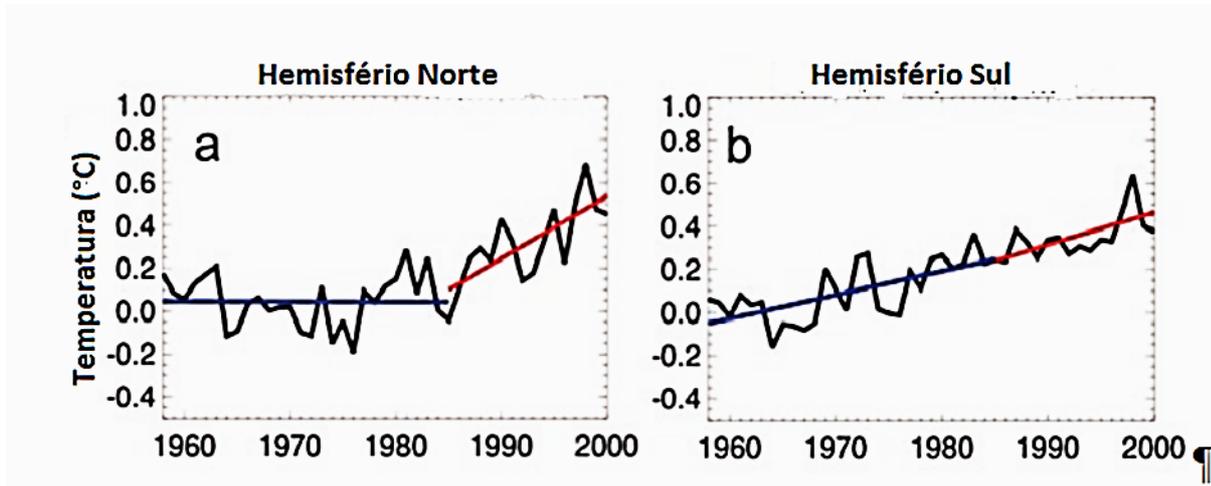


Figura 2.20 – Temperaturas nos hemisférios Norte (a) e Sul (b) durante e após o período do escurecimento global

Fonte: Wild, 2012.

Para Albert (2005), o escurecimento global pode ser maior nas grandes áreas urbanas. As análises em escala global das variações dos fluxos de radiação solar anuais mostraram uma diminuição de $0,41 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em áreas altamente povoadas em comparação com $0,16 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em locais de baixa densidade populacional (menor que 100 mil habitantes). Ele sugere que o escurecimento solar global seja de natureza local ou regional.

A continuação desse tema, escurecimento global, encontra-se no apêndice A desta tese para um melhor esclarecimento.

2.7 Variabilidade no brilho solar e controle do clima

Pequenas mudanças na intensidade do brilho solar podem causar grandes impactos de médio e curto prazo no clima da Terra de acordo com novo estudo publicado na revista *Scientific American*, (2013). A observação científica tem

demonstrado que certos fenômenos climáticos como oceanos mais quentes, maior quantidade de chuvas tropicais, menor quantidade de nuvens subtropicais, circulação mais intensa de ventos, parecem estar relativamente associados a um ciclo de atividade solar de onze anos, resultando em variações na emissão total da radiação solar.

O climatologista Gerald Meehl et al, (2010), do Centro Nacional Americano de Pesquisa Atmosférica (NCAR) e seus colegas reproduziram todos os fenômenos climáticos cíclicos observados quando a luz solar variava seu brilho e concluíram que mesmo sendo pequena a variabilidade do brilho solar, em médias globais, regional ou localmente pode ser muito maior. Mudanças na radiação solar segundo Meehl pode fornecer condições que propiciem o surgimento do efeito La Niña, onde as águas da superfície do oceano são anormalmente mais baixas no Pacífico equatorial. Quando isso acontece, há chances de ocorrer um La Niña fraco.

2.7.1 O dióxido de carbono (CO₂)

O aumento da concentração de alguns gases na atmosfera como o CO₂ também podem contribuir para afetar a tendência temporal dos parâmetros atmosféricos e conseqüentemente obscurecer os efeitos solares. O dióxido de carbono é transparente aos comprimentos de ondas curtas de radiação, mas em relação às radiações de ondas longas, (infravermelhas), a radiação solar é absorvida por estes compostos e devolvida ao espaço, retornando parte dessa energia para o solo. Quanto maior a concentração de CO₂ na atmosfera, menor a quantidade de radiação emitida para o espaço (Yamasoe, 2006) assim, contribuindo para o aquecimento global.

As variações nas concentrações de gases de efeito estufa como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), na atmosfera, advêm principalmente do balanço entre as emissões originárias da queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso do solo através das queimadas e a absorção pelos sistemas naturais.

Foram publicados em 2 de maio 2013, na *Nature* pelo Monastersky, (2013) que a concentração de CO₂ na atmosfera havia superado pela primeira vez as 400 partes por milhão (ppm). Este índice coloca o planeta em zona perigosa segundo a encarregada das Nações Unidas para o Clima, Cristiana Figueres (2013) em um comunicado publicado em Bonn, Alemanha, de acordo com a Figura 2.21.

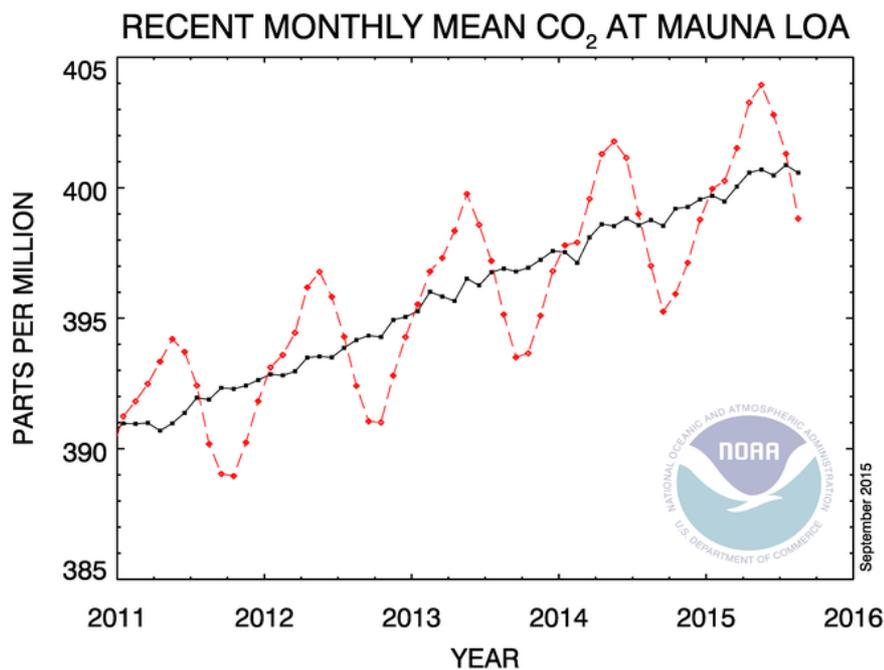


Figura 2.21 – Concentração Atmosférica de CO₂ em parte por milhão (ppm), medidas feitas no observatório de Mauna Loa, Havaí pela agência oceânica e atmosférica americana (NOAA)

Fonte: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.

Os dados mostrados na figura 2.21 mostram que a concentração de CO₂ na atmosfera indica claramente que os sistemas naturais sorvedouros de carbono não estão sendo capazes de absorvê-lo na mesma taxa pela qual vinham sendo emitido Raupach (2008). Segundo o painel intergovernamental de mudanças climáticas da ONU, com densidades acima de 400 ppm de CO₂ a temperatura média do planeta poderá subir entre 2 e 6°C até o final deste século.

2.7.2 O fenômeno El-Niño

O El Niño Oscilação Sul (ENSO – *El Niño-Southern Oscillation*) é um fenômeno de grande escala que provoca anomalias no padrão de temperatura da superfície do Oceano Pacífico Tropical. Este fenômeno ocorre na região equatorial do oceano Pacífico caracterizado por valores positivos maiores que 0,5 °C da temperatura superficial do mar (*Sea Surface Temperature–SST*), em relação aos valores médios de 1971 a 2000, e simultaneamente ocorre com anomalias no padrão de pressão atmosférica nas regiões de Darwin, norte da Austrália (12,4 °S; 130,9 °E) e Taiti, na Polinésia Francesa (17,5 °S; 149,6 °W). O fenômeno La Niña, fase fria, é caracterizado por valores negativos menores que -0,5 °C em relação aos valores médios, por três meses ou mais, na mesma região e a fase quente do ENOS é chamada de El Niño (Wyrctcki et al, 1976).

Em estudos sobre o comportamento da nebulosidade sobre a América do Sul do El Niño e La Niña e períodos neutros foi observado que em ano de La Niña nas regiões equatoriais, frequentemente é observada nebulosidade em 2/3 da latitude ou em toda ela. Já no ano de El Niño, esta frequência de nebulosidade é menor (Federova e Carvalho, 2006).

Segundo Chrity e Spencer (2004) as temperaturas médias globais aumentam com a ocorrência de El Niño e diminuem com a ocorrência de La Niña, o que pode provocar alterações do balanço radiativo da Terra.

No Brasil, a fase quente do ENSO (El Niño) provoca diminuição de precipitação no Norte e Nordeste e um aumento de chuvas intensas de maio a julho no Sul. Tal ocorrência pode influenciar no comportamento médio da radiação solar, diminuindo a quantidade de vapor d'água sobre uma determinada região. Uma menor quantidade de vapor de água na atmosfera torna-a mais transparente à radiação solar e à maior quantidade de radiação solar de onda curta chegando à superfície terrestre. Isto eleva ganho de energia, aumentando o saldo de radiação ou provocando o contrário, caso a nebulosidade seja maior com as intensas chuvas.

No Rio Grande do Sul ocorreram alterações no padrão de precipitação tanto em anos de El Niño como La Niña, na mesma época do ano, principalmente no final da primavera e no início do verão (Berlato e Fontana, 2003). O evento do El Niño está relacionado às precipitações acima da média normal e para os anos com La

Niña está associado aos valores abaixo da média normal. Segundo Streten, (1983), no estado do Rio Grande do Sul, ocorrem dois picos de influência, sendo o principal deles nos meses de outubro a dezembro e uma repetição nos meses de abril a maio.

Segundo o *Australian Government Bureau of Meteorology*, o índice de oscilação Sul ou SOI, fornece uma indicação do desenvolvimento e da intensidade do El Niño ou La Niña no Oceano Pacífico. O SOI é determinado usando as diferenças de pressão entre Taiti e Darwin (Austrália).

Valores negativos da SOI, abaixo de 8 (diferença de pressão entre Taiti e Darwin) indicam frequentemente episódios de El Niño. Estes valores negativos são geralmente acompanhados de aquecimento no centro e leste do Oceano Pacífico Tropical, uma diminuição das forças dos ventos alísios do Pacífico e uma redução das chuvas sobre grandes no inverno e na primavera no leste da Austrália.

Valores positivos do SOI, acima de 8, são típicos de um episódio de La Niña associado a fortes ventos do Pacífico e temperaturas mais quentes do mar ao norte da Austrália. Chuvas no centro e leste do Oceano Pacífico Tropical tornam mais fria a região durante este período favorecendo uma probabilidade maior de umidade em relação a normal no leste e norte da Austrália, Figura 2.22.

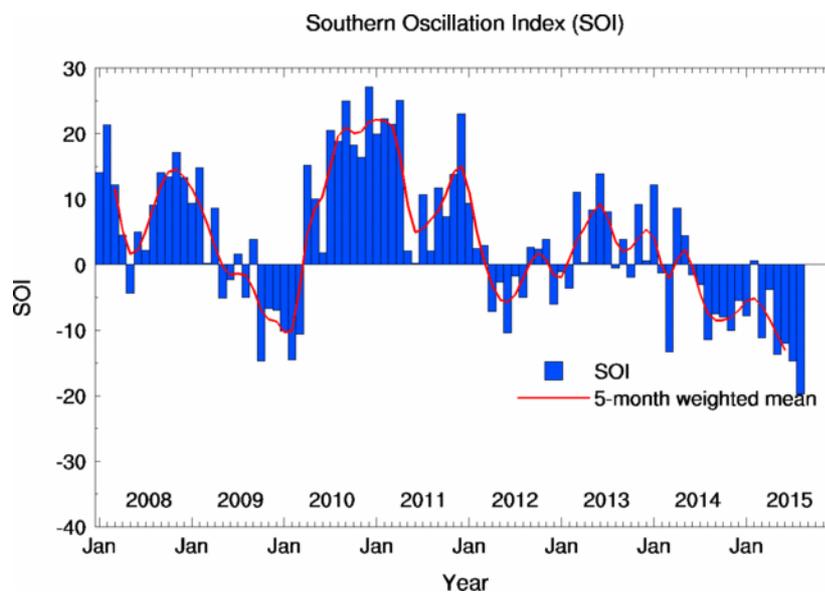


Figura 2.22 – Valores mensais do SOI

Fonte: <http://www.bom.gov.au/climate/glossary/soi.shtml>.

Resultados de levantamento de dados no estado do Rio Grande do Sul têm demonstrado que as médias climatológicas mensais de insolação variam de 134,9 h a 240,1 h. Assim, os fenômenos de El Niño e La Niña determinam anomalias negativas e positivas, respectivamente, de insolação relativa causando maior impacto no trimestre de outubro a novembro com maior ênfase a La Niña, o que demonstra uma tendência de maior insolação que em anos neutros. Neste trimestre, o mês de maior impacto dos ENOS tem sido novembro (Fonte: Custódio, M. S. et al. Insolação no Rio Grande do Sul: Climatologia e Impacto de El Niño e La Niña).

Dados diários de evaporação do Tanque Classe A, (mede a evaporação - em milímetros ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$), numa superfície livre de água), demonstraram que a insolação é menor nos anos de El Niño e maior nos anos de La Niña. A umidade relativa média diária do ar foi maior em anos do El Niño e menor em anos de La Niña. A maior influência dos ENOS para umidade relativa média diária do ar ocorre de outubro a novembro e no mês de maio (Streck. N. 2008).

Diante das incertezas que o clima tem demonstrado principalmente na virada do século, tentar entendê-lo é de suma importância para as energias alternativas principalmente porque qualquer mudança na irradiância solar resultará em um decréscimo na potência gerada. Qualquer variação brusca climática, como o clima vem demonstrando ultimamente, também resulta em maiores precipitações e nebulosidades ou grandes estiagens em algumas regiões, afetando naturalmente a geração hidrelétrica da qual fazem parte o maior percentual de geração elétrica no Brasil e, conseqüentemente, também no Estado.

No próximo capítulo são tratados os métodos utilizados nas séries temporais para obter, entre outras análises, a previsão comportamental da sazonalidade, sua tendência e a detecção de ciclos na série.

3 MATERIAL E MÉTODOS UTILIZADOS NAS SÉRIES TEMPORAIS

Neste capítulo, tratam-se alguns conceitos básicos das séries temporais, da classe geral dos modelos ARIMA, X11 e X11-ARIMA no domínio do tempo, modelos estes utilizados para se obter, entre outras análises, a previsão do comportamento da sazonalidade e sua tendência. A metodologia para verificar possíveis quebras estruturais em série eólicas e a análise espectral no domínio da frequência pelo método de Fourier na detecção de ciclos na série, também são demonstradas. É explicada a metodologia estatística usada através do emprego de modelos para o preenchimento das lacunas em dados inexistentes no banco de dados meteorológicos e na estruturação do mesmo.

Também são apresentados alguns conceitos gerais e definições para um melhor entendimento dos termos utilizados em estatística.

Importante salientar que estes modelos estatísticos e matemáticos podem ser utilizados em série de dados em qualquer região do planeta em que se queira analisar as variáveis de insolações e/ou radiação, velocidades média ou máxima dos ventos, ou outra variável qualquer. Desde que se tenha um número considerável de informações de dados medidos ao longo do tempo do local a ser investigado.

3.1 Metodologia

Os estudos desenvolvidos por esta tese foram realizados no domínio do tempo, por meio das funções de autocorrelações, no caso dos estudos da sazonalidade e tendência, e no domínio da frequência, por meio de análise espectral com o intuito de verificar a existência de ciclos nas séries.

A interpolação temporal foi realizada seguindo a técnica Box & Jenkins. Esses modelos podem ser expressos por modelos Autorregressivos (AR) e modelos de Médias Móveis (MA) ou pela união desses modelos. A inclusão do modelo ARIMA no X11 foi utilizada para análise da sazonalidade da série. Este procedimento é

fundamental quando a estrutura sazonal se altera rapidamente e de forma aleatória como neste estudo tentando captar variações cíclicas.

As respostas serviram para sugerir e estimar tendências futuras do potencial solar e eólico do planeta Terra baseadas em dados obtidos para o estado do Rio Grande do Sul comparando-os com dados avaliados anteriormente.

A previsão das intensidades climáticas a que se chegou foi através de modelos matemáticos e estatísticos, produzindo previsões para futuros valores da série. Os modelos ARIMA (modelos autorregressivos integrados de média móvel), e a análise da intervenção por meio da metodologia Box & Jenkins, (Box & Jenkins, 1994) foram utilizados para fazer previsões de intensidades em função de valores passados descrevendo o comportamento da série no preenchimento das lacunas faltantes na estruturação do banco de dados. Assim como o modelo X11 ARIMA utilizado nos ajustes para interpretação do comportamento da sazonalidade das variáveis, insolação, radiação e velocidade média do vento. Também foram realizados estudos sobre a estabilidade da série dos dados eólicos e possíveis quebras estruturais com a finalidade de investigar instabilidades, e concluir sobre os fatores que desestabilizam a série.

Assim sendo, com base num estudo capaz de representar as situações mais próximas da realidade, esta tese pretende contribuir para a elaboração de projetos de geração de energia solar e eólica e servir de subsídio para estudos sobre as variações climáticas passíveis de influenciar a geração de energia elétrica.

3.2 Conceitos gerais e definições

Período da Previsão → Unidade básica de tempo na previsão.

Horizonte da Previsão → Número de períodos cobertos.

Intervalo de Previsão → Frequência de atualização

3.2.1 Série temporal

Uma série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo. Os dados contidos na referida série devem ser equidistantes, apresentando uma dependência serial. Representa-se uma série temporal da seguinte forma: $Z_t, t = 1, 2, \dots, n$ onde n representa o tamanho da série.

Se Z_t é um conjunto de observações correlacionadas entre si seguindo uma ordem cronológica de tempo tem-se uma série temporal. O caso mais frequente é aquele em que a série só pode ser descrita com uma distribuição de probabilidade. Neste caso, tem-se uma série não-determinística.

Determinadas as relações de dependência de Z_t , cria-se um modelo matemático para previsão dos valores futuros da série. A série temporal Z_t pode ser discreta, ou contínua, univariada (com uma variável), ou multivariada (com mais de duas variáveis) e o tempo " T " pode ser unidimensional (uma dimensão) ou multidimensional (com mais de uma dimensão).

O pesquisador que se utiliza de uma série temporal tem por objetivo estudar o processo gerador da série, fazer previsões em função dos seus valores passados e descrever o comportamento da série. Sendo que este estudo pode ser feito no domínio do tempo, por meio das funções de autocorrelações, ou no domínio da frequência, por meio de análise espectral.

3.2.2 Processo Estocástico

Os modelos utilizados para descrever séries temporais são processos estocásticos controlados por leis probabilísticas. Definição: seja T um conjunto arbitrário, um processo estocástico é uma família $Z = \{Z(t), t \in T\}$, tal que para cada $t \in T, Z(t)$ é uma variável aleatória (Morettin & Tolo, 2006).

O conjunto T é, normalmente, considerado como o conjunto dos inteiros $Z, Z = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$ ou conjunto dos R , e o conjunto de variáveis aleatórias, (Va) ,

distribuídas equiespaçadamente no tempo, definidas num mesmo espaço de probabilidade (Ω, A, P) , (Morettim & Toloj, 1989).

3.2.3 Processo estacionário

O conjunto de variáveis aleatórias $Z = \{Z_t, t \in T\}$ é dito estacionário se as estatísticas do conjunto de dados não variarem nos instantes t e $t + k$, para $k = 0, 1, 2, \dots, n$, ou seja:

$$E[Z_t] = E[Z_{t+k}] \quad (3.1)$$

$$Var[Z_t] = Var[Z_{t+k}] \quad (3.2)$$

Os processos estacionários podem ser estritamente estacionários (ou forte) e estacionariedade de segunda ordem (ou fraca).

O processo será estritamente estacionário se todas as informações finito dimensionais permanecerem as mesmas sob translação de tempo, ou seja, $F(Z_1, \dots, Z_n; t_1 + \tau, \dots, t_n + \tau) = F(Z_1, \dots, Z_n; t_1, \dots, t_n)$; para qualquer t_1, \dots, t_n , de τ de T . Isso significa, em particular, que todas as distribuições unidimensionais são invariantes sob translação do tempo, logo a média $\mu(t)$ e a variância $V(t)$ são constantes, sendo, $\mu(t) = \mu, V(t) = \sigma^2$, para todo $t \in T$.

Um processo estocástico $Z = \{Z(t), t \in T\}$ será fracamente estacionário (ou estacionário de segunda ordem) se, e somente se:

- i) $E\{Z(t)\} = \mu(t) = \mu$; constante, para todo $t \in T$;
- ii) $E\{Z^2(t)\} < \infty$, para todo $t \in T$;
- iii) $V(t_1, t_2) = Cov\{Z(t_1), Z(t_2)\}$, é uma função $t_1 - t_2$.

Um processo Z tal que (ii) esteja satisfeito é conhecido como um processo de segunda ordem.

Existem séries temporais que não são estacionárias, séries econômicas, por exemplo, e esta não estacionariedade pode ser transformada em estacionariedade através de diferenças sucessivas, utilizando-se o operador diferença, ΔZ_t ; que levará a um processo estacionário homogêneo.

$$\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1} \quad (3.3)$$

$$\Delta^2 Z_t = \Delta Z_t - \Delta Z_{t-1} \quad (3.4)$$

3.2.4 Ruído branco

É a sequência de variáveis aleatórias (ou erro), não correlacionadas, e identicamente distribuídas, com média zero e variância constante, com distribuição normal. Muito presente em estudo de séries temporais. O termo se aplica a uma sequência de erros aleatórios, sempre que esta tiver média e variância constante e sem autocorrelação. Um ruído branco é temporalmente homogêneo, estacionário e sem dependência temporal.

$$a_t \sim N(0, \sigma_a^2) \quad (3.5)$$

3.2.5 Modelo

É um artifício matemático que tem por fim representar a realidade na lei de seus efeitos, espelhando a representação formal de uma realidade empírica. O modelo deve ser parcimonioso, ou seja, deve fornecer a racionalidade de todos os fatos empíricos considerados (Morettin, 1989). A modelagem de séries temporais pressupõe a utilização de uma série estacionária cujo período de estimação de seus parâmetros é representativo de toda a série a ser estimada. Os modelos podem ser representados por duas caracterizações: a) aqueles em que a série já é estacionária e representada pelo modelo ARMA; b) e aqueles que necessitam ser estacionarizadas antes de se aplicar a modelagem através da família dos modelos ARIMA. Ambos os modelos são designados por ARIMA (p, d, q) .

3.2.6 Análise das componentes de uma série temporal

Conforme Morettin e Tolo (1987) uma série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo, geralmente, compostas por quatro elementos:

1. **Tendência (T_t):** verifica o sentido de deslocamento da série, ao longo de vários anos, podendo aumentar, diminuir ou permanecer constante. A tendência de uma série indica o seu comportamento “de longo prazo”, isto é, se ela cresce, decresce ou permanece estável, e qual a velocidade destas mudanças.

2. **Ciclo (C_t):** movimento ondulatório caracterizado pelas oscilações de subida e de queda nas séries, de forma suave e repetida, ao longo da componente de tendência que, ao longo de vários anos, tende à periodicidade. Isto é, o movimento da série que se repete ao longo dos períodos de tempo, tendo uma longa duração, a qual varia de ciclo para ciclo ou se repete, em períodos muito longos.

3. **Sazonalidade ou Fator Sazonal (S_t):** relata as flutuações periódicas de comprimento constante, repetindo em períodos fixos, o comprimento do período é denotado por “S”, associado, na maioria dos casos, a mudanças climáticas. A sazonalidade em uma série corresponde às oscilações de subida e de queda que sempre ocorrem em um determinado período do ano, mês, semana ou do dia. A diferença entre as componentes sazonal e cíclica é que a primeira possui movimentos facilmente previsíveis, ocorrendo em intervalos regulares de tempo, enquanto que movimentos cíclicos tendem a ser irregulares.

4. **Ruído aleatório ou erro (a_t):** é tudo aquilo que não é explicado pelas outras componentes da série, ou seja, é o que o modelo estimado não consegue captar. Um erro é dito ruído branco quando possui distribuição normal, a média de seus componentes é zero e a variância constante a esses são não correlacionados indicando, assim, que o modelo elaborado conseguiu explicar o máximo de série de dados (como já comentado acima, equação 3.5), sendo representado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Dados} &= \text{Modelo} + \text{erro}; \\ \text{Dados} &= f(T_t, C_t, S_t) + \text{erro}. \end{aligned}$$

3.2.7 Modelos univariados

São modelos que se baseiam somente na informação referente à série temporal em estudo. Tem-se dois tipos de modelos, aqueles que levam em consideração somente a informação contida na série histórica Z_t e, aqueles que, além das informações contidas em Z_t , permitem a inclusão de outras informações relevantes não contidas na série histórica. Esses modelos são baseados em estatística clássica e estatística Bayesiana, Hamilton (1994). Na Figura (3.1), apresenta-se um esquema dos modelos univariados.

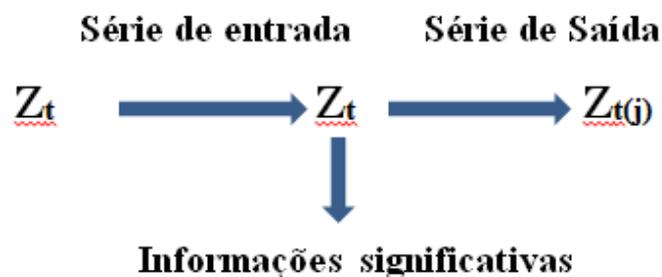


Figura 3.1 – Esquema ilustrativo dos modelos univariados

Fonte. Moretti & Toloj, (1987).

Os modelos Box & Jenkins podem ser classificados em estacionários e não estacionários, pois dependendo desta classificação, tem-se a classe geral ARMA (p, q) , ou ARIMA (p, d, q) , respectivamente.

3.3 Modelos estacionários AR, MA e ARMA

Se a série temporal ocorre no tempo em torno de um valor constante, não necessitando de nenhuma transformação matemática para estacionarizá-la, tem-se

uma série estacionária. Assim, uma série temporal é estacionária se o processo aleatório oscilar em torno de um nível médio constante. Séries temporais sazonais ou com tendência linear ou exponencial são exemplos de séries temporais com comportamento não estacionário.

Modelos estacionários são aqueles que assumem que o processo está em equilíbrio. Um processo é considerado fracamente estacionário se suas médias e variância se mantêm constantes ao longo do tempo e a função de autocovariância depende, apenas, da defasagem entre os instantes de tempo. Um processo é fortemente estacionário se todos os momentos conjuntos são invariantes à translação no tempo.

A **autocorrelação** em estatística é uma medida que informa o quanto o valor de uma realização de uma variável aleatória é capaz de influenciar seus vizinhos, isto é, o quanto a existência de um valor mais alto condiciona valores também altos de seus vizinhos. Para obtenção de um modelo para uma série temporal, é necessário conhecer-se a relação entre as observações atuais e as observações anteriores. Uma forma de se obter esta avaliação é através das funções de autocorrelação.

O **modelo autorregressivo de ordem p (AR(p))**, A ordem “p” indica a ordem do modelo, sendo que Z_t , no instante t é função dos Z 's nos instantes anteriores a t e de um erro no instante t . O modelo que contém o operador autoregressivo, $\phi(B) = 1$ é chamado modelo autorregressivo, denotado por $AR(p)$, onde “p” indica a ordem do modelo, (número de defasagens), e B é o operador translação para o passado.

O modelo será considerado estacionário se $\phi(B)$ convergir para $|B| \leq 1$ como $\phi(B) = 0$, chamada condição de estacionariedade. A condição de estacionariedade do $AR(p)$ estabelece que todas as raízes da equação devem cair fora do círculo unitário.

$$\tilde{Z}_t = \varphi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \varphi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \varphi_p \tilde{Z}_{t-p} + a_t \quad (3.6)$$

$$\varphi(B)\tilde{Z}_t = a_t \quad (3.7)$$

O modelo autorregressivo de ordem 1 e 2 podem ser representados pelas seguintes expressões onde \tilde{Z}_t corresponde a valores subtraídos da média do processo.

$$\tilde{Z}_t = Z_t - \mu \quad (3.8)$$

$$AR(1) \rightarrow \tilde{Z}_t = \varphi_1 \tilde{Z}_{t-1} + a_t \quad (3.9)$$

$$AR(2) \rightarrow \tilde{Z}_t = \varphi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \varphi_2 \tilde{Z}_{t-2} + a_t \quad (3.10)$$

As autocovariâncias não dependem do t , mas da ordem p . Pela condição de estacionariedade, quanto maior a distância entre as observações (maior o valor de p), menor a autocorrelação.

Através das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial, que indicam a ordem do modelo, será feita a identificação do mesmo, de acordo com a Figura 3.2.

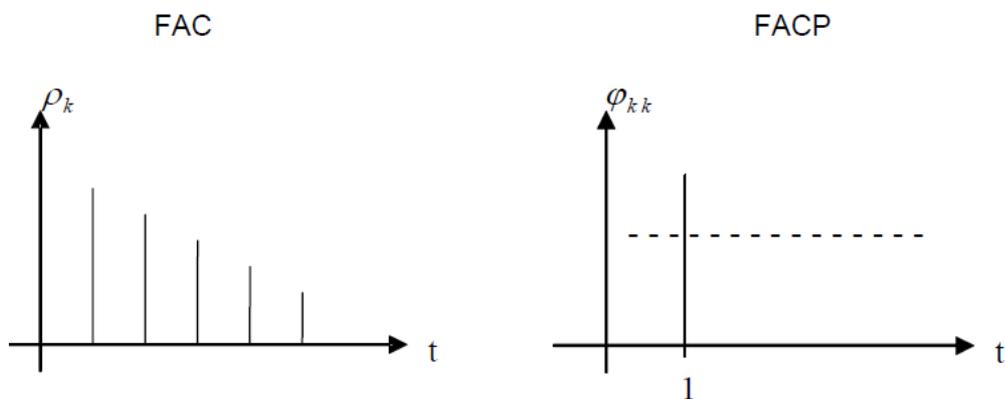


Figura 3.2 – Comportamento das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial de um modelo AR(1)

A função de autocorrelação (FAC) decai exponencialmente com ou sem alternância de sinal. Representa uma mescla de ondas senoides amortecidas e exponenciais. Já a autocorrelação parcial (FACP) mostrará um rápido corte significativo no atraso (*lag*), indicando a ordem p do modelo.

O **Modelo de médias móveis de ordem q (MA(q))** vem do fato de que Z_t é uma função soma algébrica ponderada das a_t , em movimento no tempo. Nesta expressão, MA (q) “ q ” indica a ordem do modelo e θ é um parâmetro.

$$\tilde{Z}_t = a_t + \theta_1 a_{t-1} + \dots + \theta_q a_{t-q} \quad (3.11)$$

$$\tilde{Z}_t = \theta(B)a_t \quad (3.12)$$

Os modelos, MA (1) e MA (2) são;

$$MA(1) \rightarrow \tilde{Z}_t = a_t + \theta_1 a_{t-1} \quad (3.13)$$

$$MA(2) \rightarrow \tilde{Z}_t = a_t + \theta_1 a_{t-1} + \theta_2 a_{t-2} \quad (3.14)$$

Com relação a estacionariedade, o processo é de ordem finita, o que leva a ser sempre estacionário e a série $\pi(B)$ deve convergir para $|B| < 1$ sendo $\pi(B) = \theta^{-1}B$.

Através das autocorrelações parciais, se identifica o modelo sendo que a função de autocorrelação fornece a ordem do modelo.

Autocorrelação apresentará um corte rápido no lag significativo, indicando a ordem do modelo, e a autocorrelação parcial decairá exponencialmente, caso todos os parâmetros sejam positivos, Figura 3.3. No caso contrário, formará uma senoide amortecida (Souza, 1991).

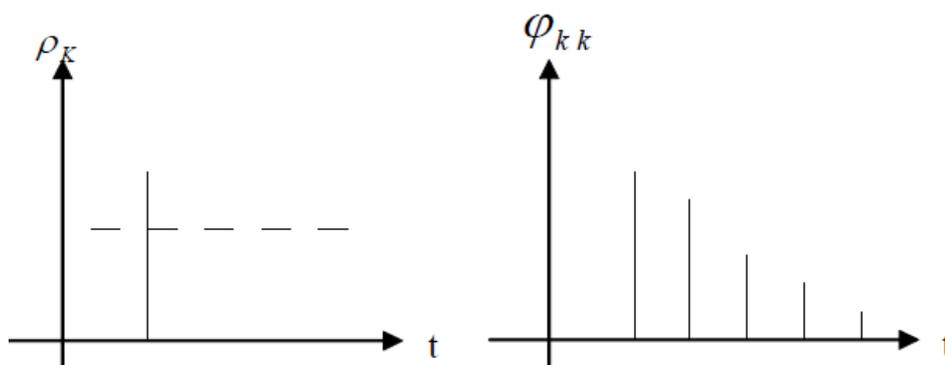


Figura 3.3 – Comportamento de uma função de autocorrelação parcial e autocorrelação de um modelo MA (1)

O modelo **ARMA de ordem p e q (autorregressivo de médias móveis, ARMA (p, q))** segue a características de que a série se comporta estacionária sem influência das componentes como: sazonalidades, tendência, ciclo e variáveis aleatórias. A modelagem de uma série temporal de dados originais diz que somente as séries temporais estacionárias na média e na variância são ajustadas, definidas pelas equações:

$$Z_t = c + \phi_1 Z_{t-1} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (3.15)$$

ou

$$Z_t - \phi_1 Z_{t-1} - \dots - \phi_p Z_{t-p} = c + e_t - \theta_1 e_{t-1} - \dots - \theta_q e_{t-q} \quad (3.16)$$

onde:

$\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_q$ são parâmetros autorregressivos

θ_1, θ_2 e θ_p , são parâmetros de médias móveis

e_t é um processo puramente aleatório com média zero e variância constante

C é um parâmetro relacionado à média da série.

Em relação a essas equações, há restrições para $p = 1$, $-1 < \phi_1 < 1$. Em $p = 2$, $-1 < \phi < 1$, $\phi_2 + \phi_1 < 1$ e $\phi_2 - \phi_1 < 1$. Em $p > 3$, igualmente para $q = 1$, $-1 < \theta_1 < 1$. Para $q = 2$, $-1 < \theta_2 < 1$, $\theta_2 + \theta_1 < 1$, $\theta_2 - \theta_1 < 1$ e $q = 3$, prevalecem condições mais complicadas (Makridakis et al., 1998).

Um operador de deslocamento retroativo B , isto é, B operando sobre Z_t possui o efeito de deslocar os dados para trás em período (Makridakis et al., 1998).

$$BX_t = X_{t-1} \quad (3.17)$$

$$B(BX_t) = B^2 X_t = X_{t-2} \quad (3.18)$$

e, em algumas vezes.

$$B^{12} = X_{t-12} \quad (3.19)$$

É através desta expressão (3.19) que o modelo ARMA (p, q) recebe esta denominação, modelo autoregressivo de média móvel de ordem p e q .

Com o emprego do operador B , a equação (3.19) pode ser escrita por:

$$(1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p) X_t = c + (1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q) e_t. \quad (3.20)$$

AR (p)
MA(q)

Os coeficientes $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$, e $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ são estimados para se ajustar à série temporal que está sendo modelada pelos métodos de mínimos quadrados, ou de máxima verossimilhança.

O modelo ARMA deve possuir seus erros distribuídos aleatoriamente com média zero e variância constante, apresentando-se como ruído branco, ou seja, sem correlação entre si (Teixeira e Fogliatto, 2004). Teoricamente, todos os coeficientes da autocorrelação de uma série de números aleatórios devem ser zero, pois os mesmos não guardam relação entre si. A distribuição amostral dos coeficientes de autocorrelação de um conjunto de amostras, retiradas de uma população de números aleatórios pode ser aproximada por uma curva normal de média zero e desvio padrão de $1/\sqrt{n}$. Espera-se que 95% das n amostras de coeficientes de autocorrelação de uma série aleatória estejam entre $\pm 1,96/\sqrt{n}$. Se não for este o caso, a série provavelmente não é de ruído branco segundo, Makridakis, et al. (1998).

Uma maneira de verificação dos coeficientes de autocorrelação dos resíduos da aplicação do modelo ARMA é o teste de Ljung-Box conhecido como teste de portmanteau, estatisticamente reconhecido como "Q". Este teste segue uma distribuição χ^2 com $k-p-q$ graus de liberdade.

$$Q(K) = n(n + 2) \sum_{k=1}^S \frac{p_k^2}{(n-k)} \quad (3.21)$$

onde:

n é o número de observações da série

S é o número de autocorrelações entre os erros considerados

p é a função de autocorrelação amostral

k o número de defasagens dos erros autocorrelacionados (Lima, 2007).

Considera-se de forma geral que o valor de S seja igual a 24 ($S = 24$), ou seja, testar a significância conjunta das 24 primeiras autocorrelações. O valor de S deve ser utilizado como número de graus de liberdade da distribuição χ^2 .

Quando nem a função de autocorrelação nem a função de autocorrelação parcial caem bruscamente a zero, o uso do modelo ARIMA é recomendado. Conforme Bueno (2008), uma maneira prática de distinguir os possíveis modelos é dada por meio da função da autocorrelação (FAC) e a função de autocorrelação parcial (FACP). Conforme Quadro 3.1.

Modelo	FAC	FACP
ARMA $(p, 0)$	Decaimento gradativo.	Decaimento brusco, após defasagem p .
ARMA $(0, q)$	Decaimento brusco, após defasagem q .	Decaimento gradativo.
ARMA (p, q)	Decaimento gradativo, com onda senoidal amortecida, após a defasagem $(q - p)$.	Decaimento gradativo, com onda senoidal amortecida, após a defasagem $(p - q)$.

Quadro 3.1 – Comportamento das Funções FAC e FACP para modelos estacionários

Os processos $AR(p)$, $MA(q)$ e $ARMA(p, q)$ apresentam a função de autocorrelação FAC com características especiais. No procedimento de identificação do modelo aos dados observados os seguintes procedimentos são úteis:

- a) um processo $AR(p)$ tem FAC que decai de acordo com exponenciais e/ou senoides amortecidas, infinita em extensão;
- b) um processo $MA(q)$ tem FAC finita, no sentido que ela apresenta um corte após o “lag” q ;
- c) um processo $ARMA(p, q)$ tem FAC infinita em extensão, a qual decai de acordo com exponenciais e/ou senoides amortecidas após o “lag” $q - p$.

Para cada modelo, deve-se escolher um modelo que descreva o processo estocástico. Estas observações serão úteis no procedimento de identificação do modelo dos dados observados.

3.3.1 Modelos não estacionários (ARIMA (p,d,q))

Os modelos ARIMA “Auto-Regressive Integrated Moving Average Model” ou modelo auto-regressivo integrado de médias móveis são modelos estatísticos lineares para análise de séries temporais.

Os modelos ARIMA baseiam-se na ideia de que uma série temporal não estacionária poder ser modelada a partir de diferenciações e da inclusão de um componente autoregressivo e de um componente média móvel (BRESSAN, 2004). Parte-se da ideia de que séries temporais envolvidas na análise são geradas por um processo estocástico estacionário, cuja natureza pode ser representada a partir de um modelo matemático.

Os termos autorregressivos correspondem a defasagens da série transformada, ou seja, série estacionária induzida por diferenciação e as médias móveis correspondem a defasagens dos erros aleatórios. O termo “integrado” refere-se ao processo de diferenciação da série original para torná-la estacionária.

Na prática os processos encontrados são raramente estacionários, o que nos leva a encontrar algum tipo de operador que, por transformações matemáticas, transforme o conjunto de dados em estacionários, ou seja, tem que se encontrar um operador que produza, a partir de Z_t , um processo estacionário.

Dada uma série Z_t , a primeira diferença de Z_t é definida como:

$$\Delta Z_t = Z_t - Z_{t-1} \quad (3.22)$$

A segunda diferença é:

$$\Delta^2 Z_t = \Delta(Z_t - Z_{t-1}); \quad (3.23)$$

$$\Delta^2 Z_t = Z_t - 2Z_{t-1} + Z_{t-2}. \quad (3.24)$$

A d-ésima diferença de Z_t é definida por:

$$\Delta^d Z_t = \Delta(\Delta^{d-1} Z_t). \quad (3.25)$$

Estas séries são não estacionárias homogêneas, mas, com um número finito de diferenças, consegue-se estacionarizá-las.

Dada Z_t , não estacionária, se $W_t = \Delta^d Z_t$, for estacionária pode-se escrever W_t por um modelo ARMA(p, q), como:

$$\phi(B)W_t = \theta(B)a_t \quad (3.26)$$

e Z_t segue um modelo ARIMA (p, d, q) $\phi(B)\Delta^d Z_t = \theta(B)a_t$. Como $\Delta Z_t = (1 - B)Z_t$, vem que $\Delta = 1 - B$ e a equação (3.26) pode ser representada como:

$$\phi(B)(1 - B)^d Z_t = \theta(B)a_t. \quad (3.27)$$

É suficiente tomar $d = 1$ ou 2 diferenças para que $\Delta^d Z_t$ seja estacionária na maioria dos casos.

Pela Tabela 3.1, são apresentados os comportamentos das funções de autocorrelações e autocorrelações parciais, juntamente com as estimativas de cada parâmetro de um modelo genérico ARIMA (p, d, q).

Tabela 3.1 – Comportamento das FAC e da FACP de um processo ARIMA (p, d, q)

Ordem	(1, d, 0)	(0, d, 1)
comportamento de ρ_k comportamento de ϕ_{kk}	decai exponencialmente somente $\phi_{11} \neq 0$	somente $\rho_1 \neq 0$ decaimento exponencial dominante
estimativas iniciais	$\phi = \rho_1$	$\rho_1 = -\frac{\theta}{1 + \theta^2}$
região de disponibilidade	$-1 < \phi < 1$	$-1 < \theta < 1$

Ordem	(2, d, 0)	(0, d, 2)
comportamento de ρ_k	mistura de exponenciais ou ondas senóides amortecidas	somente $\rho_1 \neq 0$ e $\rho_2 \neq 0$
comportamento de ϕ_{kk}	somente $\phi_{11} \neq 0$ $\phi_{22} \neq 0$	dominada por misturas de exponenciais ou senóides amortecidas
estimativas iniciais	$\phi_1 = \frac{\rho_1(1-\rho_2)}{1-\rho_1^2},$ $\phi_2 = \frac{\rho_2 - \rho_1^2}{1-\rho_1^2}$	$\rho_1 = \frac{-\theta_1(1-\theta_2)}{1+\theta_1^2+\theta_2^2},$ $\rho_2 = \frac{-\theta_2}{1+\theta_1^2+\theta_2^2}$
região de admissibilidade	$\begin{cases} -1 < \phi_2 < 1 \\ \phi_2 - \phi_1 < 1 \\ \phi_2 + \phi_1 < 1 \end{cases}$	$\begin{cases} -1 < \theta_2 < 1 \\ \theta_2 - \theta_1 < 1 \\ \theta_2 + \theta_1 < 1 \end{cases}$
Ordem	(1, d, 1)	
comportamento de ρ_k comportamento de ϕ_{kk}	decai exponencialmente após o lag 1 demoninada por decaimento exponencial após o lag 1	
estimativas iniciais	$\rho_1 = \frac{(1-\phi\theta)(\phi-\theta)}{1+\theta^2-2\phi\theta}, \rho_2 = \rho_1\phi$	
região de admissibilidade	$-1 < \phi < 1, -1 < \theta < 1$	

Fonte. Morettin & Toloj, 2006.

3.4 Modelos Box & Jenkins

A metodologia de Box & Jenkins refere-se ao método sistemático de identificação, ajuste, checagem e uso de modelos autorregressivos integrados de média móvel ou, simplesmente, modelos ARIMA. Através dessa metodologia, Box e Jenkins (1976) propuseram a utilização de séries temporais em áreas de estudos meteorológicos através das observações da velocidade do vento, precipitação pluviométrica e outras séries de interesse climático.

O uso de modelos ARIMA é uma abordagem poderosa na solução de muitos problemas de previsão, pois pode proporcionar previsões extremamente acuradas,

de séries temporais (Box & Jenkins, 1970). O método é apropriado para séries de comprimento médio a longo, de no mínimo, 50 e, preferencialmente 100 observações. Um dos processos fundamentais na metodologia de Box-Jenkins é transformar uma série não estacionária em uma estacionária, cuja análise é mais simples, pois se obtém, dessa maneira, a estabilidade dos parâmetros estimados.

Como os dados são coletados sequencialmente ao longo do tempo, espera-se que apresentem correlação seriada no tempo. Os modelos Box & Jenkins, genericamente conhecidos por ARIMA, são modelos matemáticos que visam captar o comportamento da correlação seriada ou autocorrelação entre os valores da série temporal e, com base nesse comportamento realizam-se previsões futuras. A estratégia utilizada para a construção de modelos, pela metodologia Box & Jenkins, é baseada no ciclo iterativo, Figura 3.4, no qual a estrutura do modelo é formada pelos próprios elementos da série.

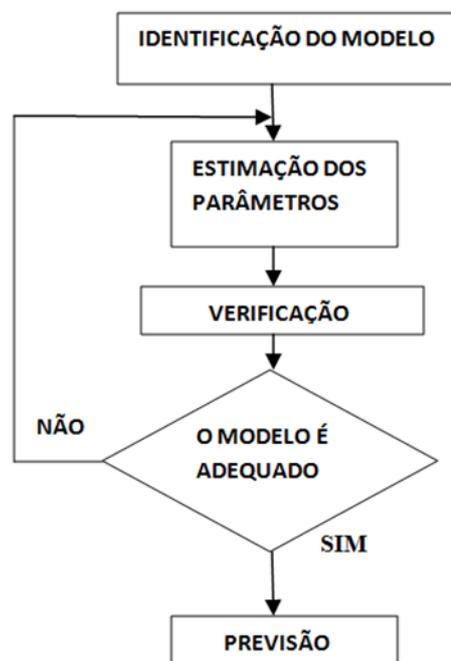


Figura 3.4 – Fluxograma do ciclo iterativo de Box & Jenkins

O **processo de identificação** consiste em determinar quais dos filtros ARIMA (p , d , q) compõem a série, bem como quais são suas respectivas ordens. A

realização do processo de identificação necessita, portanto, de outros instrumentos, que são a função de autocorrelação (FAC) e a função de autocorrelação parcial (FACP), que juntamente com o gráfico da série original podem dar uma primeira indicação da violação da condição de estacionariedade juntamente com a informação sobre o número de parâmetros a serem estimados.

A **estimação dos parâmetros do modelo ARIMA (p, d, q)** significa a obtenção de “p” estimativas para os parâmetros, e “q” estimativas para os parâmetros $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ e da variância do ruído, σ_a^2 , ou seja, $p + q + 1$, parâmetros no vetor $\epsilon = (\phi, \theta, \sigma_a^2)$, além do número de diferenças necessárias para estabilizar a série. As características da FAC e da FACP em cada caso é que indicarão qual o possível processo gerador da série. Aqui, quando $d > 0$, supõe-se que $\mu = 0$, caso contrário, μ é incluído como mais um parâmetro a ser estimado, e terão $p + q + 2$ parâmetros. Seja $\eta = (\phi, \theta)$. Uma vez determinados os valores de p, d e q , passa-se para a estimação dos p parâmetros ϕ , dos q parâmetros θ e da variância σ_ϵ^2 do modelo, que pode ser por mínimos quadrados e por máxima verossimilhança conforme mostram Morettin & Tolo (2006).

A seleção dos modelos se dará com base no critério penalizador AIC citado em Maddala (1992), construído com base na variância estimada ϵ_t , no tamanho da amostra e nos valores de p e q .

A etapa de **verificação da metodologia de Box & Jenkins** consiste em verificar se o modelo identificado e estimado é adequado. Esta etapa é baseada nos resíduos do modelo estimado, $\hat{\epsilon}_t$, os quais devem comportar-se como um ruído branco, isto é, com média zero e variância constante. Em particular, seus coeficientes de autocorrelação devem ser estatisticamente iguais a zero.

Após o pesquisador haver selecionado entre os modelos estimados aquele que se mostrar mais adequado realizam-se as previsões da série Y_t (variável de saída) em instantes de tempo posteriores àquele delimitado pela amostra.

3.4.1 Critérios penalizadores de uma seleção para escolha do método

Morretin e Tolo (2006) aconselham a se identificar não somente um único modelo na etapa de identificação, mas sim vários, os modelos mais significativos para que posteriormente possa ser escolhido o melhor. Para isto, usam-se os critérios penalizadores AIC (Akaike Information Criteria) e SBC (Schwartz Bayesian Criteria), que buscam encontrar modelos parcimoniosos, ou seja, aqueles com menor número de parâmetros. Dessa forma, o AIC sugere escolher o modelo cujas ordens p e q minimizam o critério, onde $\hat{\sigma}_{p,q}^2$ é o estimador da máxima verossimilhança de σ^2 para um modelo ARIMA (p,q) . Na equação abaixo se demonstra como é encontrado o AIC.

$$AIC(p, q) = \ln \hat{\sigma}_{p,q}^2 + \frac{2(p+q)}{N}; \quad (3.28)$$

Assim, minimizar corresponde a identificar as ordens p e q que equilibrem o comportamento.

Akaike (1970) e Schwarz (1978) sugerem minimizar o SBC (Schwartz Bayesian Criteria), onde num modelo ARMA este é dado por:

$$BIC(p, q) = \ln \hat{\sigma}_{p,q}^2 + (p+q) \frac{\ln N}{N} \quad (3.29)$$

onde $\hat{\sigma}_{p,q}^2$ é a estimativa de máxima verossimilhança da variância residual do modelo ARMA (p, q) .

3.5 Estruturação do banco de dados

Os dados diários, médias por município, disponibilizados pelos órgãos do Laboratório de Agrometeorologia da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária,

FEPAGRO-RS, pelo Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, e Estação Agroclimatológica de Pelotas Convênio Embrapa UFPel/INMET, foram transformados em médias mensais usando uma planilha de dados do Excel por meio da técnica de planilhas dinâmicas. Estas informações meteorológicas foram obtidas das estações climatológicas de trinta municípios do estado do Rio Grande do Sul apresentados na Tabela 3.2 para as séries diárias de insolação, radiação, temperatura mínima, temperatura média, temperatura máxima, velocidade média dos ventos e velocidade máxima dos ventos nos períodos compreendidos entre 1961 a 2008, totalizando 47 anos de informações.

No decorrer deste trabalho, foi possível obter os períodos compreendidos de 2008 a abril de 2012, dos mesmos órgãos citados, referentes às variáveis estudadas. Desta forma foi possível comparar os resultados previstos com os medidos e totalizaram 51 anos de informação.

Tabela 3.2 – Coordenadas geográficas das estações meteorológicas localizadas em 30 municípios do Rio Grande do Sul.

Coordenadas geográficas			
Municípios	Altitude (m)	Latitude (S)	Longitude (W)
Alegrete	121,00	29°41'47"	55°31'15"
Bagé	242,31	31°20'13"	54°06'21"
Bom Jesus	1047,50	28°40'10"	50°26'25"
Cachoeirinha	10,00	29°57'04"	51°05'38"
Caxias do Sul	759,60	29°10'25"	51°12'21"
Cruz Alta	472,50	28°38'21"	53°36'34"
Encruzilhada do Sul	432,00	30°32'28"	52°31'19"
Erechim	783,00	27°37'46"	52°16'33"
Ijuí	328,00	28°23'17"	53°54'54"
Iraí	247,10	27°11'45"	53°14'01"
Jaguarão	50,00	32°33'32"	53°23'20"
Júlio de Castilhos	514,00	29°13'26"	53°40'45"
Maquiné	12,00	20°40'30"	50°12'25"
Passo Fundo	684,05	28°13'39"	52°24'33"
Pelotas	13,00	31°47'00"	52°25'00"
Porto Alegre	10,00	30°01'53"	51°13'19"
Quaraí	112,00	30°23'16"	56°27'03"
Rio Grande	2,46	32°01'44"	52°05'40"

Coordenadas geográficas			
Municípios	Altitude (m)	Latitude (S)	Longitude (W)
Santa Maria	95,00	29°41'25"	53°42'42"
Santa Rosa	360,00	27°51'50"	54°25'59"
Santa Vitória do Palmar	24,01	33°31'14"	53°21'47"
Santana do Livramento	328,00	30°50'18"	55°36'56"
São Gabriel	124,00	30°20'27"	54°19'01"
São Luiz Gonzaga	245,11	28°24'27"	55°01'18"
São Borja	96,00	28°39'44"	56°00'15"
Taquari	76,00	29°48'15"	51°49'30"
Torres	4,66	29°21'34"	49°43'39"
Uruguaiana	62,31	29°45'23"	57°05'12"
Vacaria	954,60	28°33'00"	50°42'21"
Veranópolis	705,00	28°56'14"	51°33'11"

Quando se trabalha com dados do Meio Ambiente não é raro encontrar séries de dados históricos incompletos ou mal especificados, ainda mais quando se trata de períodos muito grandes de tempo, como é o caso dos disponíveis para esta tese. Tendo em vista esta problemática, realizou-se o preenchimento das lacunas existentes nas informações diárias das tabelas obtidas dos órgãos citados. Para que este procedimento fosse possível, foi necessário antes realizar a ordenação desses dados diários que se encontravam fora da ordem cronológica. As informações em branco que não foram registradas na série ou dados nulos que por motivos desconhecidos deveriam ter sido registrados nas datas previstas e não constaram no registro, ficaram na forma de lacunas em aberto para posteriormente serem analisadas as condições das predições, observando-se a inclusão dos anos bissextos. No final, obteve-se um banco com informações diárias ordenadas no tempo, fornecidas pelos órgãos oficiais, mais as lacunas em branco para cada uma das variáveis conforme o período que foi registrado e os períodos que deixaram de ser registrados. Para aqueles municípios que apresentaram estas lacunas, alguns com espaços de tempo considerável de registros, optou-se pelo uso de métodos de previsão de séries temporais, objetivando, dentro do possível, preencher as falhas faltantes e aqueles dados discrepantes que poderiam comprometer os resultados finais.

Segundo Hilborn & Walters (1992), as séries incompletas devem ser tratadas como séries temporais utilizando os modelos de Box e Jenkins que se baseiam na identificação de modelos a partir do comportamento da série histórica. O uso destes modelos constitui uma ferramenta rápida e eficiente para análise de séries de dados (Stergiou & Christou, 1996; Stergiou, Christou & Petrakis, 1997) e mais comumente para fazer previsões em curto prazo (Mendelssohn, 1981; Fogarty, 1988; Stergiou, 1989; Lloret, Lleonart & Solé, 2000). Diante disso, a fim de completar a série que permitisse a aplicação dos modelos preditivos, apresentam-se os resultados de uma aplicação da técnica proposta por Box & Jenkins (1976) para estimar os valores ausentes na série de dados.

3.5.1 Aplicação da técnica proposta por Box & Jenkins no preenchimento dos dados ausentes do banco de dados.

A metodologia de análise das séries temporais foi baseada em modelos univariados, nos quais as características das séries de interesse são explicadas exclusivamente a partir do comportamento da própria série. Como citado antes ao utilizar uma série temporal, o pesquisador tem por objetivo estudar o processo gerador da série, fazer previsões em função dos seus valores passados e descrever o comportamento da série.

Uma previsão baseada na modelagem com séries temporais assume-se que o futuro é semelhante ao passado (Xavier, 2009) e assim, as variações eólica e solar podem se repetir no futuro.

A análise de séries temporais através de modelos univariados tem dois objetivos básicos:

- Identificação das principais características e propriedades da série;
- Previsão de dados.

No preenchimento dos dados faltantes na série representada agora pela média mensal no lugar de médias diárias, foram realizadas previsões de dados para o preenchimento das lacunas em aberto dos dados inexistentes. Para isso, as previsões utilizadas para preencher as lacunas nas séries faltantes não ultrapassaram 12 meses. A interpolação temporal foi realizada seguindo a técnica de

Box & Jenkins. Esses modelos podem ser expressos por modelos Auto-Regressivo (AR) e modelos de Médias Móveis (MA) ou pela união desses modelos.

As observações deverão ser espaçadas em intervalos iguais no tempo e deverá ter no mínimo 50 observações anteriores para que seja possível a aplicação da metodologia de Box & Jenkins. A série de dados deverá ser estacionária, ou seja, são mantidas as mesmas características estocásticas (processos controlados por leis probabilísticas), ao longo da série. A série pode ser não estacionária homogênea, ou seja, a amostra pode se tornar homogênea por processo de diferenciação ou integração. Quando a série se apresenta não estacionária, o modelo ARMA passa a ser o modelo não estacionário ARIMA (Auto-Regressivo Integrado de Médias Móveis) (p, d, q) .

$$W_t = \phi_1 W_{t-1} + \dots + \phi_p W_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3.30)$$

em que,

$$W_t = \Delta^d Z_t \quad (3.31)$$

onde:

p representa a ordem da parte autoregressiva;

q a ordem da parte de média móvel; e

d o número de diferenciações realizadas para estacionarizá-la.

Um exemplo serve como explanação da metodologia de estimativa dos dados faltantes na série. Diga-se que os dados inexistentes fossem os de janeiro, fevereiro e março de 1975. Para estimar o valor de janeiro de 1975, utilizaram-se os dados anteriores, no mínimo 50 valores sem interrupção da série, com o mesmo espaçamento de tempo (mês), no modelo ARIMA. Ou seja, de outubro de 1970 a dezembro de 1974, tomam-se no mínimo 50 valores. Isto não significa que não se possa ter mais valores. Para o mês de fevereiro, utilizou-se a série anterior, contando com o mês de janeiro estimado anteriormente, e assim sucessivamente. Este procedimento foi realizado para todas as variáveis existentes na estruturação dos dados disponível (insolação, radiação, temperatura máxima, temperatura

mínima, temperatura média, velocidade máxima do vento, velocidade média do vento) de cada município do estado do Rio Grande do Sul.

Na modelagem foram utilizadas as seguintes etapas metodológicas.

3.5.2 Etapas de identificação do modelo (Ver, Figura 3.4 – Fluxograma do ciclo iterativo de Box & Jenkins).

- Determinar se a série é estacionária: através do gráfico da função de autocorrelação (FAC) e de seu intervalo de confiança;
- Determinar a ordem da parte autorregressiva (p) sugerida por meio do gráfico da função de autocorrelação parcial, FACP;
- Determinar a ordem da parte de média móvel (valor de q) por meio do gráfico da função de autocorrelação (FAC);
- Seguir o conceito de parcimônia que, invariavelmente, não permite assumir valores de p , d e q maiores que 2;
- Proceder à observação dos critérios AIC e BIC se mais de um modelo for aprovado.

Após o preenchimento das lacunas, isto é, dos dados ausentes nas séries estudadas, conforme o emprego da metodologia Box & Jenkins através dos modelos ARIMA, construiu-se um banco de dados com médias mensais para cada município descrito na Tabela 3.2 com as informações disponíveis para as variáveis insolação, radiação, velocidades dos ventos média e máxima e temperaturas mínima, máxima e média. No entanto, ainda em alguns municípios havia uma falta significativa de dados. Para que as informações fossem mais criteriosas optou-se por trabalhar com dados regionais no lugar dos dados por municípios. Logo, o estado do Rio Grande do Sul foi estratificado em nove regiões que foram representadas pelos seus respectivos municípios, conforme a descrição no Quadro 3.2.

REGIÕES DO RS	MUNICÍPIOS POR REGIÃO
Central – R8	Santa Maria, Cruz Alta, Julio de Castilho
Fronteira Oeste – R6	Alegrete, Bagé, São Borja, São Gabriel, Uruguaiana, Quaraí, Santana do Livramento
Litoral Norte – R4	Torres, Maquiné
Metropolitana – R1	Porto Alegre, Cachoeirinha
Nordeste – R7	Ijuí, São Luiz Gonzaga, Santa Rosa
Planalto Nordeste – R9	Iraí, Passo Fundo, Erechim
Serrana – R3	Bom Jesus, Caxias do Sul, Vacaria, Veranópolis
Sul – R5	Pelotas, Rio Grande, Santa Vitoria do Palmar, Jaguarão
Vale do Rio Pardo e Taquari – R2	Encruzilhada do Sul, Taquari

Quadro 3.2 – Regiões do Rio Grande do Sul com seus respectivos municípios

Escolheu-se as nove Regiões Funcionais de Planejamento que fazem parte dos COREDEs (Conselhos Regionais de Desenvolvimento) do estado do Rio Grande do Sul, por representarem melhor a distribuição dos municípios para análise posterior, Figura 3.5. Nesta divisão, considerou-se apenas a distribuição geográfica; logo não foi levada em conta a topografia, a ocupação do solo e as correntes atmosféricas predominantes.

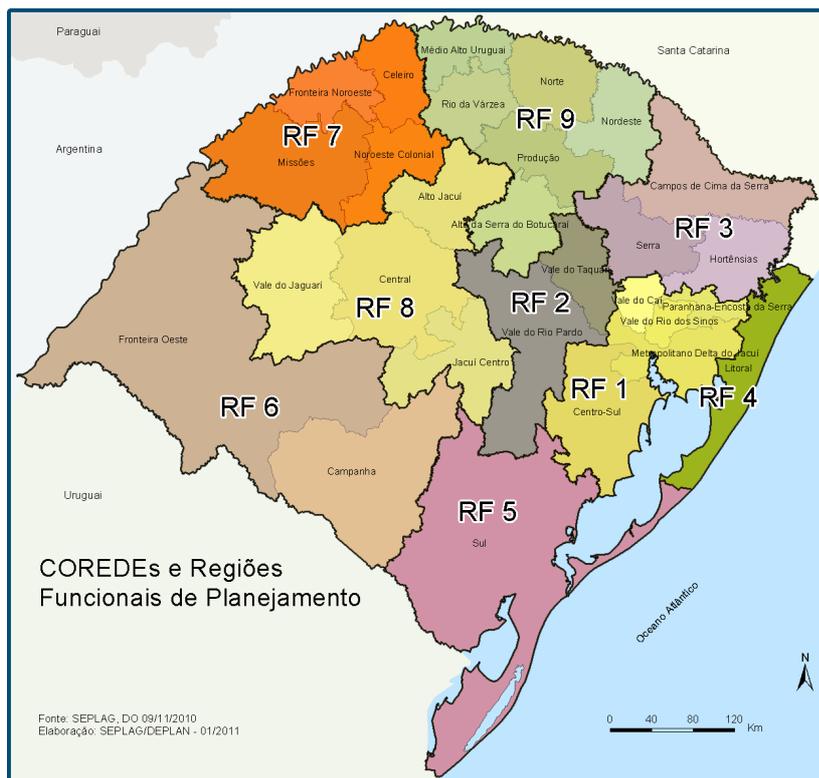


Figura 3.5 – Distribuição das Regiões Funcionais do Rio Grande do Sul

Fonte: SEPLAG/RS-2011.

O estado do Rio Grande do Sul situa-se no extremo meridional do Brasil entre as latitudes aproximadas de 27 a 34° S e longitudes aproximadas de 50 a 57° O. Possui uma área total (entre área terrestre e de águas interiores) de 282.184 km². As maiores altitudes são encontradas no Nordeste do Estado chegando aproximadamente a 1300 m em alguns pontos (Berlato & Cordeiro, 2005).

No intuito de fazer uma análise geral dos dados climáticos e suas variações existentes para o estado do Rio Grande do Sul decidiu-se por uma reorganização inicial dos dados por região. Nunca se perdeu de vista que se desejava conhecer um pouco mais sobre o comportamento destas variáveis com relação à utilização do potencial solar eólico em geração de energia elétrica e tentar fazer previsões de curto período de tempo.

A aplicação do desvio padrão, neste trabalho foi utilizada para verificar a variabilidade na distribuição dos dados. O desvio padrão é a medida de dispersão

mais usada que pode ser considerada como uma medida de variabilidade dos dados numa distribuição de frequências.

A variância tende a ser um número grande e de difícil manejo e o seu valor sai dos limites dos valores observados a partir de um conjunto de dados. Portanto, o desvio padrão, que é a raiz quadrada da variância, pode ser usado para descrever a quantidade de dispersão na distribuição da frequência.

$$\text{Desvio padrão} = S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (3.32)$$

As funções de desvio-padrão fornecem uma medida útil sobre a consistência dos dados e podem melhorar a viabilidade na análise de previsão ou a tendência.

3.6 Os métodos X11 e X11-ARIMA

O método X11-ARIMA, método este utilizado nos diversos institutos estatísticos em vários países, foi aplicado nesta tese para se obter uma série pura sem o efeito da sazonalidade e da tendência e desta forma, verificar o comportamento da mesma sem a interferência destes componentes nas séries de insolação, radiação e série eólica.

Aqui se descreve como se originou a fusão dos dois métodos X11 e X11-ARIMA e como são utilizados estes modelos na melhoria do ajustamento sazonal dos valores situados na extremidade da série. Objetivou-se aqueles valores mais recentes, por meio do alongamento da série e desta forma diminuindo os propensos erros que podem ocorrer sem estes ajustamentos sazonais.

Em 1973 iniciou-se nas Estatísticas do Canadá, sob supervisão de Estela B. Dagum, uma pesquisa com vistas à obtenção de um método que suprisse alguns dos problemas do método mais utilizado até então - o método do Census X11 desenvolvido em 1967 nos EUA. Este foi chamado ARIMA no X11.

O método X11 consiste em sucessivas filtragens pela aplicação de filtros lineares, partindo da premissa que a série original pode ser decomposta em quatro componentes: a tendência (T_t), que traduz o comportamento da variável sobre o

tempo; o ciclo (C_t), que traduz os movimentos oscilatórios de longo prazo; a sazonalidade (S_t), que se refere às oscilações em torno da tendência de periodicidade inferior ao ano; a componente errática ou residual (I_t), que traduz os movimentos irregulares, explicadas por causas fortuitas ou desconhecidas, para onde são remetidos os movimentos não explicados pelos componentes anteriores para qual se assume um comportamento aleatório.

Quando esses componentes da série temporal são independentes podem ser relacionadas de forma aditiva:

$$Z_t = T_t + C_t + S_t + I_t \quad (3.33)$$

onde:

T_t é a tendência

C_t é o ciclo

S_t é a sazonalidade

I_t é o componente residual.

Se os diferentes componentes são interdependentes o modelo é multiplicativo:

$$Z_t = T_t * C_t * S_t * I_t \quad (3.34)$$

O método das médias móveis constitui-se numa base importante do método de dessazonalização X11. Estes são filtros lineares que permitem eliminar ou atenuar as oscilações associadas a algumas frequências. Chama-se média móvel de coeficiente $[\theta_i]$ o operador designado por $M(X_t)$. O valor no instante t da série bruta é substituído por uma média ponderada dos p valores da série, o valor atual e os f valores futuros da série.

$$M(X_t) = \sum_{i=-p}^{+f} \theta_i X_{t+i} \quad (3.35)$$

Um algoritmo simples de dessazonalização pode ser representado por quatro etapas (Ladiray & Quenneville, 2001):

1. Estimacão tendência-ciclo por média móvel: busca reproduzir na melhor forma possível a componente tendência-ciclo procurando eliminar o componente estacionário e reduzir ao máximo a componente irregular.

$$C_t = M_0(X_t) \quad (3.36)$$

2. Estimativa da componente estacionária-irregular:

$$(S_t + I_t) = X_t - C_t \quad (3.37)$$

3. Estimativa da componente estacionária por média móvel em cada mês:

$$S_t = M_1[(S_t + I_t)] \quad (3.38)$$

e conseqüentemente

$$I_t = (S_t + I_t) - S_t \quad (3.39)$$

4. Estimativa da série corrigida de variaes estacionárias:

$$A_t = (C_t + I_t) = X_t - S_t \quad (3.40)$$

O método X11 emprega o princípio do algoritmo simples acima descrito, utilizando médias móveis escolhidas e testadas na estimacão dos componentes através de interaes computacionais.

O procedimento X11-ARIMA consiste basicamente em (Escria, 1995):

- modelar a série original por um processo integrado, autorregressivo, média móvel (ARIMA) do tipo Box-Jenkins;
- extrapolar as observaes não ajustadas em cada extremo da série a partir do modelo ARIMA que melhor se ajustem ao comportamento da série original em termos de previsão;
- ajustar sazonalmente a série estendida, com a utilizao dos filtros do método do Census X11.

O procedimento X11 ARIMA assume que os principais componentes da série temporal seguem um modelo aditivo ou multiplicativo. A estimativa é feita com diferentes tipos de médias móveis fornecidas sequencialmente em treze passos que são:

- rácio ou relação entre a série original e a série resultante da aplicação de uma média móvel centrada de 12 termos (2×12) à série original, obtendo-se uma primeira estimativa dos componentes sazonal e irregular (SI);

- média móvel ponderada de 5 termos (3×3 moving average) dos SI para cada mês separadamente, obtendo-se uma estimativa dos fatores sazonais;

- cálculo de uma média móvel centrada de 12 termos (2×12) da série dos fatores sazonais obtidos anteriormente. Repete-se seis vezes o primeiro e o último valor da média disponível para obter-se os valores iniciais e finais. Ajustar os fatores para somarem 12 (ou 0 na sazonalidade aditiva), para qualquer período de 12 meses através do cálculo entre a série dos fatores e a série de média móvel obtido anteriormente;

- rácio entre a série dos SI (sazonalidade irregular) e a série dos fatores sazonais calculada anteriormente com vistas à obtenção de uma estimativa da componente irregular;

- cálculo de um desvio padrão móvel de 5 anos relativamente às estimativas do componente irregular e teste do valor do componente irregular do ano central contra $2,5\sigma$. Retira-se então os valores acima de $2,5\sigma$ como extremos e recalcula-se o desvio padrão móvel de 5 anos. Atribui-se um peso 0 aos elementos da série dos componentes irregulares que se encontram acima de $2,5\sigma$ e um peso 1 aos que se encontram no intervalo $(1,5\sigma, 2,5\sigma)$;

- para os dois primeiros anos, utilizam-se os limites do desvio padrão calculados para o terceiro ano, para os dois últimos, utiliza-se o valor do antepenúltimo ano. Para substituir um valor extremo no início ou no fim da série utiliza-se o valor da média entre o rácio vezes o peso e os três valores do rácio respeitante aquele mês com peso total mais próximo;

- cálculo de uma média móvel ponderada de 5 termos aos rácios SI, com valores extremos substituídos, para cada mês em separado, obtendo-se uma nova estimativa dos fatores sazonais;

- cálculo de uma média móvel centrada de 12 termos (2×12) da série dos fatores sazonais obtidos anteriormente. Para obter os valores iniciais e finais, repete-

se seis vezes o primeiro e o último valor da média disponível. Ajustam-se os valores para somarem 12 (ou 0 na sazonalidade aditiva), em qualquer período de 12 meses através do cálculo do rácio entre a série dos fatores e a série de média móvel obtida anteriormente (repetição do passo 3 mas com novos fatores);

- cálculo do rácio entre a série original e os fatores sazonais obtidos anteriormente, obtendo-se uma primeira estimativa da série dessazonalizada;

- cálculo de uma média móvel de Henderson de 9, 13 ou 23 termos à série ajustada sazonalmente, dividindo-se a série tendência-ciclo resultante à série original, obtendo-se uma nova estimativa dos SI;

- cálculo de uma média móvel ponderada de 7 termos aos rácios SI obtidos anteriormente para cada mês separadamente, obtendo-se uma nova estimativa dos fatores sazonais;

- cálculo de uma média móvel centrada de 12 termos da série dos fatores sazonais obtidos anteriormente. Para obter os valores iniciais, repetem-se seis vezes o primeiro e o último valor da média disponível. Ajustar os fatores para somarem 12 (ou 0 na sazonalidade aditiva), em qualquer período de 12 meses através do cálculo do rácio entre a série dos fatores e a série de média móvel obtida anteriormente (repete passo 3 com novos fatores sazonais);

- rácio entre a série original e os fatores sazonais, obtendo-se a série ajustada sazonalmente.

A inclusão do modelo ARIMA no X11 é fundamental quando a estrutura sazonal se altera rapidamente e de forma aleatória. Como a série é estendida, os filtros aplicados às observações dos extremos são semelhantes aos aplicados às observações centrais o que, de acordo com Dagum (1982), minimiza a magnitude das revisões dos fatores sazonais em termos de erro quadrático médio (o X11-ARIMA é um *minimum mean square error seasonal adjustment method*). Temos assim que o X11-ARIMA é um procedimento iterativo, obtendo-se as estimativas por aplicação sucessiva dos filtros.

O objetivo principal do método ARIMA no X11 é a melhora do ajustamento sazonal dos valores situados nas extremidades da série, principalmente, aqueles mais recentes, por meio do alongamento da mesma. Sem o referido alongamento (alisamento), o ajustamento sazonal das observações situadas nos extremos da série fica mais propenso a erros e, por consequência, a maiores revisões no futuro, uma vez que estas observações não podem ser submetidas aos mesmos filtros

simétricos como ocorre nas observações situadas na parte central da série. Para não ocorrer estes fatos, e suprimir os erros que estes extremos possam causar é que se faz o estudo dos extremos (Arita e Dias 2000).

3.7 Análise espectral de séries temporais – Estudo do ciclo na série

Neste estudo procura-se através da análise espectral identificar períodos com certa potência espectral detectável que possibilite verificar possíveis variações significativas no potencial solar ou eólico e sua implicação para geração de energia e na variação do clima. Para isto, elimina-se a tendência das séries para reduzir a potência espectral a frequências baixas e aplica-se uma rotina de transformada rápida de Fourier (FFT). Caso essas senoides, após serem somadas, reproduzam a função cíclica original, tem-se, assim, a Transformada de Fourier dessa função cíclica. Para testar as significâncias estatísticas de diferentes faixas de frequência desses picos utilizou-se algum dos testes existentes na literatura. No apêndice BB encontra-se de forma sucinta o método de análise de Fourier conforme Aguirre, 1996.

3.7.1 Análise espectral através do método de análise de Fourier

Dada uma série qualquer, pode-se obter através de técnicas de probabilidade o espectro de potência e a função de autocorrelação. A autocorrelação é conhecida na análise de séries temporais no domínio do tempo e, em princípio, pode ser estimada sem necessidade de se recorrer à Transformada de Fourier.

A função de densidade espectral contém informações sobre a série original obtida sob o domínio da frequência, e a informação fornecida através dessa análise indica quais as frequências que explicam as maiores proporções de variância total da série. Para validar os resultados, devem ser utilizados testes de significância estatística de diferentes faixas de frequência.

Com o emprego da técnica de análise espectral e uma rotina computacional desenvolvida no MATLAB\copyright, (ver apêndice B) pode-se identificar ciclos entre as variações aleatórias ou ruídos na análise da insolação ou da radiação solar que permita, entre outras, avaliar e interpretar variações sazonais, amplitude, fase e o período de um determinado ciclo.

Outro fato é associar as possíveis variações cíclicas da insolação ou radiação solar, caso sejam encontradas, ao efeito na interpretação dos valores obtidos em avaliações medidas do potencial solar, e as prováveis consequências no aproveitamento do potencial energético. Por exemplo: caso o pesquisador tenha verificado medidas da radiação solar e verificado que ela apresenta um determinado valor médio em período de três ou quatro anos. O pesquisador pode entender que esta medida em sua média deva ocorrer nos próximos anos sem variações significativas. Mas, caso seja encontrado ciclos na série estudada e estes ciclos apresentem valores máximo e mínimo em período de 11, 12 anos ou outro período qualquer significativamente possível de influenciarem tanto no clima como no potencial energético, certamente o pesquisador pode estar tendo diferenças em suas medidas resultando em uma minimização ou maximização dos seus resultados. A consequência disso pode resultar em diferentes médias de radiação em watts por metro quadrado. Sabe-se que pequenas variações do potencial solar, por menor que sejam, podem resultar em consequências diretas na variação climática. Conhecer a fase e a potência do ciclo em que se está querendo estimar e verificar se seu valor tende ao máximo ou ao mínimo no momento da medida é de suma importância quando se quer aproximar os dados medidos aos dados reais.

3.8 Estudo sobre a estabilidade da série e possíveis quebras estruturais.

O propósito deste estudo é determinar peculiaridades no comportamento do potencial eólico de uma determinada região com relação à estabilidade e verificar possíveis quebras estruturais na série. Caso seja verificada esta quebra estrutural, uma comparação antes e depois da quebra ou quebras estruturais, o estudo estatístico geral das peculiaridades da série eólica, será necessária. A quebra é uma alteração no nível da série, algo que alterou a evolução da mesma.

3.8.1 Teste para estabilidade

Os testes CUSUM e CUSUMQ são exemplos de testes que se revelam adequados para determinar a respectiva localização temporal das quebras estruturais. A possibilidade de ocorrência de instabilidade considerada por estas estatísticas fica a dever ao comportamento dos resíduos gerados por estimações recursivas. Porém a sua principal aplicação, no nosso caso, é a de testar a hipótese de estabilidade dos coeficientes da série cronológica eólica em estudo.

O interesse central em investigar possíveis instabilidades e concluir sobre os fatores que desestabilizam a série. Além disso, podem-se fazer inferências antes e após quebras no sentido de identificar a mudança de comportamento e as características que permaneceram, tendo assim como analisar o comportamento global e seus movimentos e características após quebra estrutural.

Os Testes CUSUM e CUSUMQ têm por base a soma acumulada dos resíduos recursivos, mais precisamente:

$$S_t = \sum_{j=k+1}^t w_j \times \frac{1}{\hat{\sigma}}, \quad (3.41)$$

onde:

$$\hat{\sigma} = \frac{\sum_{j=k+1}^t (W_j - \bar{W})^2}{T-K-1} \quad \text{e} \quad \bar{W} = \sum_{j=k+1}^t \frac{W_j}{T-K}$$

Definindo S_t como anteriormente e considerando a sequência $\{S_t: t = 1, \dots, T\}$, é possível demonstrar que o parâmetro S_t tem um valor esperado de zero, na hipótese nula de estabilidade dos coeficientes da regressão. A respectiva variância é aproximadamente igual ao número da soma dos resíduos, uma vez que cada termo tem variância igual a um e são independentes. Se a hipótese alternativa de instabilidade for válida, então os parâmetros do modelo são constantes apenas até ao momento t , significando que daí em diante S_t tenderá para um valor esperado igual a zero.

O teste é elaborado ao gerar um gráfico de S_t ao longo do tempo t , traçando duas linhas que ligam os pontos;

$$[K, \pm\alpha(T - K)^{\frac{1}{2}}] \quad \text{e} \quad [K, \pm 3\alpha(T - K)^{\frac{1}{2}}] \quad (3.42)$$

Com a possibilidade de calcular limites de confiança para os resíduos. Os valores do parâmetro α que correspondem diferentes níveis de significância estatística podem ser encontrados no artigo de Brown et al. (1975). Será então possível obter um intervalo de confiança que permita abranger por completo a evolução dos resíduos da série cronológica em estudo. A hipótese nula de estabilidade será rejeitada se S_t ultrapassar os limites daquele intervalo de confiança.

Um indicador alternativo consiste em utilizar a soma acumulada dos quadrados dos resíduos recursivos, obtendo-se assim, um novo teste, o CUSUMQ (Soma acumulada dos quadrados dos resíduos recursivos) que também permite comprovar desvios não aleatórios desde a sua linha de valor médio.

$$S_t^* = \frac{\sum_{j=k+1}^t W_j^2}{\sum_{j=k+1}^T W_j^2} \quad \text{para } t = k + 1, \dots, T \quad (3.43)$$

Nota-se que o denominador da estatística (3.43), S_t^* , contém já todas as observações em oposição ao numerador que depende do método recursivo. Dada a independência dos resíduos, cada um dos termos da estatística (3.43) não representa mais do que a soma acumulada de uma distribuição de χ^2 com um grau de liberdade. Consequentemente, a esperança, $E[S_t^*]$ é aproximadamente igual a $(t - K)/(T - K)$.

A construção do teste CUSUMQ é idêntica à do teste CUSUM. Os limites apropriados em termos de banda para um dado nível de significância para a estatística CUSUMQ são fornecidos por $E[S_t^*]$ previamente definido. A diferença entre o valor limite da banda e S_t^* pode ser dissecada ao longo do tempo num gráfico. Para isso, constroem-se duas retas paralelas a $E[S_t^*]$ com um fator de distanciamento igual a $\pm c_0$. O valor do parâmetro c_0 é condicionado por três fatores: o número de observações (T), o número de parâmetros (K) e o nível de significância (α). Estas retas representam o limite superior e inferior e não podem ser ultrapassadas por S_t^* , de forma a concluir-se pela estabilidade dos parâmetros. O

teste não detecta quebras quando os regressores são estacionários com média nula, uma vez que são sempre ortogonais em relação a qualquer quebra.

Posteriormente é introduzido o teste de Lanne et al (2002) para verificar à série quanto à estacionariedade, possível quebra e calculando a possível data da quebra. O resultado de Lanne et al. (2002) propõe um teste de raiz unitária com data de quebra desconhecida, onde, a hipótese nula reside na presença de raiz unitária. Caso seja sugerida uma quebra estrutural num determinado ano, é recomendado que se faça uma análise global, uma análise antes deste período e após esta data.

3.9 Generalidades da insolação

A insolação é entendida como o número de horas de sol descoberto acima do horizonte (Ferreira, 1948). Estas horas têm a ver com a posição da Terra dentro do sistema solar e seus deslocamentos diário e anual. Na bibliografia meteorológica geral, insolação é a radiação solar incidente (*World Meteorological Organization*, 1966, 1983; Huschke, 1959). O conceito de horas de sol efetivo acima do horizonte está associado ao brilho do disco solar em relação à luz difusa do fundo celeste, que pode ser relacionado com a radiação visível mais do que com a energia radiada em diferentes comprimentos de onda. Embora ambos os aspectos sejam inseparáveis (*World Meteorological Organization*, 1983), podem também ser o número de horas, nas quais, durante um dia, o sol é visível e que não esteja oculto por nuvens ou fenômenos atmosféricos de qualquer natureza (Mota, 1975; Varejão-Silva, 2006). Na literatura o brilho solar é comumente denominado de insolação.

Em numerosas atividades humanas a insolação é um fator climático importante existindo uma alta correlação com os outros componentes da radiação solar como radiação global, direta e difusa (comentado no capítulo 2). Não existe, porém uma definição de céu descoberto e, em uma hora de sol efetivo, a Terra recebe uma quantidade de energia muito maior no verão do que no inverno (Ferreira, 1948).

3.9.1 Instrumentos para registro da insolação

Heliógrafos são instrumentos utilizados para observar o número de horas de brilho solar em determinada localidade e dia do ano. O heliógrafo de Campbell–Stokes tem sido o registrador mais utilizado consistindo de uma esfera com vidro de 10 cm de diâmetro, montada concentricamente numa secção de concha metálica de 73 mm de raio, de tal forma que capta os raios solares oriundos diretamente do disco solar. Estes raios solares são constituídos basicamente pela radiação solar direta de onda-curta e não do espalhamento da atmosfera, que é indireta, e são concentrados sobre um cartão de papel ou fita graduada, colocada em umas ranhuras existentes na concha (*World Meteorological Organization, 1983*). O registro é feito em horas de queima localmente marcando o período em que a radiação direta chega numa quantidade suficiente para queimar o cartão. A concha do heliógrafo é instalada sempre para o lado do polo de cada hemisfério da terra e de acordo com a estação do ano. As ranhuras de suporte dos cartões (ou fitas) de registro permitem que estes, sejam colocados de forma diferente nas mudanças sazonais.

Dos meados de abril ao fim de agosto, as curvas de fitas curtas são usadas e dos meados de outubro ao fim de fevereiro são utilizadas as fitas curvas longas enquanto as retas são usadas nos demais dias do ano. A concentração dos raios solares sobre os cartões provoca queimaduras contínuas ou interrompidas, conforme o céu esteja limpo ou com nebulosidade. Qualquer instrumento que se utilize do mesmo método de medição da insolação não realiza uma medição verdadeira do tempo de sol efetivo (*World Meteorological Organization, 1983*). No entanto, o heliógrafo continua sendo um instrumento importante pela facilidade de manutenção e durabilidade e por não conterem peças móveis.

O heliógrafo de Jordan, pouco usado, é uma caixa cilíndrica dividida em duas metades que se instalam com o eixo paralelo ao eixo de rotação da Terra e com o plano médio na direção norte-sul. Existe uma fenda ou orifício de cada lado do plano médio da caixa, em alturas diferentes por onde entram os raios solares. Pela manhã entra por um lado e pela tarde entra pelo outro. Diariamente, antes de o sol nascer, coloca-se dentro da caixa um papel sensível ao feixe luminoso, que registrará

diariamente duas faixas paralelas, contínuas ou interrompidas, correspondentes à manhã e à tarde. A graduação no papel é horária (Ferreira, 1948).

3.10 Síntese do capítulo

Foram mostradas, neste capítulo, as metodologias utilizadas nesta tese para se obter informações sobre a sazonalidade, tendência e o ciclo em séries históricas de insolação, radiação e em séries eólicas, com o intuito de melhorar o conhecimento sobre o comportamento destas variáveis no clima e suas consequências para o aproveitamento energético. O emprego do modelo X11-ARIMA para obter a dessazonalização e desta forma estudar a série pura sem interferência da sazonalidade e da tendência é fundamental quando se deseja conhecer o comportamento da mesma com vistas à previsão. Também, foi comentada a estruturação do banco de dados utilizando-se da metodologia Box & Jenkins através dos modelos ARIMA, objetivando completar os valores ausentes na série.

A utilização das técnicas de Fourier, através da análise espectral, visa à obtenção dos possíveis ciclos em uma série e desta forma, busca seus aspectos peculiares inferindo possíveis variações que informem o quanto para mais ou para menos as medidas realizadas, sem o conhecimento do ciclo, possam superestimar ou subestimar dos valores informados nos registros das estações meteorológicas. Neste caso, resultaria no comprometimento dos resultados.

O teste para estabilidade, que verifica a respectiva localização temporal das quebras estruturais em uma série, mostra onde houve alteração no nível da série, algo que alterou a evolução da mesma. Desta maneira, estuda-la em seus aspectos antes e depois da quebra e quais as possibilidades de recorrência em um futuro próximo ajuda a entender em que momento isto ocorre e suas implicações para o clima, e pressuposto, na geração de energia. Tentar entender um pouco mais as variações climáticas e suas consequências para a humanidade, nos seus aspectos gerais, é de grande contribuição em conjunto com as outras análises realizadas nesta tese.

No próximo capítulo, são tratados os resultados obtidos pelas técnicas apresentadas acima nas diferentes séries com suas respectivas teorias aplicadas ao clima e estimativas de previsão.

4 RESULTADOS OBTIDOS COM AS METODOLOGIAS APLICADAS NAS SÉRIES TEMPORAIS.

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicabilidade das diferentes metodologias em séries temporais (comentados no capítulo terceiro) para obtenção dos componentes, tendência, sazonalidade e ciclo das variáveis, insolação (brilho solar), radiação solar e velocidade média dos ventos e análise da quebra estrutural na variável eólica, utilizando como modelo para esta pesquisa, o estado do Rio Grande do Sul. Também, são demonstrados os resultados das análises referentes ao estudo do fenômeno conhecido como escurecimento global ou *global dimming*, para verificar se ocorreu no Estado e quais os valores percentuais médios. Tal fenômeno ocorreu a nível global nas décadas entre 1970 e 1990. Os dados diários utilizados nesse trabalho foram transformados em médias mensais, abrangendo um período entre janeiro de 1961 e dezembro de 2008.

A finalidade da aplicação das diversas metodologias em séries temporais foi determinar peculiaridades no comportamento cíclico do potencial solar e eólico do Estado que levassem a estimar possíveis variações que pudessem afetar o desempenho das atuais ou futuras centrais de geração de energia elétrica comprometendo o seu rendimento e comparar estes resultados com alguns dos dados medidos disponíveis, entre 2008 e 2012. Procurou-se isolar o mais possível às causas que pudessem ser apenas temporárias ou regionais, tais como: desmatamento, aglomerados urbanos, nebulosidade, estradas, queimadas, relevos, proximidade do mar e poluição do ar. Com relação ao ciclo procurou-se através da análise espectral identificar períodos com certa potência no espectro detectável que possibilitasse analisar possíveis variações significativas no potencial solar e sua implicação nas mensurações na estimativa do potencial solar.

Quando se fala em viabilizar a utilização da energia solar e eólica como fonte de energia, seja em uma região ou em algum local específico, é necessário primeiramente verificar a disponibilidade deste potencial no local em questão.

Geralmente são as estações meteorológicas que fornecem os registros e através da análise dos dados históricos de um período recomendado de, no mínimo, trinta anos (Assis e al., 1996). Para isto são realizados os tratamentos estatísticos dos dados através de modelos que avaliam o comportamento das variáveis envolvidas no estudo. É exatamente nestas séries que esta tese se interessa, para especular as variações cíclicas naturais com origem no sistema solar, nada tendo a ver com fenômenos de origem do planeta Terra.

Com base nas informações da série histórica, os modelos de previsão podem ser ajustados às séries para estimar previsões da insolação e velocidades médias dos ventos com relação às componentes, tendência, sazonalidade e ciclo. O fato de se entender o comportamento destas importantes variáveis climatológicas é fundamental para o desenvolvimento de inúmeras atividades humanas. Além do mais, ela serve, como um elemento meteorológico de recurso muito importante, em virtude da sua alta correlação com todos os outros componentes da radiação solar como a radiação global (direta e difusa) que podem influenciar as mudanças de temperaturas e conseqüentemente nas velocidades dos ventos.

4.2 Análises descritivas para obtenção das componentes tendência e sazonalidade da variável insolação

Nesta seção são apresentados os resultados da insolação no que tange à tendência e à sazonalidade. Este estudo se baseou nos registros históricos do banco de dados reconstruído, levando-se em conta todas as regiões descritas no capítulo três. Desta forma, os resultados obtidos contribuirão para revelar o comportamento da série em estudo mostrando o comportamento global da variável, de forma que as decisões a serem tomadas possam ser subsidiadas em bases científicas, obtendo o melhor planejamento, permitindo a alocação racional e otimizada do estudo.

4.2.1 Análise descritiva

Aqui são apresentadas as estatísticas descritivas para a insolação como um suporte para a realização das inferências a serem investigadas. O intuito destas inferências é o de conhecer o comportamento das variáveis no decorrer do período analisado e verificar os índices para a presença de heterocedasticidade condicional na série (volatilidade). A “heterocedasticidade” apresenta-se como uma forte dispersão dos dados em torno da amostra e o termo “volatilidade” se utiliza normalmente para designar o grau de oscilações de uma determinada variável ao longo do tempo.

A Quadro 4.1, abaixo apresenta algumas estatísticas descritivas da série insolação em estudo.

Estatísticas Descritivas	
Estatística	Valor de Teste
Média	6,30
Desvio Padrão	1,27
Coefficiente da Variação	20,16%
Assimetria	0,088
Curtose	2,56
Jarque-Bera	5,39

Quadro 4.1 – Estatística descritiva das variáveis para a insolação

Com a análise descritiva das variáveis para a insolação, verificou-se pelo coeficiente de variação que a média da variável é considerada representativa, visto que esse valor expresso em percentual está muito abaixo de 50% e pode ser utilizado para trabalhos futuros. Ao analisar o valor da assimetria e da curtose, observou-se que a assimetria é diferente de zero e que a curtose é de 2,56. Não há, porém, indicativo para investigar a existência de volatilidade ou de *clusters* de volatilidade.

A assimetria retrata a forma de distribuição dos dados, em que há um coeficiente igual a 0,088 para a insolação, ou seja, como a média é maior do que a mediana, tem-se uma assimetria positiva à direita. A curtose de 2,56 indica que a série de insolação apresenta uma distribuição platicúrtica (valor da curtose < 3) em relação à curva de distribuição normal (Figura 4.1). A série exibe sinais de heterocedasticidade e de agrupamento de volatilidade juntamente com as outras medidas descritivas e com a representação gráfica do comportamento da insolação ao longo do período de análise.

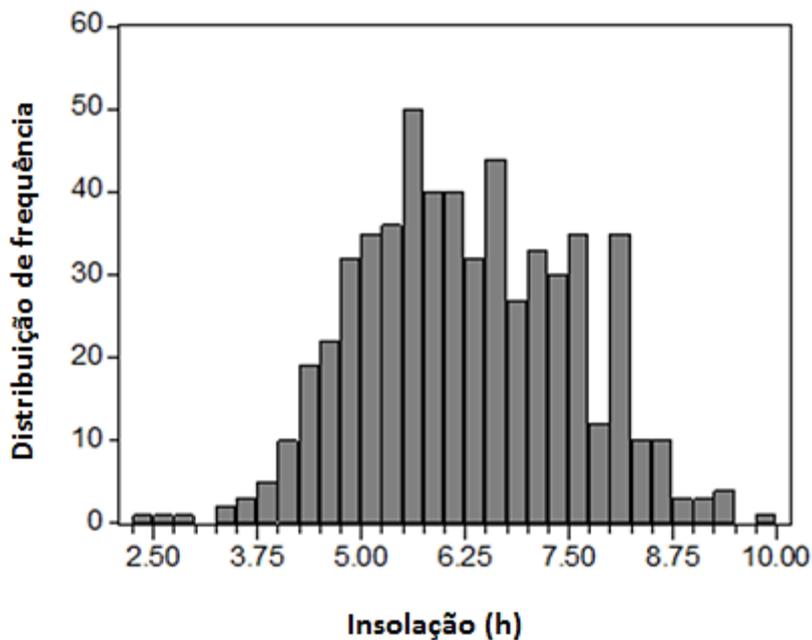


Figura 4.1 – Histograma para série de insolação (insolação (h) x distribuição de frequência)

4.2.2 Teste de Normalidade – Jarque-Bera

O pressuposto da normalidade precisa ser atendido com o objetivo de oferecer confiabilidade aos testes estatísticos, uma vez que, em geral, eles se baseiam na distribuição normal do termo residual.

O teste Jarque–Bera é uma estatística que tem a vantagem de ser simples na sua operacionalização. Em termos de compreensão, ela é intuitiva e dependente de dois parâmetros, assimetria e curtose, que podem ser calculados a partir dos dados históricos. A estatística Jarque-Bera (JB) possui um poder de teste elevado, não erra na presença de normalidade. As hipóteses a serem testadas são:

H_0 : Assimetria = 0 e curtose = 3, então a série é dita normal;

H_1 : Assimetria \neq 0 e curtose \neq 3, então a série é dita não-normal.

O teste da Regra de decisão baseia-se nos coeficientes de assimetria e curtose. Se *p*-valor for maior que o nível de significância de 5% cujo valor crítico é 5,99, se aceita a hipótese nula de normalidade.

Pode-se observar pelo valor do teste para insolação que a variável não segue uma distribuição normal, dado que seu valor calculado de 5,39 é menor do que o valor tabelado de 5,99. Isso também pode ser constatado visualmente na Figura 4.1.

Conforme demonstrado pela Figura 4.2, a série da insolação não apresenta uma tendência definida, mas uma grande variação no decorrer dos anos.

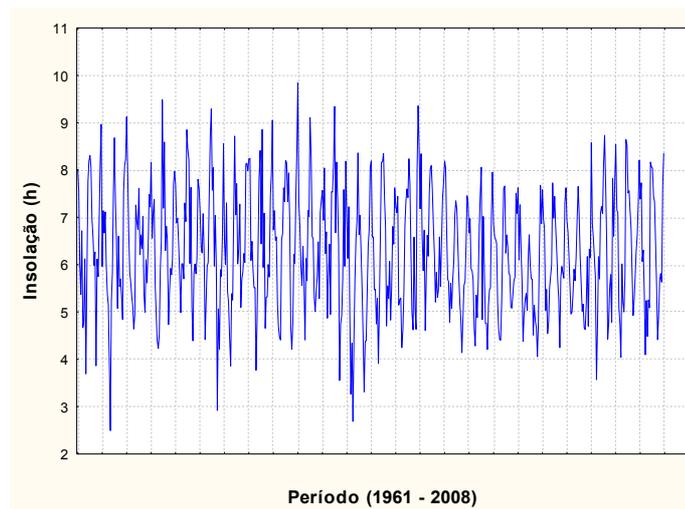


Figura 4.2 – Série histórica original de insolação média mensal (período x insolação)

4.2.3 Tendência

Para testar a tendência na série usou-se o teste de Wald. Os testes de verificação da tendência têm como pressuposto a independência dos dados. Assim torna-se necessário testar a existência de correlação entre os dados para assegurar a confiabilidade dos resultados do teste de tendência. Este é um dos testes recomendados pela organização mundial de meteorologia (Sneyers, 1990). O resultado está representado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Teste de Wald

Variável	p-valor	Decisão
Insolação	0,538	Aceita a H_0

A tendência da série é definida como sendo a “direção” da série temporal e, portanto, relaciona-se ao incremento ou ao decréscimo dos valores da mesma com o decorrer do tempo. Pelo teste Wald pode-se observar que não existe tendência, já que o $p\text{-valor} > 0,05$, o que pode ser confirmado pelo gráfico da série original (Figura 4.2).

Mesmo, não havendo a componente de tendência, procura-se investigar a presença do efeito da sazonalidade. Como a série apresenta uma grande oscilação em sua estabilidade, utilizou-se a série diferenciada para realizar os estudos sobre a sazonalidade da série. Dessa forma, fez-se o gráfico da função de autocorrelação da primeira diferença (Figura 4.3), sugerindo efeitos de sazonalidade. Outra informação importante a respeito das características da série em estudo é que a série não possui inclinação em relação ao eixo das abscissas, indicando que não há uma dependência da sazonalidade sobre a tendência.

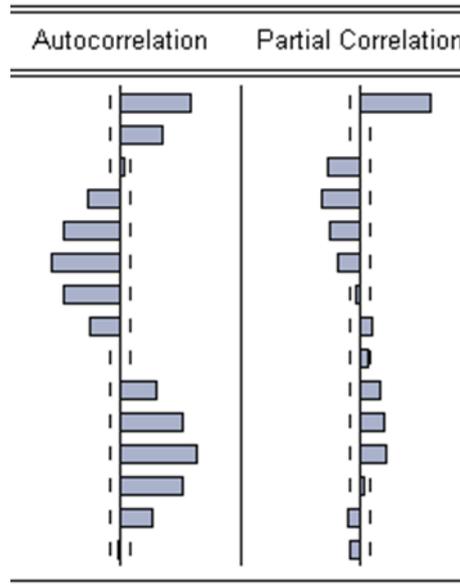


Figura 4.3 – Correlograma da série insolação

4.2.4 Sazonalidade

O estudo da sazonalidade em séries temporais de acordo com Pierce (1980) possui dois objetivos: a análise da própria sazonalidade e a remoção da sazonalidade da série para posteriormente estudá-la em seus demais aspectos. Submeteu-se, então, a série histórica aos testes: F e Kruskal Wallis para verificação da sazonalidade estável. Os resultados destes testes estão representados na Tabela 4.2 onde pode-se observar que a série possui sazonalidade estável na variável insolação. Para a identificação da presença de sazonalidade realizaram-se os seguintes testes:

1) Teste F para sazonalidade estável é um teste paramétrico, feito com base em uma análise de variância de um fator (mês) sobre a série livre de tendência por meio da estatística F.

2) O teste de Kruskal-Walis para sazonalidade estável é um teste não paramétrico, usado para testar a diferença entre meses, baseado no ponto médio de cada mês dos postos assinalados a cada estimativa final da série livre de tendência. Se existe pouca sazonalidade estável e muito móvel, significa que não será possível identificar o padrão sazonal.

Tabela 4.2 – T estes para verificação da sazonalidade

	Teste F Sazonalidade Estável		Teste Sazonalidade Estável Kruskal		Teste de Friedman
	F	p-valor	T1	p-valor	p-valor
Insolação	972,388	0.000	332,167	0,000	0,0001

Nota: as significâncias adotadas para a sazonalidade estável foram 0,1% (0,001) e Kruskal Wallis 1% (0,01).

Como pode ser observado na Tabela 4.2, conclui-se que a série apresenta sazonalidade, tanto pelo teste de Kruskal Wallis como pelo teste de Friedman.

Para isolar os efeitos locais ou regionais, o ajustamento das séries originais retirando-lhes os efeitos sazonais visou à obtenção de uma nova série, com menor dispersão que a original, permitindo uma avaliação mais correta da fase do período analisado, o que assume um papel fundamental nas definições cíclicas das decisões sobre a insolação, adequado em tempo útil.

Assim, a correção de variações sazonais assume particular importância na análise das flutuações conjunturais, uma vez que permite avaliar o que na variação das séries se deve a uma variação tendencial. Este fato poderá exigir uma intervenção, ou a uma mera variação de natureza conjuntural, que se ajustará automaticamente.

4.2.5 Resultados dos ajustes com o modelo X11 ARIMA

Nesta etapa do trabalho utilizou-se o método X11 ARIMA. A escolha deste modelo foi em função de obter-se uma série pura retirando os efeitos sazonais, locais e de tendência da mesma, ou seja, dessazonalizar a série, obtendo-se assim uma nova série pura permitindo uma melhor avaliação do comportamento do período analisado. Se o caso fosse modelar a sazonalidade o modelo SARIMA poderia ser utilizado.

No procedimento X11-ARIMA como descrito no capítulo terceiro, consiste basicamente em:

- modelar a série original por um processo integrado, autoregressivo, média móvel (ARIMA) do tipo Box-Jenkins;
- extrapolar as observações não ajustadas em cada extremo da série a partir do modelo ARIMA que melhor se ajustem ao comportamento da série original em termos de previsão;
- ajustar sazonalmente a série estendida, com a utilização dos filtros do método do Census X11.

A série insolação da Figura 4.2 mostra uma flutuação sazonal clara. O objectivo da decomposição sazonal, em geral, é derivar estimativas de sazonalidade, tendência/ciclo e componentes irregulares que compõem a série. A componente sazonal pode ser usada para calcular uma série ajustada, isto é, uma estimativa da série depois de remover as flutuações sazonais.

Na Tabela 4.3 Abaixo, encontra-se a Série Original de Insolação. O modelo leva em consideração a análise de toda a série histórica. Obteve-se assim, os valores da série temporal tabelado a partir de 2003 com previsão de estimativas para os períodos entre 2009 a 2012 e a respectiva média de cada mês obtido nos ajustes sazonais.

Tabela 4.3 – Série Original Insolação (total: 673,241; média = 6,233; desvio padrão = 1,21)

Anos\Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	6,756	6,280	5,657	5,265	4,249	5,725	5,962	5,821	5,714	7,308	7,625	7,441
2004	6,756	6,280	5,657	5,265	4,249	5,725	5,962	5,821	5,714	7,308	7,625	6,928
2005	6,698	6,190	5,546	4,957	4,993	5,393	5,903	5,660	6,145	6,967	7,651	7,056
2006	6,172	5,612	5,015	5,164	4,664	4,632	5,194	6,171	4,702	6,330	6,148	8,574
2007	6,868	6,571	6,152	5,746	3,572	4,711	6,168	5,699	7,075	7,236	7,080	8,096
2008	8,733	7,801	6,478	4,427	4,770	5,524	5,790	4,786	7,819	6,602	7,753	8,542
2009	7,154	7,094	5,107	4,760	4,043	6,015	5,220	5,003	5,758	8,642	8,517	7,514
2010	7,561	7,143	6,747	5,784	4,928	5,238	5,729	6,273	6,630	7,288	8,206	7,387
2011	7,729	6,068	6,306	5,335	4,095	5,242	4,485	5,253	5,092	8,167	8,066	8,039
2012	7,451	7,328	6,522	5,574	4,417	4,951	5,672	5,811	5,631	7,637	8,358	7,637
Média	7,236	6,676	5,948	5,224	4,414	5,270	5,569	5,609	6,063	7,353	7,711	7,731

O teste baseado na ANOVA – análise de variância dos rácios, SI (Tabela 4.4), obtidos na sequência de tratamentos dos dados, é um dos primeiros testes a ser efetuado. O valor da estatística F, que testa a existência de sazonalidade estável, resulta do quociente de duas variâncias: a variância entre meses, devida aos fatores sazonais e a variância residual, devida à componente irregular.

Tabela 4.4 – Teste da sazonalidade estável

	S. Quadr.	Graus Lib.	Média Quad.	F	p-valor
Entre os meses	29874,09	11	2716	31,50	0,000
Residual	8277,13	96	86		
Total	38151,22	107			

A Tabela 4.4 mostra que existem variações altamente significativas na troca na série. Como esperado, o teste para sazonalidade estável é também altamente significativo, conforme a Tabela ANOVA. Estes dados são relatados especificamente na Tabela 4.5, abaixo.

Tabela 4.5 – Finais não modificados, rácios, SI – (sazonalidades irregulares)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	110,17	102,86	92,98	86,763	70,134	94,46	98,216	95,75	93,84	119,94	125,14	121,11
2004	110,17	102,86	92,98	86,763	70,134	94,46	98,216	95,75	93,84	119,94	125,14	113,90
2005	110,30	102,10	91,45	81,565	81,790	88,01	96,169	92,31	100,66	115,05	127,77	119,53
2006	106,19	98,07	88,94	92,667	84,453	84,31	94,529	111,77	84,43	112,40	107,80	148,02
2007	116,50	109,33	100,44	92,211	56,468	73,52	95,101	87,01	107,09	108,76	105,81	120,50
2008	129,79	116,23	97,05	66,819	72,579	84,71	89,578	74,81	123,55	105,61	125,49	139,91
2009	118,70	119,03	86,52	81,098	68,987	102,38	88,249	83,62	94,81	139,94	135,55	117,65
2010	116,51	108,47	101,12	85,789	72,593	77,05	84,539	93,29	99,80	111,37	127,53	116,92
2011	124,42	99,26	104,40	89,111	68,677	87,77	74,678	86,64	83,14	131,67	128,52	126,58
2012	116,24	113,58	100,73	86,068	68,315	76,85	88,227	90,56	88,02	119,39	131,19	

Com rácio entre a série original e os fatores sazonais, obtém-se a série ajustada sazonalmente. É nesta fase ainda que é extrapolada a série original com o modelo ARIMA que é ajustada à série original corrigida por fatores iniciais com os valores extremos substituídos por valores ajustados.

Os pesos limites associados às componentes irregulares para obtenção dos valores implementados tais como, detecção dos valores atípicos e ponderação das componentes irregulares foram: os valores da componente irregular que superam em valor absoluto 2,5 do desvio padrão levam zero, os que em valor absoluto estão entre 1,5 e 2,5 do desvio padrão são considerados moderadamente atípicos e devem ser amortecidos, e os que em valores absolutos são menores que 1,5 desvio padrão recebe o peso 1.

A Tabela 4.6 mostra os valores finais de reposição para relações extremas. As relações extremas são também aquelas consideradas atípicas, na série em estudo. As atipicidades estão entre os anos de 2006 a 2010, em meses diversificados. Estas atipicidades são visualizáveis na Figura 4.4.

Tabela 4.6 – Valores finais de reposição para relações extremas

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2004	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2005	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2006	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	30,79	100,00	100,00	0,00
2007	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	93,69	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2008	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	69,42	0,00	100,00	100,00	98,82
2009	100,00	100,00	78,98	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	100,00
2010	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2011	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	90,19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2012	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

A Figura 4.4 mostra os diferentes componentes plotados (classificados) por mês na qual se pode verificar o comportamento puro da série. Ficam assim excluídos os efeitos de tendência, a qual é quase inexistente, e o da sazonalidade. Sendo assim, tem-se o comportamento real da série.

Ainda, na mesma (Figura 4.4) exibe a sazonalidade ajustada como um estudo de tendência e ciclo, onde mais uma vez é comprovada a inexistência de ambos. Em vermelho mostram-se as componentes tendência/ciclo e em azul, a série final ajustada sazonalmente. Claramente, existe uma variabilidade da série ajustada em torno da estimativa tendência/ciclo.

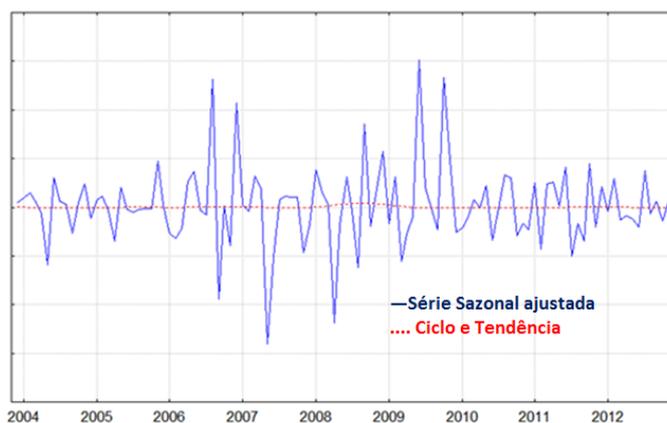


Figura 4.4 – Série sazonal ajustada

A Tabela 4.7 representa mês a mês as mudanças sazonais na série inicial e a Tabela 4.8 mostra as mudanças mês a mês nas séries ajustadas, sazonalmente.

Tabela 4.7 – Mudança mensal mês a mês na série inicial

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004	-9,2031	-7,05	-9,92	-6,92	-19,31	34,75	4,13	-2,37	-1,84	27,90	4,34	-9,13
2005	-3,3278	-7,58	-10,41	-10,62	0,71	8,03	9,46	-4,12	8,56	13,38	9,82	-7,77
2006	-12,5332	-9,08	-10,62	2,97	-9,68	-0,70	12,12	18,82	-23,82	34,64	-2,88	39,47
2007	-19,8988	-4,33	-6,37	-6,61	-37,84	31,91	30,93	-7,62	24,16	2,27	-2,15	14,36
2008	7,8612	-10,67	-16,96	-31,67	7,74	15,80	4,83	-17,34	63,36	-15,56	17,43	10,17
2009	-16,2467	-0,83	-28,02	-6,78	-15,08	48,79	-13,21	-4,16	15,10	50,08	-1,45	-11,78
2010	0,6301	-5,53	-5,55	-14,27	-14,81	6,31	9,37	9,49	5,70	9,92	12,59	-9,97
2011	4,6229	-21,49	3,92	-15,39	-23,24	28,00	-14,44	17,12	-3,06	60,39	-1,24	-0,33
2012	-7,3119	-1,65	-11,00	-14,53	-20,77	12,09	14,56	2,46	-3,10	35,63	9,43	

Tabela 4.8 – Mudanças mês a mês nas séries finais ajustadas sazonalmente

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004	-1,57	0,01	-0,44	-1,89	-9,45	21,578	-5,98	2,42	-8,16	9,46	1,375	-10,48
2005	3,54	-0,38	-0,50	-5,11	13,79	-2,266	-1,47	1,40	-0,19	-1,70	5,942	-10,49
2006	-6,92	-2,36	1,03	10,25	2,48	-9,246	0,32	26,84	-31,87	18,53	-7,636	34,54
2007	-15,41	2,44	7,48	1,00	-28,76	21,094	17,37	-1,58	9,02	-9,16	-8,719	10,18
2008	12,97	-3,93	-4,69	-24,67	26,03	5,442	-4,71	-13,62	43,00	-26,19	8,542	7,88
2009	-13,30	7,37	-18,24	4,99	1,88	32,218	-19,21	-2,82	3,06	26,36	-9,750	-11,66
2010	3,98	2,80	5,97	-1,56	4,03	-7,980	4,43	7,38	-1,99	-12,22	3,018	-6,74
2011	8,25	-14,48	14,93	-2,03	-5,67	10,011	-17,43	11,79	-6,84	23,43	-9,418	5,18
2012	-4,02	7,49	-3,17	-0,64	-2,12	-3,467	10,96	-3,96	-5,03	2,53	1,285	

Finalmente, a Tabela 4.9, representa a estimação final dos fatores sazonais, da tendência ciclo, da componente irregular e da série ajustada sazonalmente. A componente tendência - ciclo refere-se à parte remanescente de uma série quando já foram extraídas da mesma as componentes sazonais e irregulares. Como os fatores sazonais contribuem de maneira muito forte para a variância total da série, os mesmos necessitam ser removidos a fim de que se possibilite a análise dos efeitos causados pelas variáveis.

Tabela 4.9 – Final da série ajustada sazonalmente

Anos	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	6,119	6,120	6,093	5,978	5,413	6,581	6,187	6,337	5,820	6,370	6,458	6,217
2004	6,119	6,120	6,093	5,978	5,413	6,581	6,187	6,337	5,820	6,370	6,458	5,781
2005	5,986	5,963	5,933	5,630	6,406	6,261	6,169	6,255	6,243	6,137	6,502	5,820
2006	5,417	5,289	5,343	5,891	6,037	5,479	5,496	6,972	4,750	5,630	5,200	6,996
2007	5,918	6,062	6,516	6,581	4,688	5,677	6,664	6,558	7,150	6,495	5,928	6,532
2008	7,379	7,089	6,756	5,090	6,414	6,763	6,445	5,567	7,961	5,876	6,378	6,880
2009	5,965	6,404	5,236	5,497	5,601	7,405	5,983	5,814	5,992	7,572	6,834	6,037
2010	6,277	6,453	6,838	6,731	7,002	6,444	6,729	7,226	7,082	6,216	6,404	5,972
2011	6,465	5,529	6,354	6,225	5,872	6,460	5,334	5,963	5,555	6,856	6,211	6,533
2012	6,270	6,740	6,526	6,484	6,347	6,126	6,798	6,529	6,200	6,357	6,439	

Nos gráficos mostrados na Figura 4.5 abaixo, pode-se observar o comportamento da sazonalidade em diferentes anos e em diferentes meses. Sendo assim, decisões podem ser tomadas de melhor forma, observando-se que, em um dado instante de tempo, a sazonalidade irá influenciar de forma ascendente ou descendente na série. A escala no eixo Y, na Figura 4.5, refere-se ao acompanhamento ou movimentação da componente sazonal da insolação em diferentes meses.

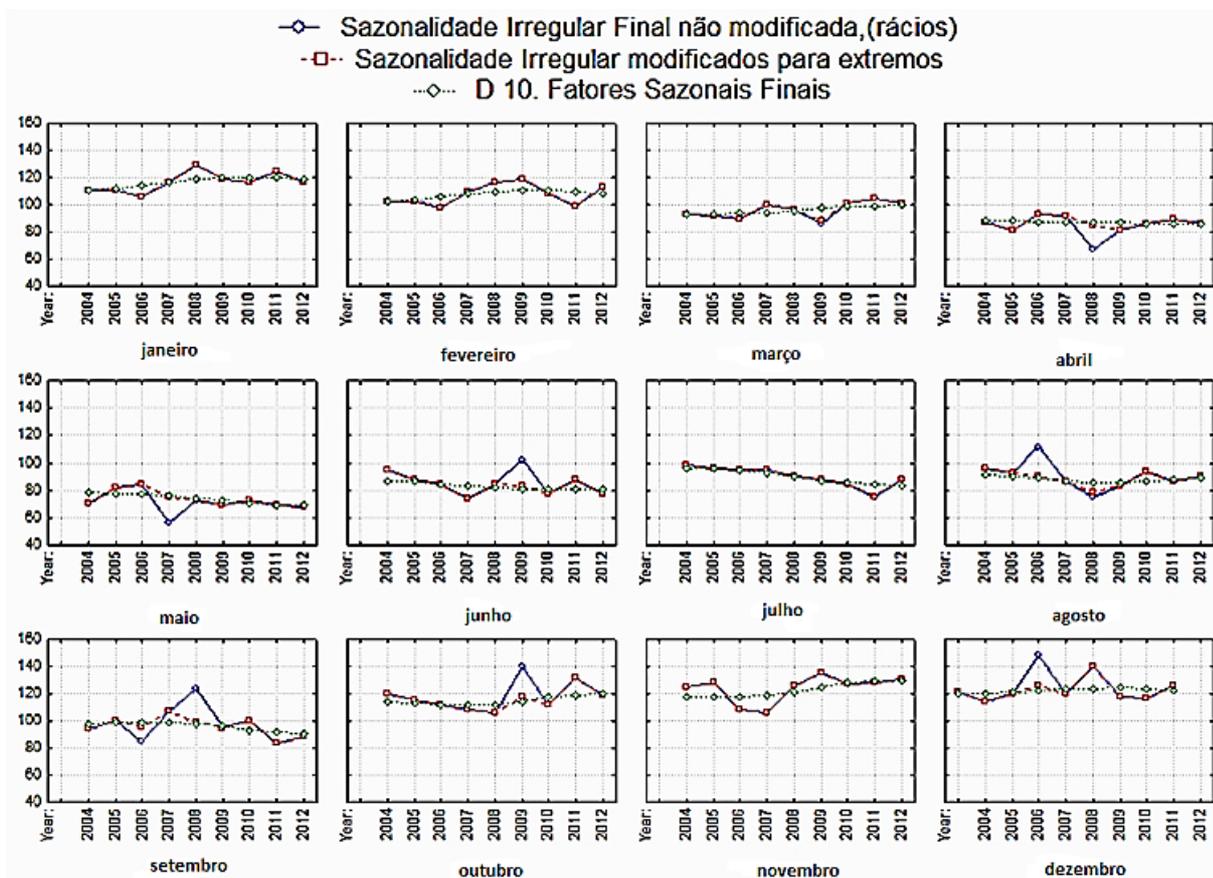


Figura 4.5 – O comportamento da sazonalidade em diferentes anos e em diferentes meses

4.2.6 Avaliando o modelo série original e ajustada

Observa-se, na Figura 4.6 abaixo, que a série ajustada possui um melhor comportamento. Assim sendo, ela será utilizada nesta tese para as inferências que se fizerem necessárias, pois os efeitos devidos a casos externos ao comportamento da série foram quantificados e ajustados.

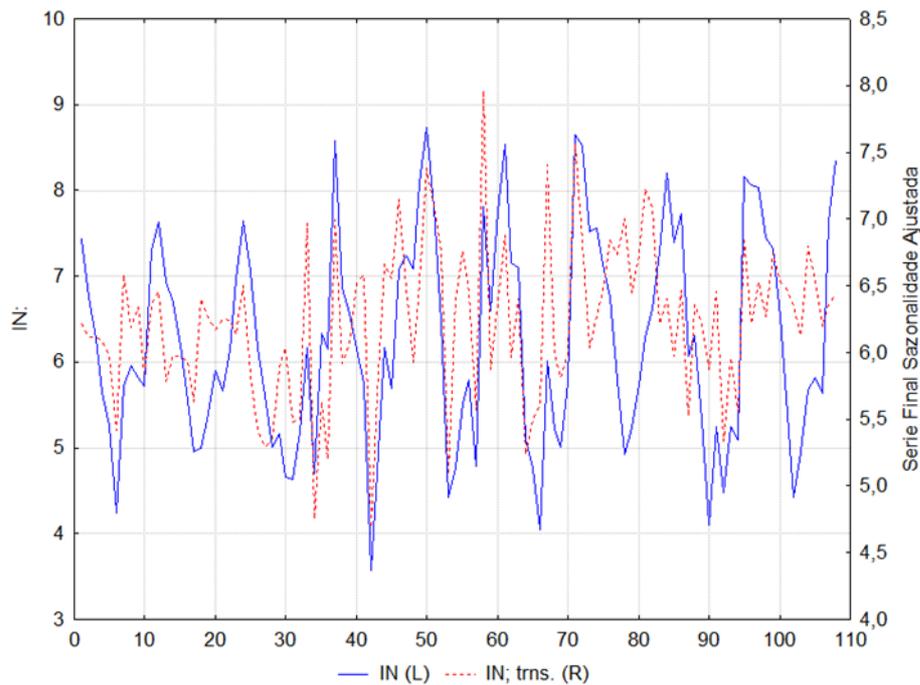


Figura 4.6 – Série sazonal original e ajustada (IN-Insolação, trans-transformada)

Pelas Figuras 4.7 e 4.8 (Função de Autocorrelação e Auto Correlação Parcial), nota-se que, ao se traçarem a função de autocorrelação e a função de autocorrelação parcial, a série não apresenta mais o efeito de sazonalidade e também não se mostra mais autocorrelacionada. Logo, o método utilizado cumpriu o seu propósito de tratar a componente da sazonalidade.

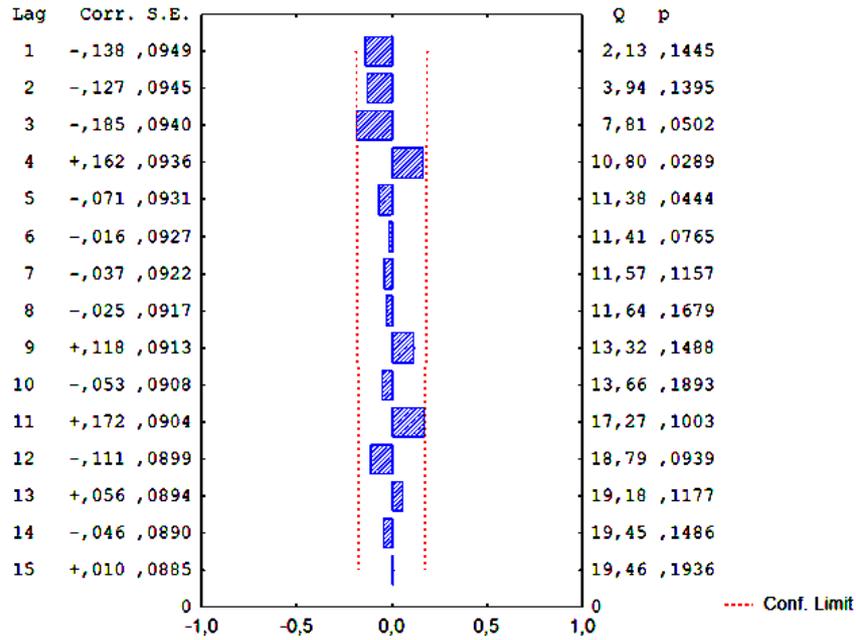


Figura 4.7 – Função de Autocorrelação

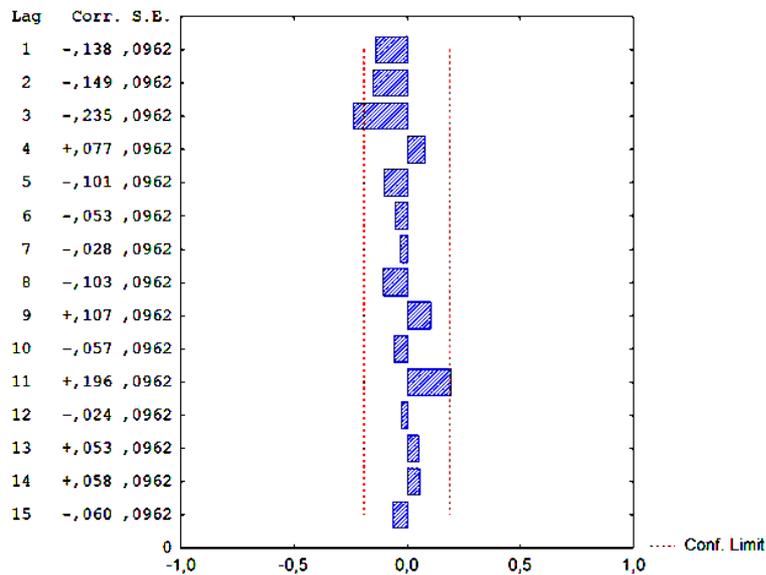


Figura 4.8 – Função de Auto correlação Parcial

Nota: Lag-(período), Corr-(correlação), S.E-(desvio), Q-(erro estatístico), p-(p-valores).

A FAC (Função de Auto Correlação, Figura 4.7) residual do modelo mostra que a autocorrelação dos resíduos está dentro dos limites de confiabilidade de 95%, assim como ocorre na FACP (Função de Auto Correlação Parcial, Figura 4.8). Logo, os resíduos são não-autocorrelacionados.

Em termos estatísticos, existem critérios bem definidos que determinam a escolha do modelo. Para realizar as extrapolações é necessário que a série tenha pelo menos 5 anos e que o erro absoluto médio de previsão nos últimos 3 anos seja inferior a 12%.

Já no que tange a extrapolação, é necessário que a série não tenha mais de 10 anos e que o erro de previsão nos últimos três anos seja inferior a 18% e que não exista sinais de sobrediferenciação. Logo, o estudo da insolação acima descrito atende todas as especificidades.

4.3 Análise descritiva para a obtenção das componentes tendência e sazonalidade da variável radiação solar global

4.3.1 Análise descritiva

Neste item serão apresentadas as estatísticas descritivas para a radiação solar global, como um suporte para a realização das inferências a serem investigadas, com o intuito de conhecer o comportamento cíclico das variáveis no decorrer do período analisado e verificar os índices para a presença de heterocedasticidade condicional na série (volatilidade). Este estudo, como ocorreu com a variável insolação, se baseou nos registros históricos do banco de dados reconstruído, levando-se em conta as regiões descritas no capítulo três com exceção da região sul, que por algum motivo, não constou nos registros fornecidos pelos órgãos oficiais ficando assim, de fora nas anotações temporais do banco reconstruído. Com menos informações, os índices diferenciam em alguns valores com relação à insolação levando-se a uma análise mais criteriosa dos resultados.

Na Tabela 4.10 apresentam-se algumas estatísticas descritivas da série em estudo.

Tabela 4.10 – Estatística descritiva das variáveis para a radiação solar

Estatísticas Descritivas – Radiação	
Estatísticas	Valor de teste
Média	337,49
Desvio Padrão	91,69
Coefficiente de variação	0,27
Assimetria	0,17
Curtose	1,995
Jarque-Bera	28,955

Com a análise descritiva das variáveis para a radiação solar, verificou-se pelo coeficiente de variação que a média da variável é considerada representativa, visto que esse valor, expresso em percentual de 27%, está abaixo de 50% e pode ser utilizada para trabalhos futuros. Ao se analisar o valor da assimetria e da curtose, observou-se que a assimetria é diferente de zero e que a curtose é de 1,99, portanto não há indicativos de clusters de volatilidade. A assimetria retrata a forma de distribuição dos dados, em que há um coeficiente igual a 0,17 para a radiação, ou seja, como a média é de 337,49 maior do que a mediana (330,86), tem-se uma assimetria à direita. A curtose de 1,99 indica que a série de radiação apresenta uma distribuição platicúrtica em relação à curva de distribuição normal, Figura 4.9.

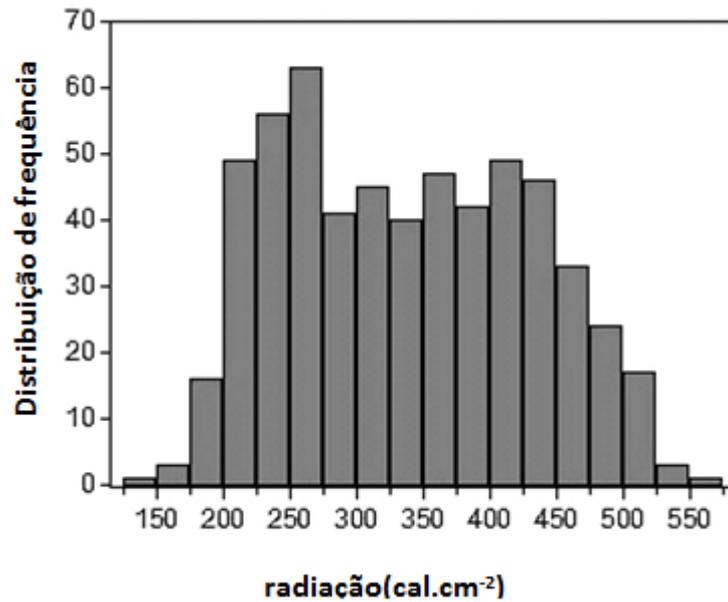


Figura 4.9 – Histograma para série de radiação solar [radiação($cal.cm^{-2}$) x distribuição de frequência]

4.3.2 Testes de normalidade – Jarque-Bera (JB)

Com o objetivo de oferecer confiabilidade aos testes estatísticos, uma vez que, em geral, eles se baseiam na distribuição normal do termo residual aplicou-se o teste de normalidade JB. As hipóteses a serem testadas são:

H_0 : Assimetria = 0 e curtose = 3, então a série é dita normal;

H_1 : Assimetria \neq 0 e curtose \neq 3, então a série é dita não-normal.

Regra de decisão: o teste baseia-se nos coeficientes de assimetria e curtose. Se o p-valor for maior que o nível de significância de 5% cujo valor crítico é 5,99, aceita-se a hipótese nula de normalidade.

Pode-se observar pelo valor do teste para radiação que a variável não segue uma distribuição normal. Isso também pode ser observado visualmente pela Figura 4.9.

4.3.3 Análise de tendência

Conforme demonstrado pela Figura 4.10, a série da radiação não apresenta uma tendência definida, mas uma grande variação no decorrer dos anos.

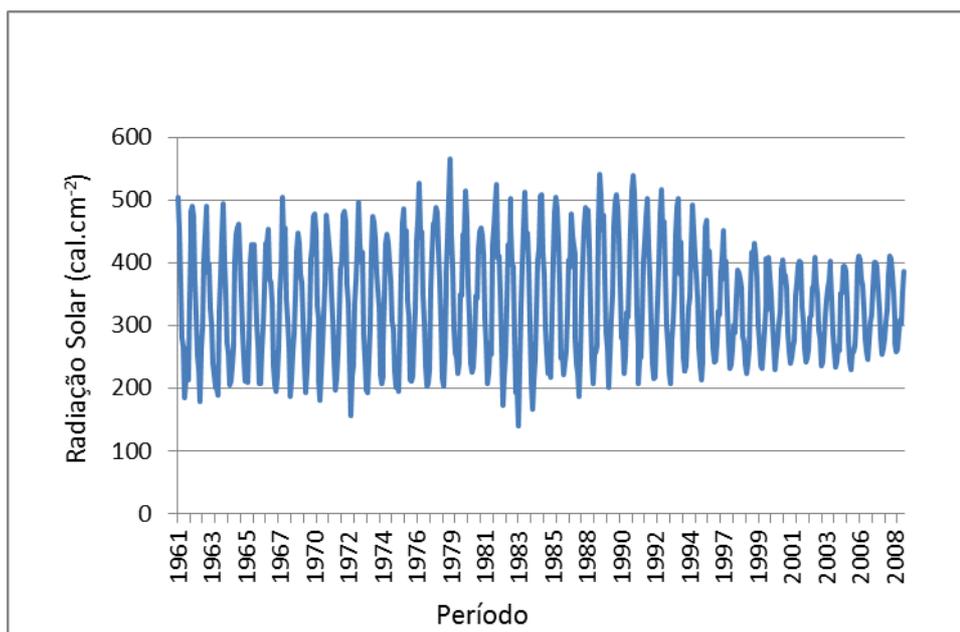


Figura 4.10 – Série histórica original da radiação solar média mensal (período x radiação)

Para testar a tendência na série usou-se o teste de Wald. O resultado encontra-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Teste de Wald

Variável analisada	p-valor	Decisão
Radiação	0,204	Aceita a H_0

Pelo teste Wald pode-se observar que não existe tendência, já que o p-valor encontrado (0,204) é maior que 5%, o que pode ser confirmado pelo gráfico da série original.

4.3.4 Análise da sazonalidade

Mesmo não havendo o componente de tendência, procura-se investigar a presença do efeito da sazonalidade. Como a série apresenta uma grande oscilação em sua estabilidade, utilizou-se a série diferenciada para realizar os estudos sobre a sazonalidade da série. Dessa forma, fez-se o gráfico da função de autocorrelação da primeira diferença, Figura 4.11, sugerindo os efeitos de sazonalidade. Pode-se verificar que a série não possui inclinação em relação ao eixo das abscissas, indicando que não há uma dependência da sazonalidade sobre a tendência.

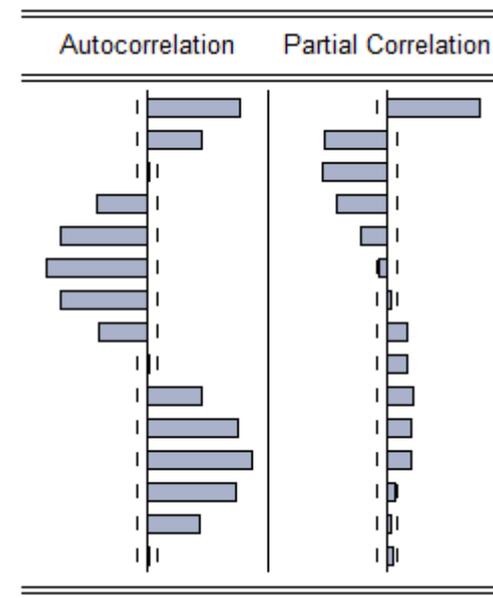


Figura 4.11 – Correlograma da série radiação solar

Após esse procedimento sugerindo os efeitos de sazonalidade, submeteu-se então a série, a dois testes: 1) o teste F para a sazonalidade estável, que é um teste

paramétrico feito com base em uma análise de variância de um fator (mês) sobre a série livre de tendência por meio da estatística F; 2) o teste de Kruskal-Wallis para sazonalidade estável, um teste não paramétrico, usado para testar a diferença entre meses, baseado no posto médio de cada mês, assinalados a cada estimativa final da série livre de tendência. Os resultados destes testes estão na Tabela 4.12 onde, se pode observar que a série possui sazonalidade estável para variável radiação solar global.

Tabela 4.12 – Testes para verificação da sazonalidade

Variável	Teste F Sazonalidade Estável		Teste Sazonalidade Estável Kruskal Wallis		Teste de Friedman
	F	p-valor	T1	p-valor	p-valor
Radiação	957,328	<0,0001	1961,50	0,01573	0,0001

Nota: as significâncias adotadas para sazonalidade estável 0,1% (0,001), Kruskal Wallis 1% (0,01).

Conclui-se que a série de radiação solar global apresenta sazonalidade, como se pode observar na Tabela 4.12, tanto pelo teste de Kruskal Wallis como pelo teste de Friedman, pois existem diferenças entre os meses em estudo.

Após a identificação da presença de sazonalidade na série, é realizado o ajustamento da série original, retirando-lhe os efeitos sazonais. Com isso se tem por objetivo a obtenção de uma nova série, com menor dispersão que a original, permitindo uma avaliação mais correta da fase do ciclo analisado, o que assume um papel fundamental nas definições e decisões adequadas sobre a radiação solar. O ajustamento da série original é realizado com método X11-ARIMA, já comentado anteriormente em 3.6.

Tradicionalmente, na análise das séries cronológicas, considera-se que cada observação resulta da conjunção de vários efeitos, consistindo na decomposição da

série e análise do comportamento de cada uma das suas componentes, com vista à previsão. Foram consideradas quatro componentes presentes em cada observação:

1. A tendência, $[T]$, que traduz o nível da sucessão, isto é, o comportamento mais geral da variável sobre o tempo;
2. O ciclo, $[C]$, que traduz as oscilações em torno do nível da série de prazo superior ao ano, ou seja, os movimentos oscilatórios de longo prazo.
3. A sazonalidade, $[S]$, que se refere às oscilações em torno da tendência de periodicidade inferior ao ano, detectável em séries infra-anuais com origem em causas naturais, como clima, ou em causas sociais e institucionais, como os costumes e disposições;
4. A componente errática ou residual, $[e]$, que traduz os movimentos irregulares esclarecidas por causas fortuitas ou desconhecidas, para onde são remetidos os movimentos não explicados pelas componentes anteriores e que se assume ter um comportamento aleatório.

Cada observação é vista como resultante da combinação daqueles quatro elementos, expressando-se na forma genérica, $O = f(T, C, S, e)$ expressão geral, que conforme se admite um modelo aditivo, apresenta uma forma diferenciada, em que se admite uma independência do comportamento das componentes, isto é:

$$O = T + C + S + e$$

A série de radiação solar global mostra uma flutuação sazonal clara, como descrito no resumo introdutório. O objetivo da decomposição sazonal, em geral, é derivar estimativas da sazonalidade, tendência-/ciclo, e componentes irregulares que compõem a série. O componente sazonal pode ser usado para calcular uma série ajustada, isto é, uma estimativa da série depois de remover as flutuações sazonais. A Tabela 4.13 mostra o comportamento da série original da radiação solar com estimativas até 2012.

Tabela 4.13 – Série original radiação solar (total: 26932,5; média = 320,62; desvio padrão = 11,098)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2006	367,69	349,46	293,11	278,02	235,48	240,42	277,05	314,60	341,16	358,78	371,34	403,14
2007	365,69	347,46	293,12	277,02	236,49	239,32	274,05	312,60	338,17	349,79	368,32	401,26
2008	385,14	340,90	286,14	257,60	233,33	243,41	268,13	260,61	350,77	352,12	393,40	394,53
2009	385,97	338,91	275,33	241,63	228,24	256,70	257,92	268,39	311,35	396,99	410,60	404,95
2010	374,67	364,54	326,74	278,21	256,98	246,51	275,51	304,76	315,89	359,61	399,86	400,66
2011	394,90	357,54	327,28	281,03	253,14	263,13	277,40	304,55	325,23	380,76	409,83	406,03
2012	382,56	354,52	307,88	271,76	258,15	261,60	285,30	309,49	302,46	353,02	385,67	398,77

A Tabela 4.14 apresenta o teste baseado na Análise de Variância Anova. O valor da estatística F que testa a existência de sazonalidade estável resulta do quociente de duas variâncias, a variância entre meses devida aos fatores sazonais (cíclica) e à variância residual, devida à componente irregular, provavelmente devido aos fatores locais ou temporários.

Tabela 4.14 – T este da sazonalidade estável

	S. Quadr.	Graus Liberdade	Média. Quad.	F	p-valor
Entre os meses	21548,56	11	1958,96	140,09	<0,0001
Residual	839,00	60	13,98		
Total	22387,56	71			

Na Tabela 4.14 nota-se que existe variação significativa de troca na série. Isto é melhor visualizado na Tabela 4.15 abaixo.

Tabela 4.15 – Finais não modificados, rácios, SI – (sazonalidades irregulares)

	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2006	115,73	109,35	91,17	85,99	72,45	73,73	85,01	96,88	105,57	111,82	116,74	127,88
2007	122,80	108,78	91,12	81,87	74,12	77,34	85,23	82,90	111,49	111,74	124,91	125,95
2008	124,45	110,69	90,96	80,33	75,85	84,67	83,99	86,11	98,53	124,04	126,65	123,29
2009	112,82	108,98	97,41	83,08	77,18	74,70	84,36	94,12	98,10	111,86	124,05	123,56
2010	120,79	108,33	98,41	84,18	75,79	78,87	83,26	91,52	97,86	114,85	124,32	124,21
2011	118,05	109,98	95,20	83,15	78,06	78,65	86,11	94,62	94,10	111,84	124,33	124,97
2012	119,11	109,35	94,05	83,10	75,57	77,99	84,66	91,03	100,94	114,36	123,50	125,72

Para realizar a razão entre a série original e os fatores sazonais, primeiramente fazem-se os ajustamentos prévios, para tornar a série mais eficiente. É ainda nesta fase que é extrapolada a série original com o modelo ARIMA que é ajustada à série original corrigida por estes fatores iniciais com os valores extremos substituídos por valores ajustados.

A Tabela 4.16 mostra os valores finais de reposição para relações extremas que são também aquelas consideradas atípicas, na série em estudo. As atipicidades estão entre os anos de 2008-2011, em diversificados meses. Estas atipicidades são visualizáveis na Figura 4.12.

Tabela 4.16 – Valores finais de reposição para relações extremas

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2006												
2007												
2008	116,79			85,74		75,19			104,15		120,11	
2009								94,03	100,49			
2010						77,50		94,21		112,61		
2011	120,40					74,92						
2012												

Os gráficos, Figura 4.12 abaixo, exibem a sazonalidade ajustada com o estudo de tendência e ciclo, em que mais uma vez é comprovada a inexistência de

ambos. Em vermelho mostra as componentes tendência/ciclo e em azul a série final ajustada sazonalmente. Claramente, existe uma variabilidade da série ajustada em torno da estimativa tendência / ciclo.

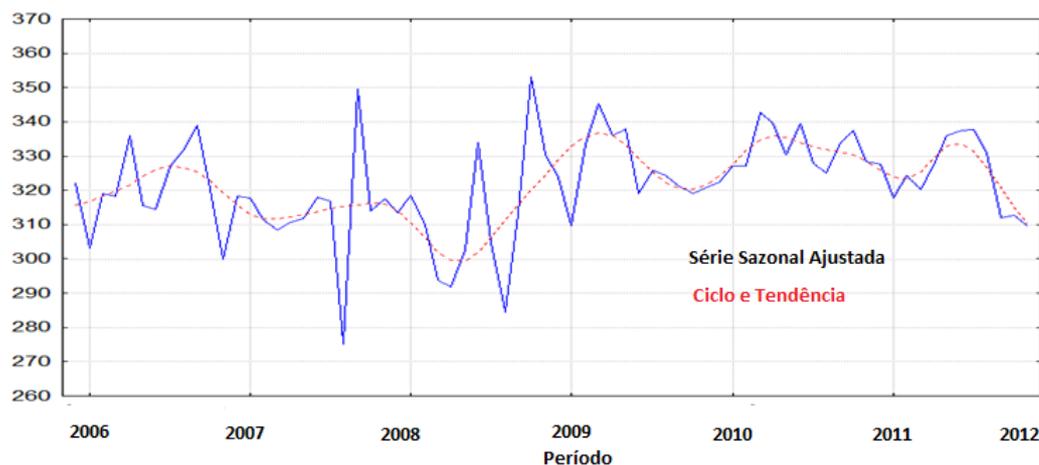


Figura 4.12 – Série Sazonal Ajustada

4.3.5 Pesos associados às componentes irregulares.

Os valores da componente irregular que superam em valor absoluto 2,5 desvios padrão levam zero, os que em valor absoluto estão entre 1,5 e 2,5 desvios padrão são considerados moderadamente atípicos e devem ser amortecidos, e os que em valor absoluto são menores 1,5 desvio padrão recebem o peso 1.

Na Tabela 4.17 são representadas, mês a mês, as mudanças sazonais na série inicial. A Tabela 4.18 mostra as mudanças mês a mês nas séries ajustadas, sazonalmente.

Tabela 4.17 – Mudança mensal mês a mês na série inicial

	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2007	-10,20	-4,96	-16,12	-5,15	-15,30	2,10	15,24	13,55	8,44	5,17	3,50	8,56
2008	-4,47	-11,48	-16,06	-9,98	-9,42	4,32	10,15	-2,81	34,60	0,38	11,73	0,29
2009	-2,17	-12,19	-18,76	-12,24	-5,54	12,47	0,48	4,06	16,01	27,51	3,43	-1,38
2010	-7,48	-2,70	-10,37	-14,85	-7,63	-4,07	11,76	10,61	3,65	13,84	11,19	0,20
2011	-1,44	-9,46	-8,46	-14,13	-9,92	3,95	5,42	9,79	6,79	17,08	7,63	-0,93
2012	-5,78	-7,33	-13,16	-11,73	-5,01	1,33	9,06	8,48	-2,27	16,72	9,25	

Tabela 4.18 – Mudanças mês a mês nas séries finais ajustadas sazonalmente

	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2007	-5,84	5,19	-0,20	5,54	-6,08	-0,33	3,97	1,32	2,32	-5,51	-6,41	6,13
2008	-0,11	-2,00	-0,99	0,79	0,32	1,98	-0,38	-13,14	27,06	-10,23	1,17	-1,31
2009	1,67	-2,72	-5,24	-0,68	3,74	10,36	-8,73	-6,64	10,10	12,73	-6,44	-1,98
2010	-4,41	7,71	3,50	-2,65	0,60	-5,63	2,15	-0,45	-1,00	-0,67	0,58	0,48
2011	1,48	0,00	4,76	-0,99	-2,65	2,75	-3,39	-0,91	2,78	1,05	-2,70	-0,27
2012	-2,99	2,08	-1,22	2,18	2,60	0,48	0,02	-2,02	-5,72	0,32	-1,08	

Na Figura 4.13, pode-se observar o comportamento da sazonalidade em diferentes anos e em diferentes meses, sendo assim decisões podem ser tomadas de melhor forma, observando-se em um dado instante de tempo, se ela irá influenciar de forma ascendente ou descendente na série.

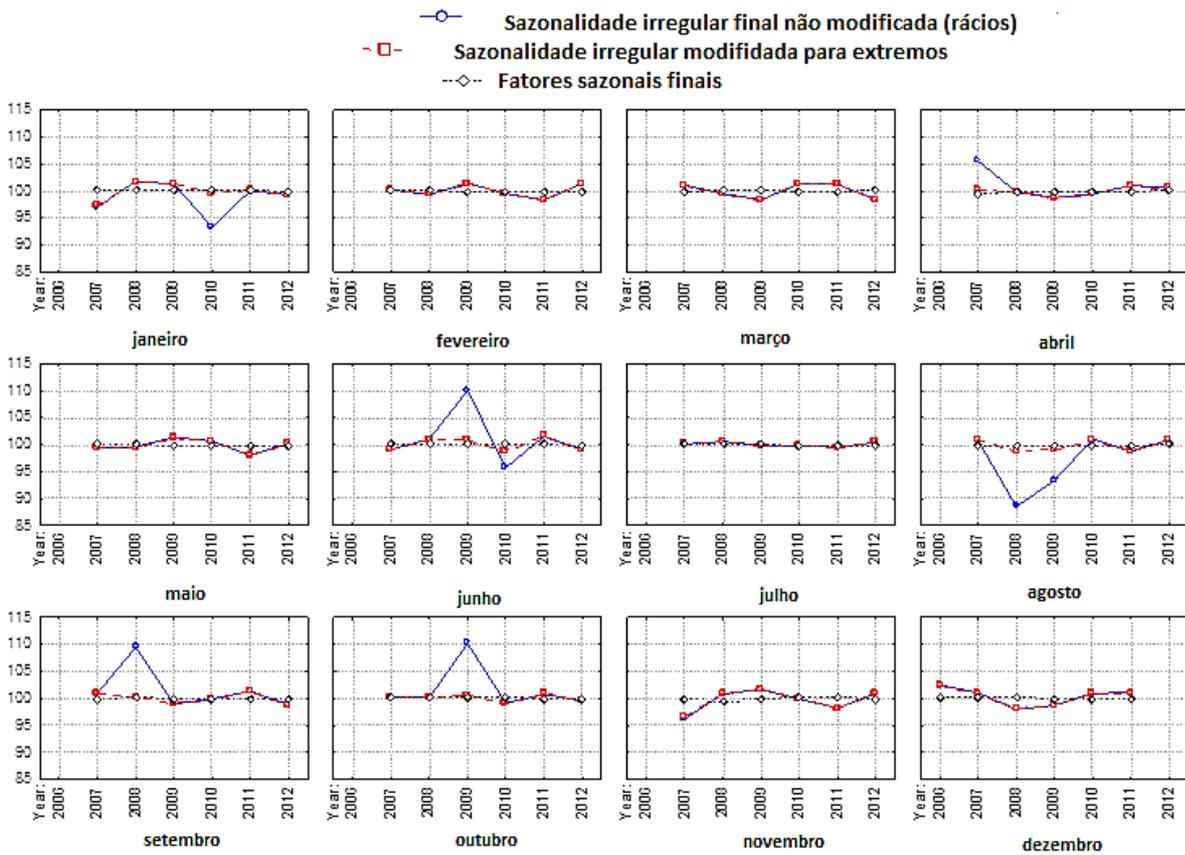


Figura 4.13 – O comportamento da sazonalidade em diferentes anos e meses

4.3.6 Avaliando o modelo das séries original e ajustada

Observa-se que a série original e ajustada representada pela Figura 4.14 possui um melhor comportamento. Esta é a série que deverá ser utilizadas para as inferências que se fizerem necessárias, pois os efeitos devidos a casos externos ao comportamento da série foram quantificados e ajustados.

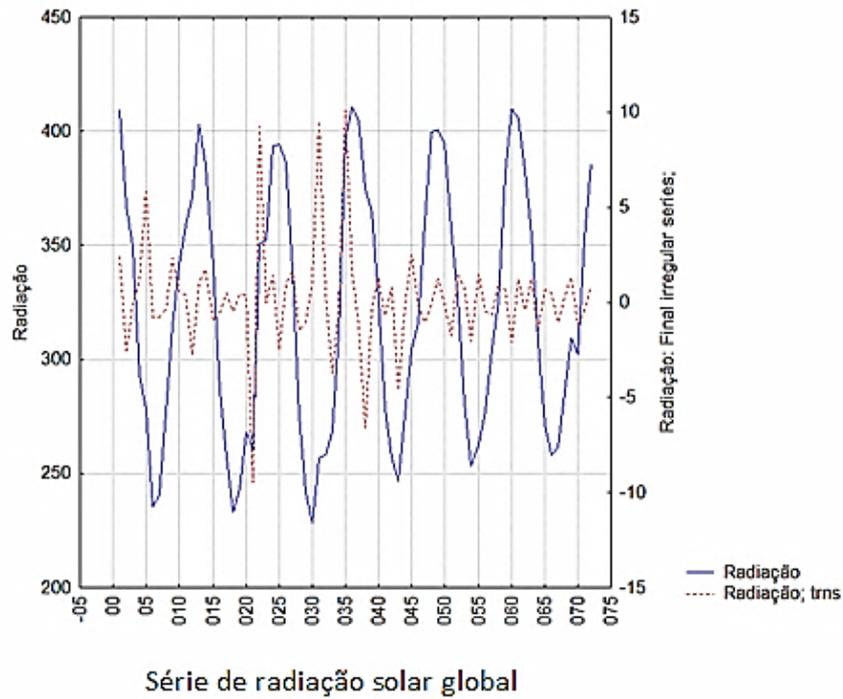


Figura 4.14 – Série sazonal original e ajustada (trns – transformada)

Pelas Figuras 4.15 e 4.16, pode-se ver que ao se traçar a função de autocorrelação e função de autocorrelação parcial, a série não apresenta mais o efeito de sazonalidade e também não se mostra mais autocorrelacionada, desta forma o método utilizado cumpriu o seu propósito de tratar a sazonalidade.

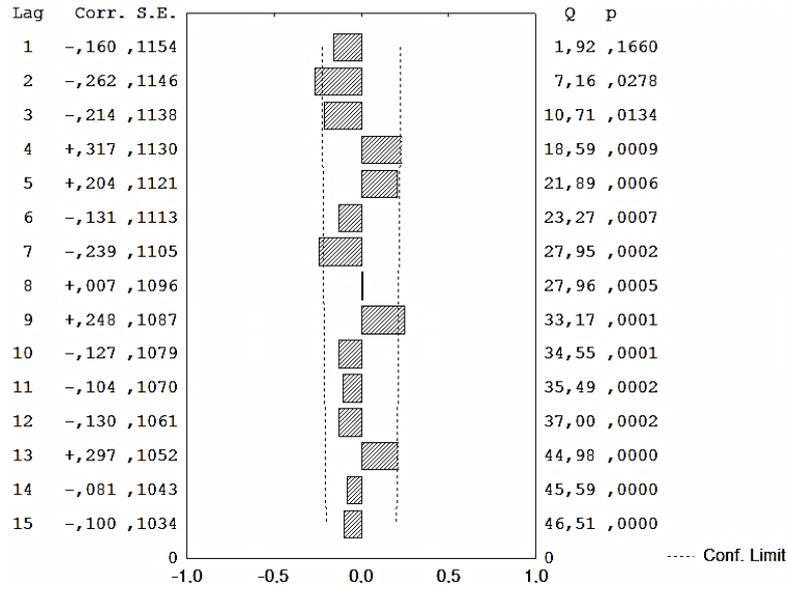


Figura 4.15 – Função de Autocorrelação

Nota: Lag-(período), Corr-(correlação), S.E-(desvio), Q-(erro estatístico), p-(p-valores).

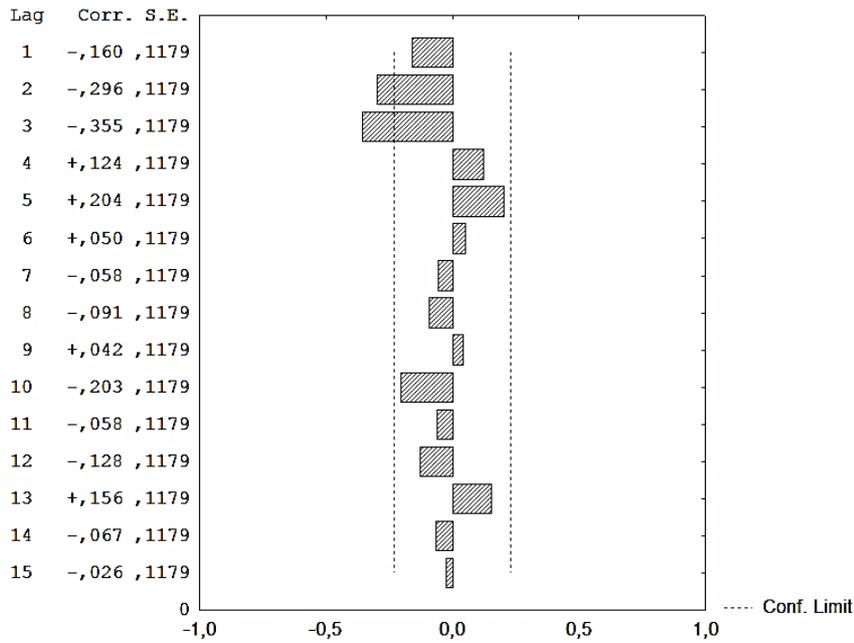


Figura 4.16 – Função de auto correlação parcial

A FAC residual do modelo mostra que a autocorrelação dos resíduos estão dentro dos limites de confiabilidade de 95%, assim como ocorre na FACP. Logo, esses resíduos são não-autocorrelacionados.

4.4 Análise descritiva para a obtenção das componentes tendência e sazonalidade da variável eólica - (velocidade média do vento)

4.4.1 Análise descritiva

Neste item serão apresentadas as estatísticas descritivas para os dados eólicos, como um suporte para a realização das inferências a serem investigadas, com o intuito de conhecer o comportamento das variáveis no decorrer do período analisado e verificar os índices para a presença de heterocedasticidade condicional na série (volatilidade). Pode-se ainda fazer inferências com as outras variáveis já estudadas pelo mesmo método. Este estudo se baseou nos registros históricos do banco de dados reconstruído, levando-se em conta duas regiões descritas no capítulo três, a Região Sul e a Região Fronteira Oeste. Por se tratarem dos locais de maior incidência de velocidade média eólica do Estado e também pela confiabilidade nos resultados, optou-se pela análise da variação média entre as duas regiões do Estado.

A seguir, apresentam-se algumas estatísticas descritivas da série em estudo na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Estatística descritiva das variáveis para velocidade média eólica

Estatísticas Descritivas – Eólico	
Estatísticas	Valor de teste.
Média	6,5
Desvio Padrão	3,45
Coeficiente de variação	0,53
Assimetria	-1,43E-18
Curtose	1,783
Jarque-Bera	28,871

Com a análise descritiva das variáveis constitutivas para a energia eólica, verificou-se pelo coeficiente de variação que a média da variável é considerada representativa, visto que esse valor expresso em percentual de 53% está por volta de 50% e pode ser utilizado para trabalhos futuros. Ao analisar o valor da assimetria e da curtose, observou-se que a assimetria é diferente de zero e que a curtose é de 1,783. Portanto não há indicativos de clusters de volatilidade, Figura 4.17.

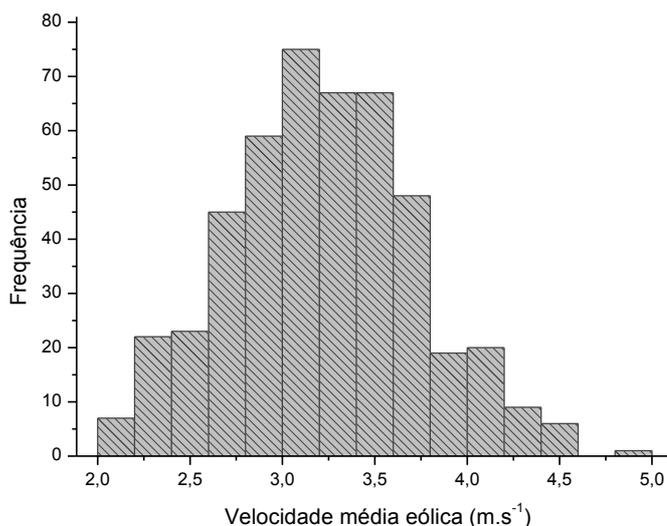


Figura 4.17 – Histograma para série eólica

4.4.2 Testes de normalidade – Jarque-Bera (JB)

As hipóteses a serem testadas para o teste de normalidade são:

H_0 : Assimetria = 0 e curtose = 3, então a série é dita normal;

H_1 : Assimetria \neq 0 e curtose \neq 3, então a série é dita não-normal.

Regra de decisão: o teste baseia-se nos coeficientes de assimetria e curtose. Se *p*-valor for maior que o nível de significância de 5%, aceita-se a hipótese nula de normalidade. Observa-se pelo valor do teste para série eólica que esta variável não segue uma distribuição normal.

Conforme mostrado na Figura 4.18, a série eólica não apresenta uma tendência definida, mas uma grande variação no decorrer dos anos.

Para testar a tendência na série usou-se o teste de Wald. Os testes de verificação da tendência tem como pressuposto a independência dos dados. O resultado deste teste encontra-se na Tabela 4.20.

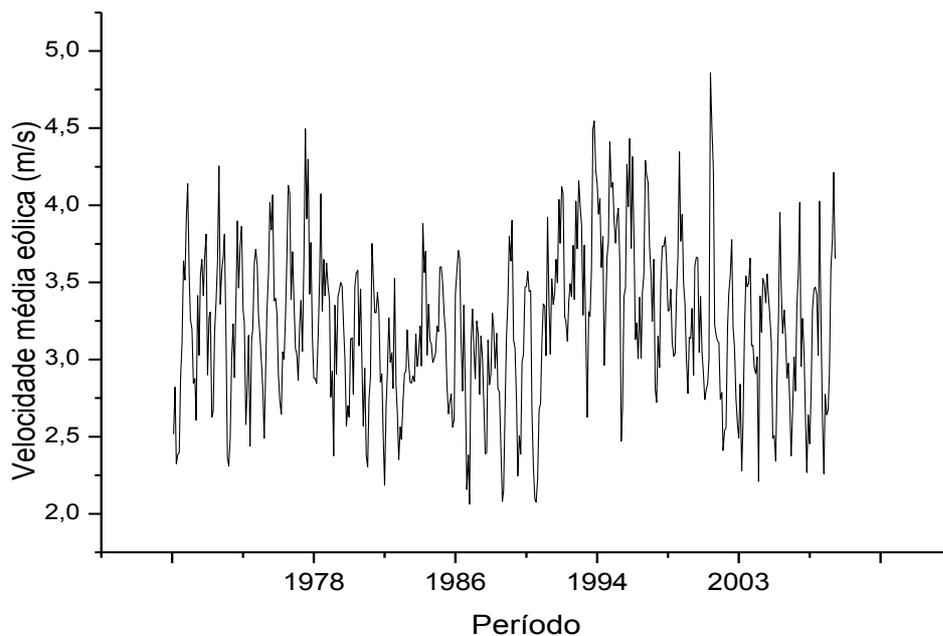


Figura 4.18 – Série histórica eólica

Tabela 4.20 – Teste Wald

Variável analisada	p-valor	Decisão
Eólica	0,157	Aceita a H_0

A tendência é definida como sendo a “direção” da série temporal e, portanto, relaciona-se ao incremento ou ao decréscimo dos valores da mesma com o decorrer do tempo, pelo teste Wald podemos observar que não existe tendência, já que o p-valor encontrado (0,157) é maior que 5%, o que pode ser confirmado pelo gráfico da série original.

4.4.3 Análise da sazonalidade

Mesmo, não havendo a componente de tendência, procura-se investigar a presença do efeito da sazonalidade. Como a série apresenta uma grande oscilação em sua estabilidade, utilizou-se a série diferenciada para realizar os estudos sobre a sazonalidade da série.

Dessa forma, fez-se o gráfico da função de autocorrelação da primeira diferença, sugerindo efeitos de sazonalidade conforme a Figura 4.19. Outra informação a respeito das características da série em estudo, é que a série não possui inclinação em relação ao eixo das abscissas, indicando que não há uma dependência da sazonalidade sobre a tendência.

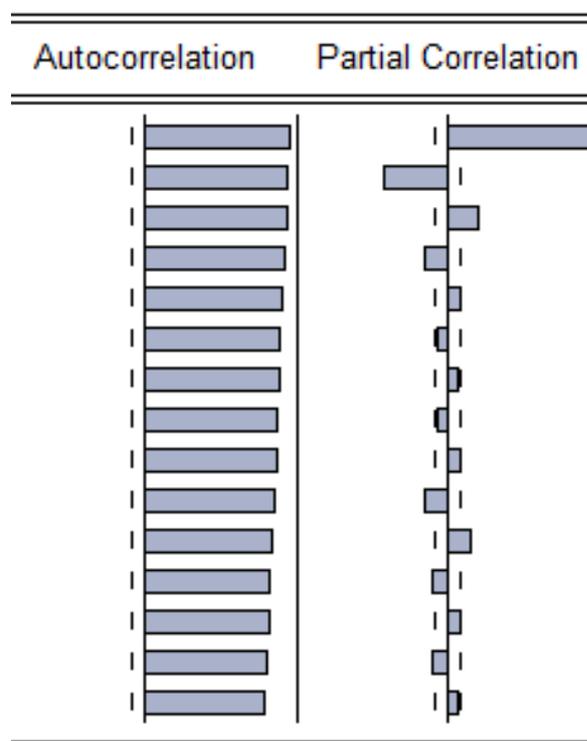


Figura 4.19 – Correlograma da série eólica

Após esse procedimento, submeteu-se, então, a série, ao Teste F e ao Kruskal Wallis para a identificação da presença de sazonalidade estável.

Pela Tabela 4.21, pode-se concluir que a série apresenta sazonalidade, tanto pelo teste de Kruskal Wallis como pelo teste de Friedman, pois existe diferença entre os meses em estudo.

Tabela 4.21 – Testes para verificação da sazonalidade

Variável	Teste F Sazonalidade Estável		Teste Sazonalidade Estável Kruskal Wallis		Teste de Friedman
	F	p-valor	T1	p-valor	p-valor
Eólico	189,534	< 0,0001	1900,00	0,0173	0,0001

4.4.4 Resultados dos ajustes com o modelo X11 ARIMA

O ajuste do modelo é realizado com método X11-ARIMA já descrito anteriormente. Tradicionalmente, na análise das séries cronológicas, considera-se que cada observação resulta da conjunção de vários efeitos, consistindo o trabalho do analista na decomposição da série e análise do comportamento de cada uma das suas componentes, com vista à previsão. Foram consideradas quatro componentes presentes em cada observação: O ciclo, (C), a sazonalidade, (S), a componente errática ou residual, (e). Cada observação, O , é vista como resultante da combinação daqueles quatro elementos, expressando-se na forma genérica como:

$$O = f(T, C, S, e)$$

Esta é a expressão geral, que conforme se admite o modelo aditivo, apresenta uma forma diferenciada em que se admite uma independência do comportamento das componentes, isto é:

$$O = T + C + S + e.$$

A série eólica mostra uma flutuação sazonal clara, como descrito no resumo introdutório. O objetivo da decomposição sazonal, em geral, é derivar estimativas da sazonalidade, tendência/ciclo, e componentes irregulares que compõem a série. O componente sazonal pode ser usado para calcular uma série ajustada, isto é, uma estimativa da série depois de remover as flutuações sazonais. A Tabela 4.22, mostra o comportamento da série original eólica com estimativas até 2011.

Tabela 4.22 – Série original eólica

Anos\ Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	3,370	3,018	2,780	3,144	3,135	3,331	2,898	3,603	3,664	3,660	3,048	3,409
2004	3,051	2,905	2,740	2,801	2,848	3,000	4,857	4,504	4,223	3,224	3,156	3,122
2005	3,110	2,743	2,786	2,410	2,542	2,554	3,208	3,427	3,550	3,777	3,212	3,081
2006	2,743	2,584	2,490	2,839	2,279	2,570	3,169	3,543	3,472	3,494	3,658	3,089
2007	3,093	2,943	2,908	3,018	2,209	3,412	3,176	3,526	3,494	3,368	3,556	3,408
2008	3,260	3,119	2,489	2,507	2,340	2,855	3,280	3,954	3,446	3,170	3,320	3,137
2009	2,877	2,975	2,690	2,375	2,678	3,017	2,797	3,341	3,564	4,019	2,954	3,267
2010	3,045	2,667	2,267	2,640	2,453	2,761	3,332	3,453	3,470	3,422	3,028	4,027
2011	3,267	2,621	2,258	2,774	2,642	2,675	2,921	3,589	3,773	4,213	3,653	
Média	3,091	2,842	2,601	2,723	2,570	2,908	3,293	3,660	3,628	3,594	3,287	3,336

(Média = 3,128; desvio padrão = 0,486)

A Tabela 4.23 apresenta os resultados do teste baseado na Anova – Análise de Variância. O valor da estatística F, que testa a existência de sazonalidade estável, resulta do quociente de duas variâncias: a variância entre meses devida aos fatores sazonais e à variância residual, devida à componente irregular.

Tabela 4.23 – Teste da sazonalidade estável

	S. Quadr.	Graus Liberdade	Média. Quad.	F	p-valor
Entre os meses	16059,50	11	1459,955	22,548	< 0,0001
Residual	6215,75	96	64,747		
Total	22275,25	107			

Na Tabela 4.23 nota-se que existe uma variação significativa de troca na série. Isto é melhor visualizado na Tabela 4.24 abaixo.

As relações extremas são também aquelas consideradas atípicas, na série em estudo, as atipicidades estão presentes em todo o período de análise. Estas atipicidades são visualizáveis na Figura 4.20.

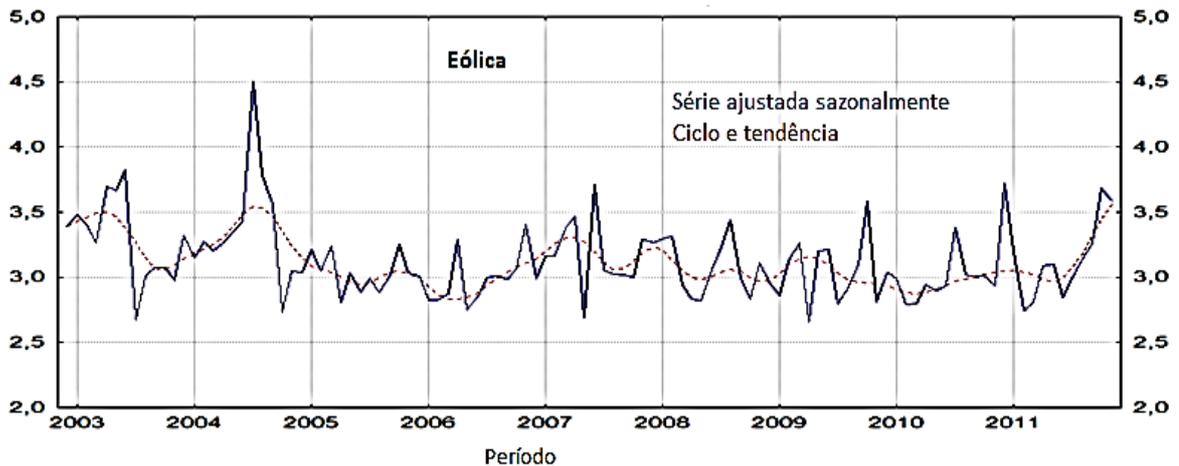


Figura 4.20 – Serie sazonal ajustada

A Figura 4.20 mostra os diferentes componentes plotados (classificados) por mês. Nesta figura, se pode verificar o comportamento da série livre de sazonalidade, isto é, o comportamento puro da série, neste caso sem o efeito de tendência que era quase inexistente e da sazonalidade. Sendo assim, pode-se observar o comportamento real da série. O gráfico em vermelho mostra as componentes tendência/ciclo e em azul a série final ajustada sazonalmente. Claramente, existe uma variabilidade da série ajustada em torno da estimativa tendência / ciclo.

4.4.5 Pesos associados aos componentes irregulares

Para obtenção dos valores implementados foi feita a detecção dos valores atípicos e a ponderação dos componentes irregulares.

Os valores do componente irregular que superam em valor absoluto 2,5 vezes os desvios padrão levam zero, os que em valor absoluto estão entre 1,5 e 2,5 vezes

os desvios padrão são considerados moderadamente atípicos e devem ser amortecidos. Os que em valor absoluto são menores 1,5 desvio padrão recebem o peso 1.

Na Tabela 4.26 estão representadas, mês a mês, as mudanças sazonais na série inicial. A Tabela 4.27, mostra as mudanças, mês a mês, nas séries ajustadas sazonalmente. Na Tabela 4.28 é mostrada a série final ajustada sazonalmente, mudanças mês a mês.

Tabela 4.26 – Mês a mês mudanças na série inicial

Anos\ Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	-3,40	-10,45	-7,87	13,11	-0,31	6,26	-13,01	24,35	1,69	-0,12	-16,72	11,86
2004	-10,52	-4,77	-5,68	2,23	1,66	5,35	61,89	-7,26	-6,25	-23,64	-2,11	-1,11
2005	-0,37	-11,80	1,56	-13,48	5,44	0,49	25,61	6,83	3,58	6,40	-14,95	-4,07
2006	-10,97	-5,82	-3,60	14,00	-19,71	12,74	23,29	11,82	-2,02	0,65	4,69	-15,56
2007	0,12	-4,84	-1,18	3,77	-26,79	54,43	-6,90	11,00	-0,91	-3,60	5,58	-4,15
2008	-4,34	-4,34	-20,20	0,74	-6,68	22,02	14,91	20,54	-12,85	-8,00	4,73	-5,53
2009	-8,28	3,41	-9,61	-11,68	12,74	12,64	-7,29	19,46	6,70	12,77	-26,50	10,58
2010	-6,80	-12,43	-14,97	16,44	-7,07	12,53	20,68	3,63	0,51	-1,40	-11,50	32,97
2011	-18,86	-19,78	-13,84	22,84	-4,78	1,25	9,20	22,88	5,13	11,65	-13,28	

Tabela 4.27 – Mês a mês mudanças na séries finais ajustada sazonalmente

Anos\ Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	2,52	-2,03	-4,04	13,13	-0,85	4,24	-30,00	12,64	1,91	0,14	-3,28	11,71
2004	-5,13	3,74	-1,98	1,91	2,48	2,29	31,51	-16,05	-5,82	-23,21	11,34	-0,08
2005	5,50	-4,93	6,17	-13,47	8,25	-4,90	3,55	-3,57	4,85	7,77	-6,77	-0,69
2006	-6,29	0,12	1,72	14,26	-16,42	3,83	5,01	0,66	-1,08	2,67	11,22	-12,16
2007	5,69	0,12	6,74	2,61	-22,49	38,23	-17,84	-0,92	-0,07	-0,71	9,74	-0,74
2008	0,75	0,70	-11,31	-3,55	-0,50	8,54	5,46	6,39	-12,93	-5,28	9,56	-5,01
2009	-3,13	9,58	4,24	-18,43	20,40	0,23	-12,94	3,96	6,39	15,90	-21,63	8,27
2010	-1,71	-6,53	0,24	5,09	-1,57	1,35	15,27	-10,82	-0,50	0,31	-2,64	26,84
2011	-14,09	-14,13	2,49	9,73	0,42	-8,25	5,16	5,11	3,63	13,03	-2,79	

Tabela 4.28 – Final da série ajustada sazonalmente, mudanças mês a mês

Anos\ Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2003	3,476	3,406	3,268	3,698	3,666	3,822	2,675	3,013	3,071	3,075	2,974	3,322
2004	3,152	3,270	3,205	3,267	3,348	3,425	4,503	3,781	3,561	2,734	3,044	3,042
2005	3,209	3,051	3,239	2,803	3,034	2,885	2,988	2,881	3,021	3,256	3,035	3,014
2006	2,825	2,828	2,877	3,287	2,747	2,853	2,995	3,015	2,983	3,062	3,406	2,992
2007	3,162	3,166	3,379	3,467	2,687	3,715	3,052	3,024	3,022	3,000	3,293	3,268
2008	3,293	3,316	2,941	2,836	2,822	3,063	3,230	3,437	2,993	2,835	3,106	2,950
2009	2,858	3,132	3,264	2,663	3,206	3,213	2,797	2,908	3,094	3,586	2,810	3,042
2010	2,990	2,795	2,801	2,944	2,898	2,937	3,385	3,019	3,004	3,013	2,934	3,721
2011	3,197	2,745	2,813	3,087	3,100	2,844	2,991	3,144	3,258	3,683	3,580	

Os gráficos abaixo, Figura 4.21, exibem a sazonalidade ajustada com o estudo de tendência e ciclo, em que mais uma vez é comprovada a inexistência de ambos. O gráfico em vermelho mostra os componentes tendência/ciclo e em azul a série final ajustada sazonalmente. Claramente, existe uma variabilidade da série ajustada em torno da estimativa tendência / ciclo.

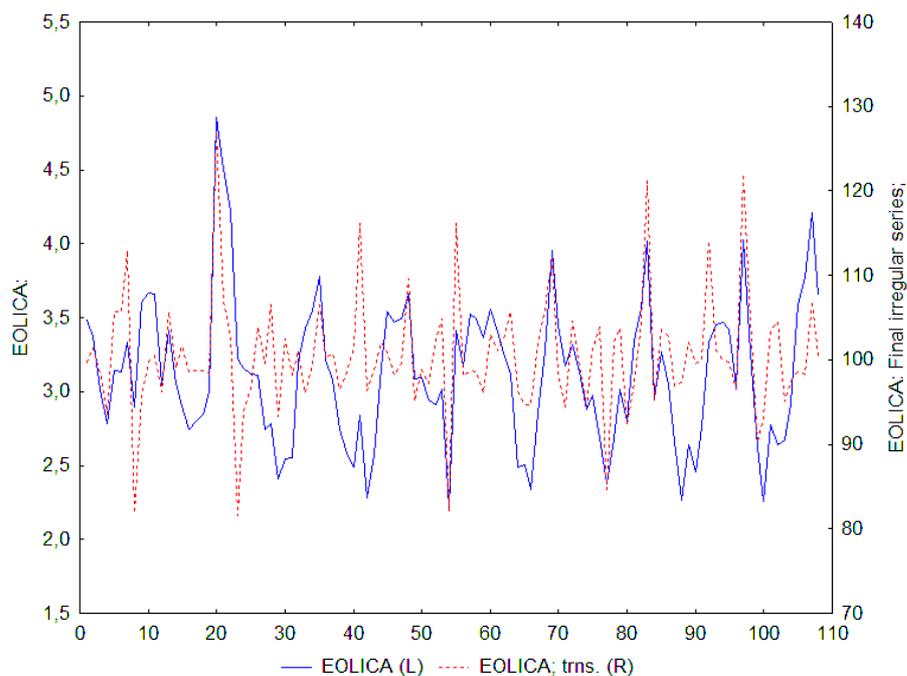


Figura 4.21 – Série sazonal original e ajustada

Na Figura 4.22, pode-se observar o comportamento da sazonalidade em diferentes anos e em diferentes meses, sendo assim as decisões podem ser tomadas de melhor forma, observando-se num dado instante de tempo, se ela irá influenciar na série de forma ascendente ou descendente.

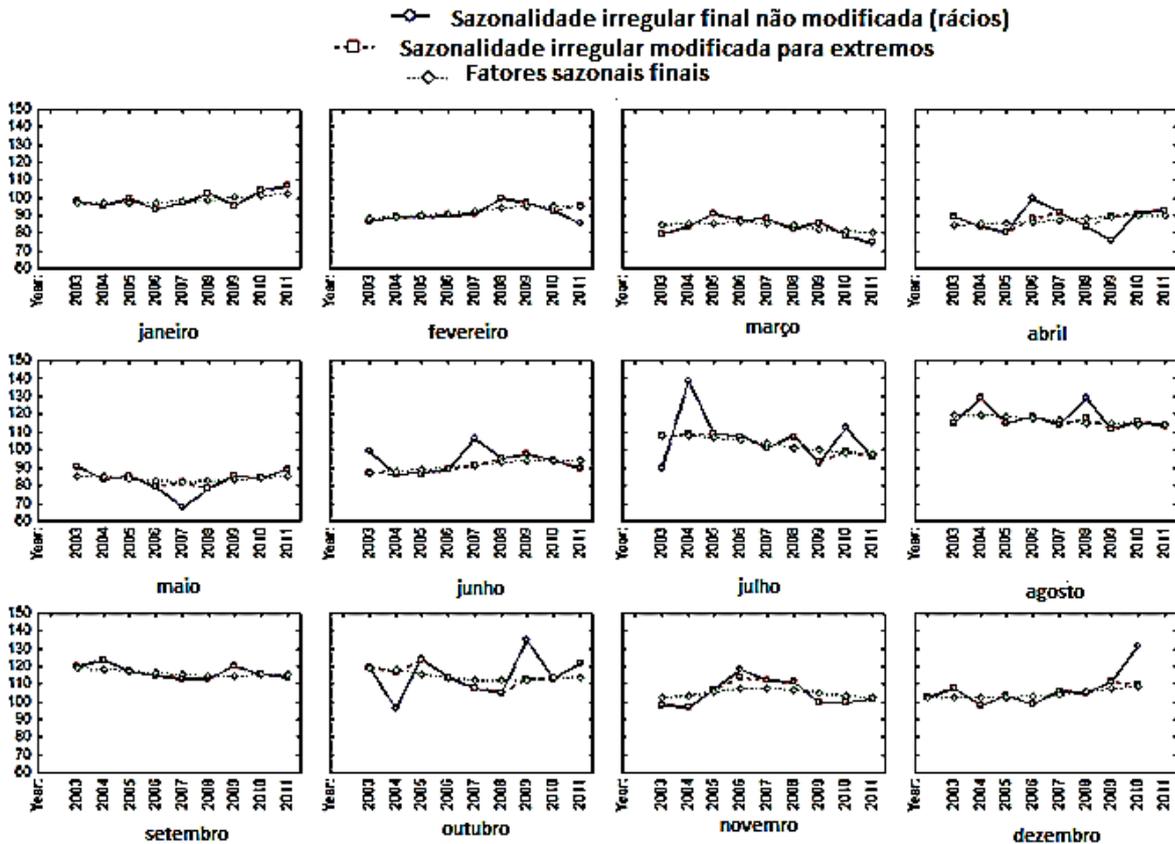


Figura 4.22 – O comportamento da sazonalidade eólica em diferentes anos e em diferentes meses

4.4.6 Avaliando o modelo da série original e ajustada

Observa-se na Figura 4.22 que a série ajustada tem melhor comportamento. Assim sendo, esta será utilizada para as inferências que se fizerem necessária, pois os efeitos devidos a casos externos ao comportamento da série foram quantificados e ajustados.

Com relação às Figuras 4.23 e 4.24, vê-se que ao se traçar a função de autocorrelação e a função de autocorrelação parcial, a série não apresenta mais o efeito de sazonalidade e também não se mostra mais autocorrelacionada. Desta forma o método utilizado cumpriu o seu propósito de tratar a sazonalidade.

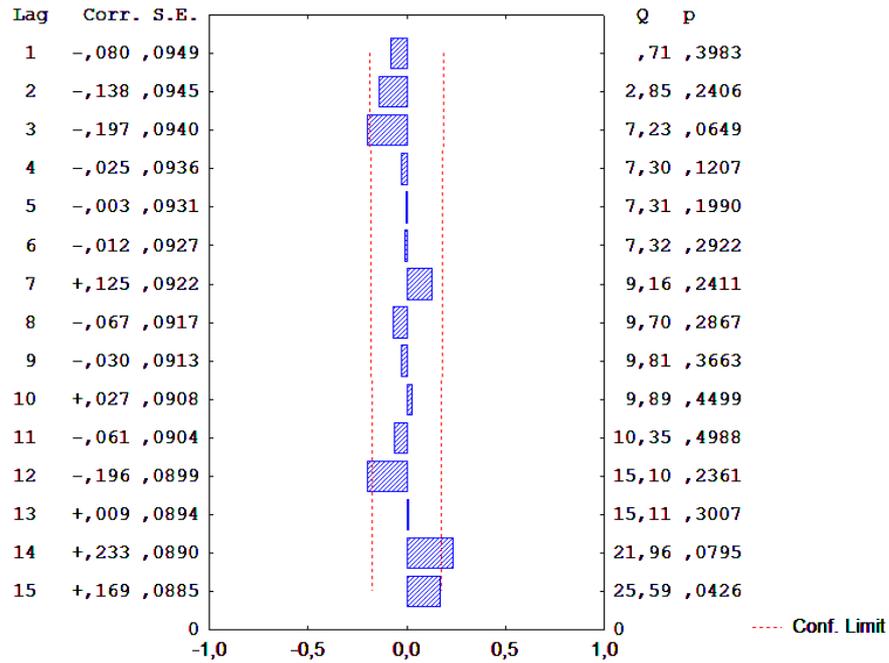


Figura 4.23 – Função de autocorrelação

Nota: Lag-(período), Corr-(correlação), S.E-(desvio), Q-(erro estatístico), p-(p-valores).

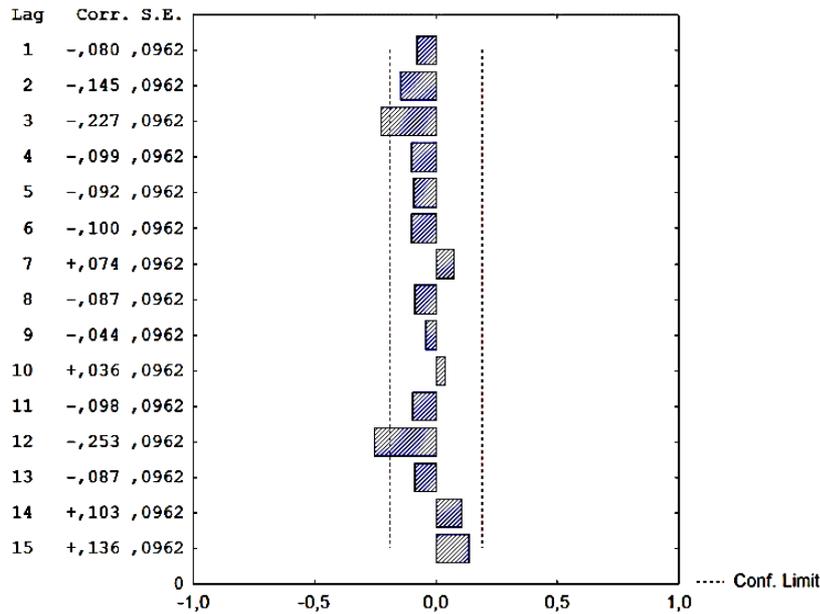


Figura 4.24 – Função de auto correlação parcial

A FAC residual do modelo mostra que a autocorrelação dos resíduos está dentro dos limites de confiabilidade de 95%, assim como ocorre na FACP. Logo, esses resíduos são não-autocorrelacionados.

4.5 Análise sobre a estabilidade da série eólica e possíveis quebras estruturais

A quebra é uma alteração no nível da série, ou seja, algo que alterou a evolução da mesma. Este estudo foi desenvolvido com a finalidade de determinar as peculiaridades no comportamento do potencial eólico de uma determinada região ou regiões com relação à estabilidade e verificar possíveis quebras estruturais na série.

Como comentado antes, no capítulo 3.8, a construção do teste CUSUMQ é idêntica à do teste CUSUM. Os limites apropriados em termos de banda para um dado nível de significância para a estatística CUSUMQ são fornecidos por $E[S_t^*]$, equação 3.43, previamente definida. A diferença entre o valor limite da banda e S_t^* pode ser dissecada ao longo do tempo num gráfico. Para isso, constroem-se duas

retas paralelas a $E[S_t^*]$ com um fator de distanciamento igual a $\pm c_0$. O valor do parâmetro c_0 é condicionado por três fatores: número de observações (T), número de parâmetros (K) e nível de significância (α). Estas retas representam o limite superior e inferior e não podem ser ultrapassadas por S_t^* , para poder concluir-se pela estabilidade dos parâmetros.

4.5.1 Teste de estabilidade

O teste de estabilidade CUSUM e CUSUMQ não detecta quebras quando os regressores são estacionários com média nula, uma vez que são sempre ortogonais em relação a qualquer quebra. É geralmente citada a baixa potência do teste CUSUM se a compararmos com a do teste de Chow. Este é um teste estatístico realizado para a comprovação de "quebra" numa tendência estável da série histórica estatística que consiste na aplicação do teste F, de George W. Snedecor e faz parte dos testes de estabilidade econométricos. Contudo, este último teste pressupõe o conhecimento prévio da ocorrência das datas de quebra estrutural. Se este fato deixar de ser conhecido ou estimado, a vantagem do teste de Chow diminui consideravelmente. O resultado do teste de estabilidade CUSUM e CUSUMQ é mostrado respectivamente na Figura 4.25. Para ultrapassar este obstáculo, é introduzido posteriormente o teste de Lanne et al 2002, testando à série quanto a estacionariedade, a possível quebra e calculando-se a possível data de quebra.

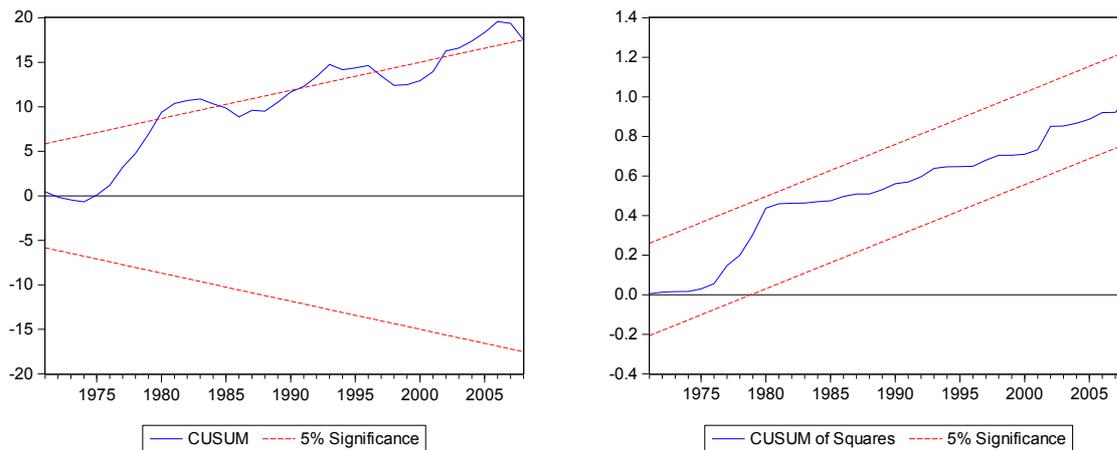


Figura 4.25 – Teste de estabilidade – CUSUM e CUSUMQ, respectivamente

Fonte: Dados da pesquisa, *software* Eviews 6.0

4.5.2 Teste Lanne

Analisando os resultados do teste CUSUM, o resultado do teste CUSUMQ evidencia uma grande instabilidade dos parâmetros. Observa-se também um comportamento instável no teste CUSUMQ. O teste sugere a existência de quebra estrutural na série em estudo. Desta forma emprega-se o teste Lanne et al 2002, que propõe que a quebra estrutural pode ocorrer ao longo de um número de períodos e expõe uma transição suave para um novo nível. Assim, uma função de mudança de nível, que é conhecida pela forma não-linear geral $f_t(\theta)\gamma$, é acrescentada ao termo determinístico μt do processo gerador de dados. Portanto, o modelo é expresso pela seguinte regressão:

$$q_t = \mu_0 + \mu_1 t + f_t(\theta)\gamma + v_t \quad (4.1)$$

onde:

θ e γ são parâmetros escalares desconhecidos

v_t representa os erros residuais gerados por um processo AR(p) com possível raiz unitária.

A mudança na função $f_t(\theta)\gamma$ pode ser:

- (i) uma variável dummy de mudança simples com data de mudança Tb (shift dummy);
- (ii) uma função de distribuição exponencial que permite uma mudança gradual não linear para um novo nível começando no período Tb (exponencial shift);
- (iii) uma função racional no operador de defasagem aplicado a uma dummy de mudança (rational shift).

O resultado do teste Lanne de raízes unitárias é mostrado na Tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Testes de raízes unitárias Lanne et al. (2001, 2002), par Série eólica

variável	t-stat	data da quebra
Eólica	-4,325	08/2001

Nota: Os valores críticos de teste (Lanne et al, 2002) são como segue: (i) com o modelo constante: -3,48 (1%) e -2,88 (5%); (ii) o modelo com tendência constante e determinista: -3,55 (1%) e -3,03 (5%).

O resultado do teste de Lanne et al. (2001, 2002) propõe um teste de raiz unitária com data de quebra desconhecida, em que a hipótese nula reside na presença de raiz unitária. O resultado do teste apresentado sugere uma quebra estrutural na série histórica eólica em ago/2001. Isto indica que a série eólica analisada sofreu mudança em seu comportamento neste período e é discutida no capítulo quinto.

4.6 Análise do fenômeno escurecimento global no Estado do Rio Grande do Sul

Há algum tempo que se relacionam as séries de insolação com a radiação global, constatando-se uma boa correlação entre ambas, o que permite calcular com

uma aceitável margem de erro uma variável a partir da outra (Núñez et al, 1977). Em numerosos estudos a insolação ou brilho solar é relacionado com a radiação solar global para as quais, na maioria das vezes, os registros são poucos, aparecendo períodos de tempo com medições não significativas ou inexistentes em muitos lugares para onde se deseja fazer uma estimativa. O estudo das séries de insolação podem fornecer informações importantes para o contexto atual nas mudanças climáticas (Houghton, 2001), sobre a qual ficam poucas dúvidas da origem antrópica.

Para realizar estimativas sobre a provável existência do escurecimento global (ver item 2.6 no capítulo segundo e apêndice A sobre Escurecimento Global) são necessárias informações de longos períodos, (décadas) para possibilitar comparações entre eles e assim, verificar as possíveis diferenças. Um banco de dados que contenha suficientes informações históricas da variável a ser estudada permite gerar modelos de previsão que podem ser ajustados às séries para fazer previsões, possibilitando com isto estimar a tendência, sazonalidade e o ciclo de comportamento da variável em qualquer local do planeta. A *World Meteorological Organization (WMO)* recomenda um número mínimo de 30 anos de informação climática para servir como referência em estudos de variabilidade e mudanças do clima (W.M.O, 2004).

Dada à escassez de medições de radiação solar global e de dados muitas vezes mal registrados ou a falta de registros de insolação para o estado do Rio Grande do Sul, optou-se por selecionar as séries de insolação que apresentassem uma maior coerência interna para obter um conjunto representativo de maior qualidade e homogeneidade dos dados, (ver item 3.5.1 capítulo terceiro, Aplicação da técnica proposta por Box & Jenkins no preenchimento dos dados ausentes do banco de dados).

Para verificar diferenças significativas no aumento ou decaimento do brilho solar nestes períodos utilizou-se a análise comparativa da variação dos dados de insolação em diferentes décadas e em diferentes meses. Com estes dados, construiu-se a Tabela 4.30 com informações das médias de variação para cada mês e em diferentes períodos.

Tabela 4.30 – Variação média do brilho solar em diferentes meses e em diferentes períodos (dados medidos)

	Δ1961 a 1980	Δ1971 a 1990	Δ1981 a 2000	Δ1991 a 2011	Média variação
janeiro	-2,15%	-1,3%	-6,02%	6,26%	-0,80%
fevereiro	0,00%	-4,16%	-8,83%	10,3%	-0,67%
março	-1,06%	9,22%	-9,57%	5,28%	0,96%
abril	4,33%	-15,97%	-0,96%	9,77%	-0,70%
maio	-8,21%	-2,15%	-2,19%	-5,42%	-4,49%
junho	-5,03%	-6,32%	0,21%	-2,40%	-3,38%
julho	-2,93%	0,59%	-5,78%	5,15%	-0,74%
agosto	-6,83%	1,96%	-0,97%	2,13%	-0,92%
setembro	7,12%	-8,46%	-2,14%	-1,12%	-1,15%
outubro	2,01%	6,67%	-16,34%	7,99%	0,08%
novembro	5,60%	-4,27%	-2,09%	4,00%	0,81%
dezembro	-0,37%	-1,00%	-9,32%	5,48%	-1,30%
Δ média	-0,63%	-2,09%	-5,33%	3,95%	

No período compreendido entre 1971 e 1990, foi constatada uma menor intensidade no brilho solar com relação ao período anterior (1961-1980), sendo que alguns meses apresentaram um declínio mais forte de insolação. Entre estes, destacam-se fevereiro, abril, junho, setembro e novembro com variações significativamente menores. Entre 1981 e 2000, o declínio mostrou ser mais intenso que o anterior (1971-1990), principalmente entre os meses, janeiro, fevereiro, março, julho e outubro com alguns índices apresentando médias de variações de redução na ordem de 9,57% e 16%.

Na Tabela 4.31 podem-se notar os meses que apresentaram diferenças entre os períodos através de suas médias e o respectivo desvio padrão. Os índices (a,b) representam as diferenças médias entre os períodos com p-valores mais significativos, isto é, maior que 5%. Nota-se que existiram diferenças entre os períodos para o mês de abril, maio, setembro, outubro e dezembro. Para o mês de abril a maior média foi para o período entre 1971 a 1980, que difere dos períodos de 1981 a 1990 e também do período de 1991 a 2000. Para o mês de maio, a maior

média foi no período de 1961 a 1970, e este período difere do período de 2001 a 2011. Para o mês de setembro, a maior média é para o período de 1971 a 1980, que difere do período de 1961 a 1970. Para o mês de outubro, a maior média foi para o período de 1981 a 1990, sendo que esta difere do período de 1991 a 2000. Finalmente, para o mês de dezembro, a maior média foi para o período de 1961 a 1970, que difere do período de 1991 a 2000.

Tabela 4.31 – Variação média do brilho solar em diferentes períodos e em diferentes meses

Períodos	1961 a 1970	1971 a 1980	1981 a 1990	1991 a 2000	2001 a 2011	P-valor
	Média (±DP)					
janeiro	7,91(±0,88) a	7,74(±1,13) a	7,64(±0,79) a	7,18(±0,73) a	7,63(±0,60) a	0,393
fevereiro	7,44(±0,76) a	7,44(±1,03) a	7,13(±0,70) a	6,50(±0,85) a	7,17(±0,70) a	0,080
março	6,58(±0,38) a	6,51(±0,51) a	7,11(±0,71) a	6,43(±0,54) a	6,77(±0,63) a	0,075
abril	6,46(±0,83) ab	6,74(±0,71) a	5,68(±0,80) b	5,63(±0,58) b	6,18(±0,78) ab	0,006
maio	6,09(±0,60) a	5,59(±0,66) ab	5,47(±1,07) ab	5,35(±0,36) ab	5,06(±0,63) b	0,026
junho	5,16(±0,53) a	4,90(±0,93) a	4,59(±0,69) a	4,60(±0,29) a	4,49(±0,48) a	0,107
julho	5,13(±0,66) a	5,06(±0,66) a	5,09(±1,12) a	4,85(±0,51) a	5,10(±0,46) a	0,918
agosto	5,44(±0,86) a	5,09(±0,88) a	5,18(±0,99) a	5,17(±0,56) a	5,44(±0,57) a	0,772
setembro	4,92(±1,10) b	5,91(±0,54) a	5,41(±0,43) ab	5,43(±0,36) ab	5,55(±0,58) ab	0,028
outubro	6,46(±0,76) ab	6,59(±0,93) ab	7,03(±0,58) a	5,88(±0,44) b	6,35(±0,97) ab	0,032
novembro	7,31(±0,75) a	7,72(±0,68) a	7,39(±0,97) a	7,24(±0,49) a	7,53(±0,74) a	0,613
dezembro	8,07 a (±0,85)	8,04(±0,82) ab	8,04(±0,30) ab	7,29(±0,40) b	7,69(±0,71) ab	0,044

Na Tabela 4.32 pode-se verificar a diferença entre os períodos de 1961 a 1979 e 1980 a 2000, períodos estes que demonstram ter iniciado a diminuição no brilho solar, segundo os dados disponíveis, principalmente entre os anos de 1975 a 2000. Também é mostrada a variação destes com os respectivos p-valores. Nota-se que, dependendo do período que se tome para verificar as médias de variação entre eles, este valor pode mudar. Ficam evidenciados as variações de diminuição entre estes dois períodos em diferentes meses resultando na média de variação de -4%.

Tabela 4.32 – Diferença entre períodos e a variação destes

Mês	Período	Média	Desv.pad	p-valor	Varição
Jan	1961 a 1979	7,77	0,97	0,349	-4%
	1980 a 2000	7,49	0,85		
Fev	1961 a 1979	7,40	0,88	0,07	-7%
	1980 a 2000	6,88	0,86		
Mar	1961 a 1979	6,55	0,45	0,256	3%
	1980 a 2000	6,76	0,69		
Abr	1961 a 1979	6,60	0,79	<0,0001	-14%
	1980 a 2000	5,70	0,69		
Mai	1961 a 1979	5,87	0,67	0,047	-8%
	1980 a 2000	5,41	0,76		
Jun	1961 a 1979	5,04	0,77	0,049	-8%
	1980 a 2000	4,62	0,51		
Jul	1961 a 1979	5,08	0,65	0,749	-2%
	1980 a 2000	5,00	0,84		
Ago	1961 a 1979	5,24	0,88	0,892	-1%
	1980 a 2000	5,20	0,77		
Set	1961 a 1979	5,36	0,98	0,646	2%
	1980 a 2000	5,47	0,44		
Out	1961 a 1979	6,59	0,80	0,464	-3%
	1980 a 2000	6,40	0,79		
Nov	1961 a 1979	7,54	0,74	0,309	-3%
	1980 a 2000	7,30	0,74		
Dez	1961 a 1979	8,10	0,82	0,045	-5%
	1980 a 2000	7,66	0,51		
				Média Varição	-4%

Uma análise gráfica das médias de horas de brilho solar para o período compreendido entre 1961 e 2000 da série histórica indica uma tendência linear com uma declividade negativa conforme Figura 4.26. Esta análise confirma o possível decaimento do brilho solar entre 1960 a 1990, como verificado por outros autores em diferentes lugares do Planeta (ver capítulo segundo e apêndice A), sinalizando para um escurecimento global também verificado no estado do Rio Grande do sul, (os resultados dos ajustes encontram-se no Apêndice CA).

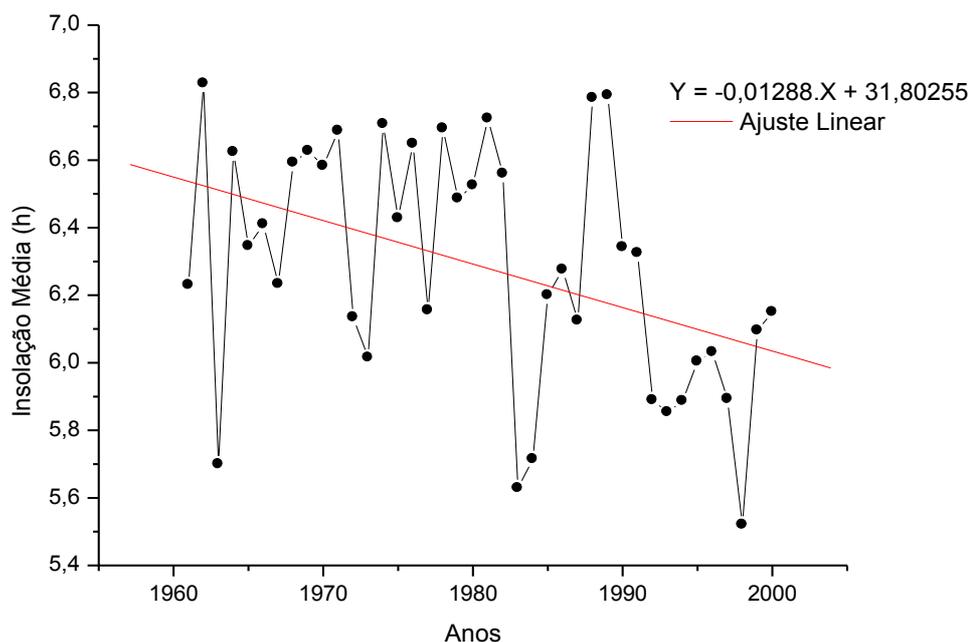


Figura 4.26 – Tendência linear da insolação da série histórica média anual no estado do Rio Grande do Sul. Período (1961-2000)

Para os períodos compreendidos entre 1970-2000, (Figura 4.27) e 1978-1998, (Figura 4.28) a análise gráfica também indicou uma tendência linear de decaimento da insolação em concordância com os resultados verificados na Tabela 4.32 (os resultados dos ajustes encontram-se nos Apêndices CB e CC).

Tanto os resultados mostrados nos gráficos como os apresentados na Tabela 4.32 mostram que, entre as décadas de 1970 a 1998, ocorreu uma redução média em horas do brilho solar mais intensa que a do período anterior, isto é, na década de 60 em todo o estado do Rio Grande do Sul.

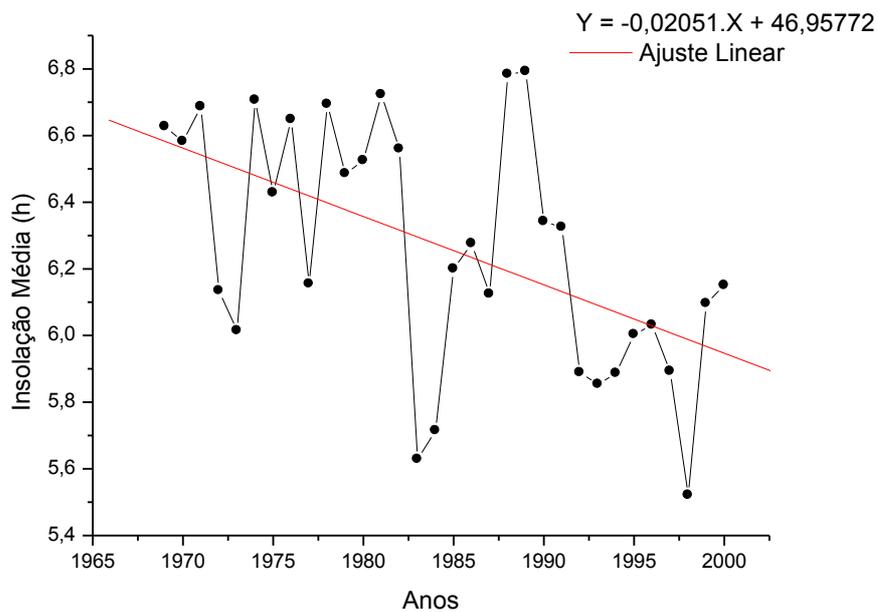


Figura 4.27 – Tendência linear da insolação média anual no estado do Rio Grande do Sul. Período (1970-2000)

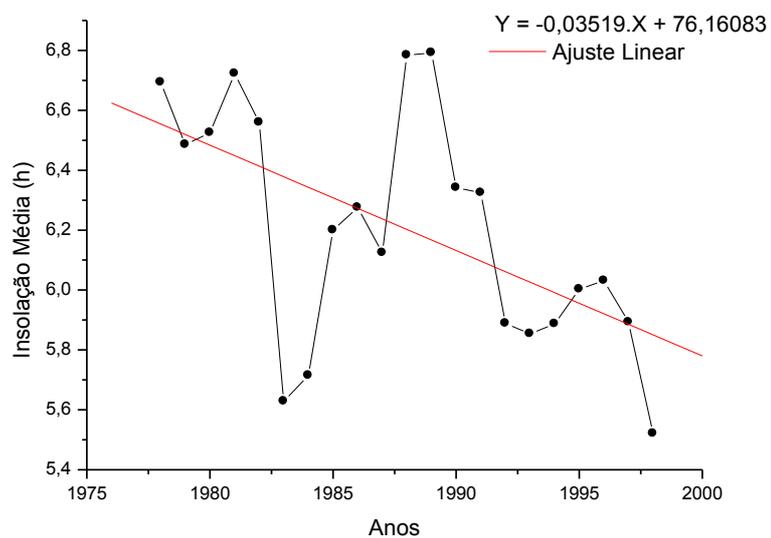


Figura 4.28 – Tendência linear da insolação média anual no estado do Rio Grande do Sul. Período (1978-1998)

Desde 1960, os dados medidos e observados por outros autores, referenciados no capítulo 2 e no apêndice A, indicaram, que nos últimos 50 anos, a quantidade média de radiação solar que atingiu o solo havia diminuído em 3% a cada década. Até próximo à virada do milênio, foi constatado neste trabalho, um decaimento gradual em média, na insolação por década, da ordem de 2% no estado do Rio Grande do Sul, o qual se intensificou mais entre as décadas de 1970 a 1990. Por outro lado, a partir da metade dos anos 90, parece ter-se invertido esta tendência, evidenciando um clareamento gradual do brilho solar até o período de 2011.

Pelos dados medidos da variação média da insolação (Tabela 4.30), constata-se a existência de mais valores positivos do que negativos na maioria dos meses entre 1991 a 2011, o que indica a possibilidade de inversão deste fenômeno de escurecimento para clareamento. A média de variação encontrada entre meses para o período de 1991 a 2011 da insolação foi de 3,95%, indicando um aumento do brilho solar. Comparado com os períodos anteriores, verifica-se uma sinalização da recuperação gradual para o clareamento.

Uma análise gráfica das médias de horas de brilho solar, para o período compreendido entre 1995 a 2011 indicou uma tendência linear com uma declividade positiva (Figura 4.29 e os resultados dos ajustes no Apêndice CD), o que está de acordo com os resultados encontrados da média de variação da insolação para este período.

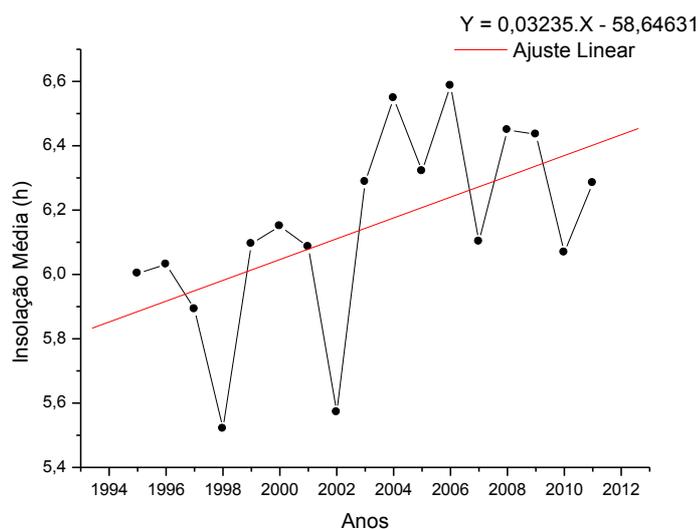


Figura 4.29 – Tendência linear da insolação média anual no estado do Rio Grande do Sul. Período (1995-2011)

Constata-se, também, que a variação média final da insolação entre 1961 e 2011 indicou um percentual negativo de 1%. Isto é uma evidência de que, mesmo após a inversão do fenômeno de escurecimento para clareamento, não se tenha observado até o momento índices iguais ou maiores que os índices de insolação verificados na década de 1960.

As Figuras 4.30 e 4.31 ilustram a análise gráfica das médias de horas de insolação para o período de 1975 a 2011, através de dois ajustes polinomiais de ordens diferentes, indicando um decaimento do brilho solar desde a década de 70 até próximo do século XX. Logo após, mostra-se uma virada de tendência para um crescimento do clareamento até 2011 (os resultados dos ajustes encontram-se nos Apêndices CE e CF).

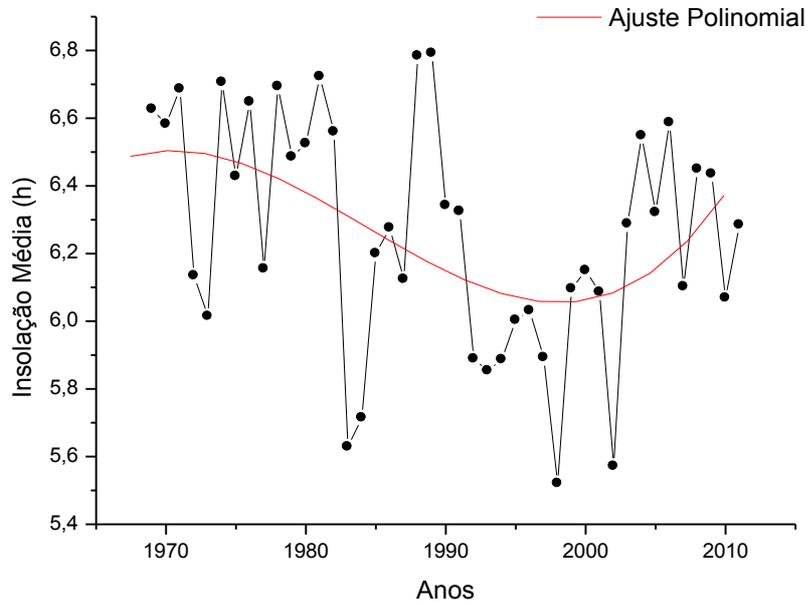


Figura 4.30 – Ajuste polinomial da série histórica de insolação média anual para o estado do Rio Grande do Sul. Período (1975-2011)

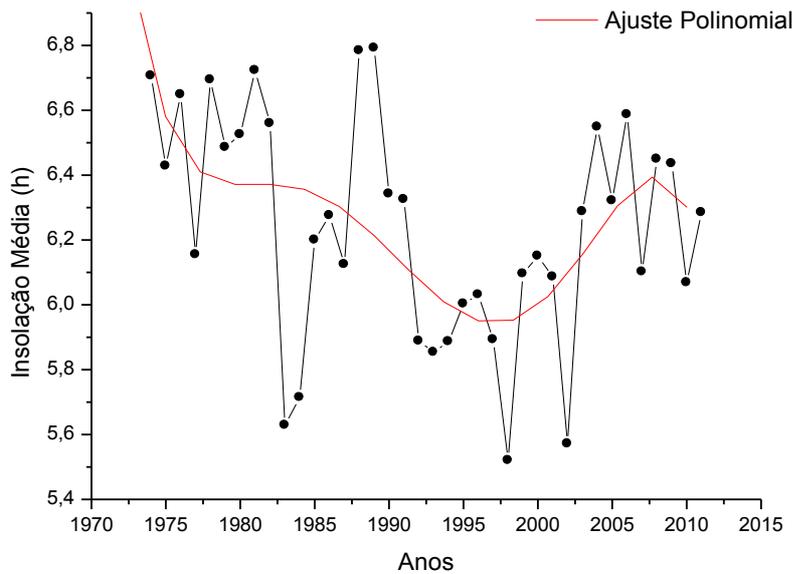


Figura 4.31 – Ajuste polinomial da insolação média anual para o estado do Rio Grande do Sul, (1975-2011)

4.6.1 Estações do ano-comparação

Com a finalidade de verificar a existência de variações significativas no decaimento da insolação entre as estações do ano, em diferentes períodos, foi realizada a variação média de números de horas efetivas nas diferentes estações do ano, para o estado do Rio Grande do Sul (RS). A Figura 4.32 compara a insolação nas estações do ano entre as décadas de 1980, 1990 e 2000. Verifica-se que no verão ocorreu um decréscimo na insolação de -10% entre as décadas de 1980 e 1990 voltando a aumentar na década de 2000 em 7%, mas resultando numa média menor do que na década de 80 em -3%. Foram constatadas também diminuições de insolação nas outras três estações do ano.

No outono, entre as décadas de 1980 e 1990 a redução foi de -5% da insolação, voltando a aumentar em 2% entre as décadas de 1990 e 2000. Em comparação com as décadas anteriores, de 1980 e 1990, o saldo foi negativo de -3%. A estação de inverno apresentou uma redução de -2% entre as décadas de 1980 e 1990 e uma recuperação de 1% no final de 2000. Se comparado com as décadas de 80 e 90, o saldo de insolação ficou negativo de -1%. Para a estação de primavera, o resultado mostra um decaimento da ordem de -6% entre as décadas de 1980 e 1990, com um incremento na ordem de 4% no final da década de 2000. Se comparado o resultado com as décadas de 1980 e 1990, a estação de primavera apresentou um índice negativo de -2%.

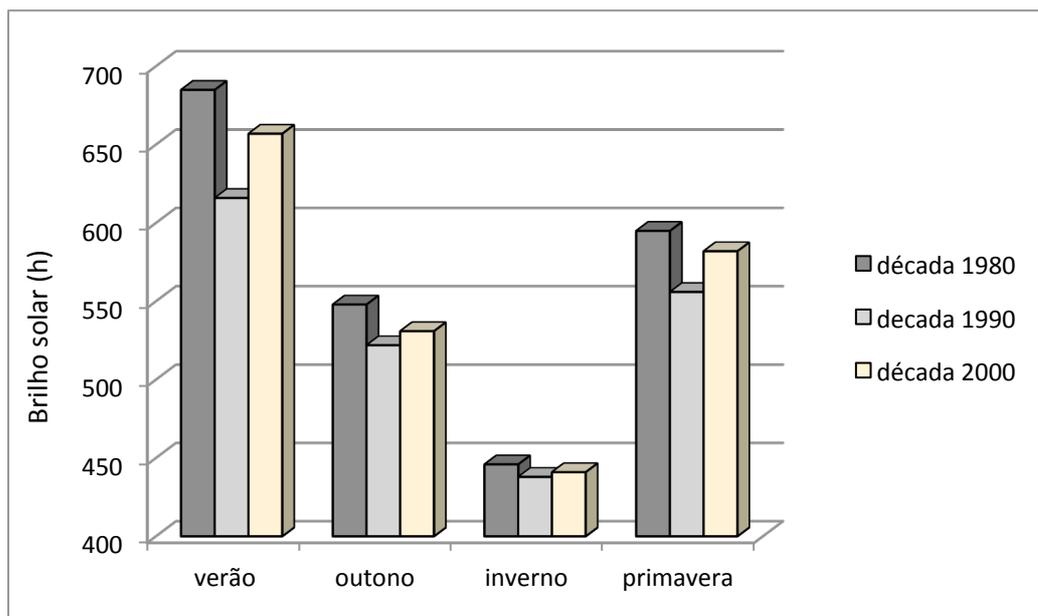


Figura 4.32 – Comparação entre as estações do ano da média de insolação em número de horas para diferentes períodos

Ainda pela Figura 4.32 observa-se que houve um decaimento da insolação entre as diferentes estações do ano. Da década de 1980 para a década de 1990 todas as estações do ano indicaram diminuição no brilho solar. Na década de 2000 os índices voltam a crescer mas resultando em médias menores de insolação do que as verificadas nas décadas de 1980 e 1990.

4.7 Análise espectral de séries temporais – Estudo do ciclo na série de insolação e radiação

Com o objetivo de se explorar a possível existência de ciclos ou periodicidade na série de insolação e de radiação solar foi utilizada a análise de Fourier, comentada no capítulo 3.7 e no apêndice BB. O principal objetivo da Transformada de Fourier numa função cíclica é a decomposição dessa função numa soma de senoides de diferentes frequências e, possivelmente, com diferentes amplitudes. Quando somadas, estas senoites reproduzem a função cíclica original, neste caso tem-se a Transformada de Fourier desta função.

Na Figura 4.33 tem-se a representação de uma senoide com suas principais características cíclicas: amplitude, fase e período. O conceito de ciclo relaciona-se a repetição regular em um tempo determinado chamado de período, da transição do pico ao vale, e de volta ao pico. A frequência é definida como o número de ciclos completados numa unidade de tempo, ou seja, é a inversa do período. A frequência indica a velocidade com que um fenômeno cíclico se repete. A amplitude refere-se à magnitude da distância vertical entre pico e vale numa função cíclica. No caso da fase, uma função cíclica pode atingir um pico, um vale, ou qualquer outro valor intermediário, em um momento $t = 0$, dependendo da posição da mesma com relação ao eixo do tempo.

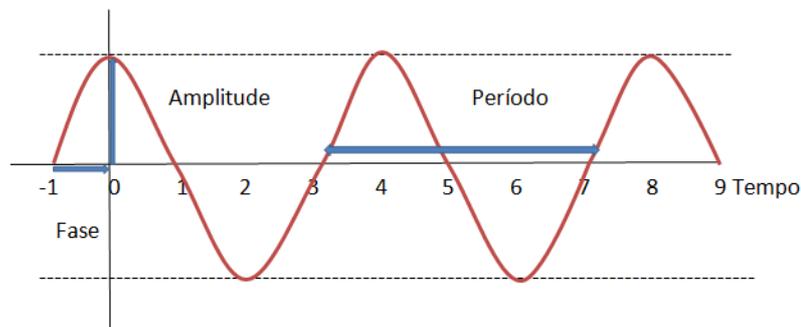


Figura 4.33 – Características de um ciclo

As séries da insolação e da radiação solar não apresentam uma tendência definida, mas uma grande variação no decorrer dos anos como se pode observar nas Figuras 4.34 e 4.35, onde a variável insolação é dada em horas (h) e a radiação solar em ($cal \cdot cm^{-2}$).

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é um método altamente eficiente de reagrupar os cálculos dos coeficientes de uma Transformada Discreta de Fourier (DFT). Ao invés do cálculo da DFT diretamente pela definição, usa-se um algoritmo conhecido como a FFT (*Transformada Rápida de Fourier*) que permite avaliar a DFT com menor esforço computacional. A FFT foi implementada com o objetivo de diminuir complexidade (temporal) necessária para calcular uma DFT (*Transformada Discreta de Fourier*), visando aplicações em tempo real.

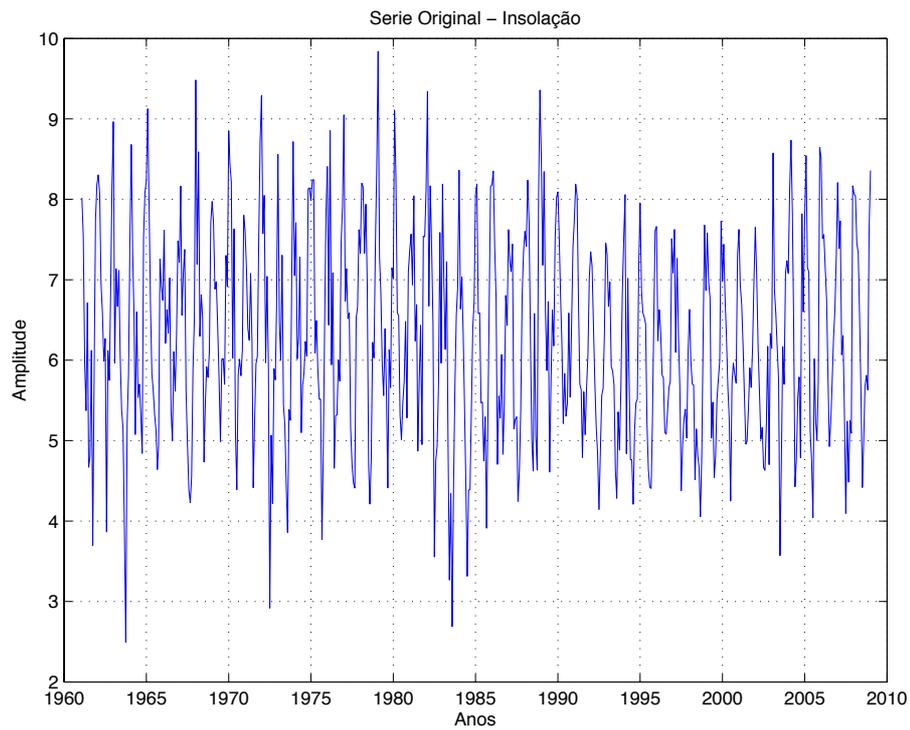


Figura 4.34 – Série histórica original de insolação média mensal (período x amplitude em (h))

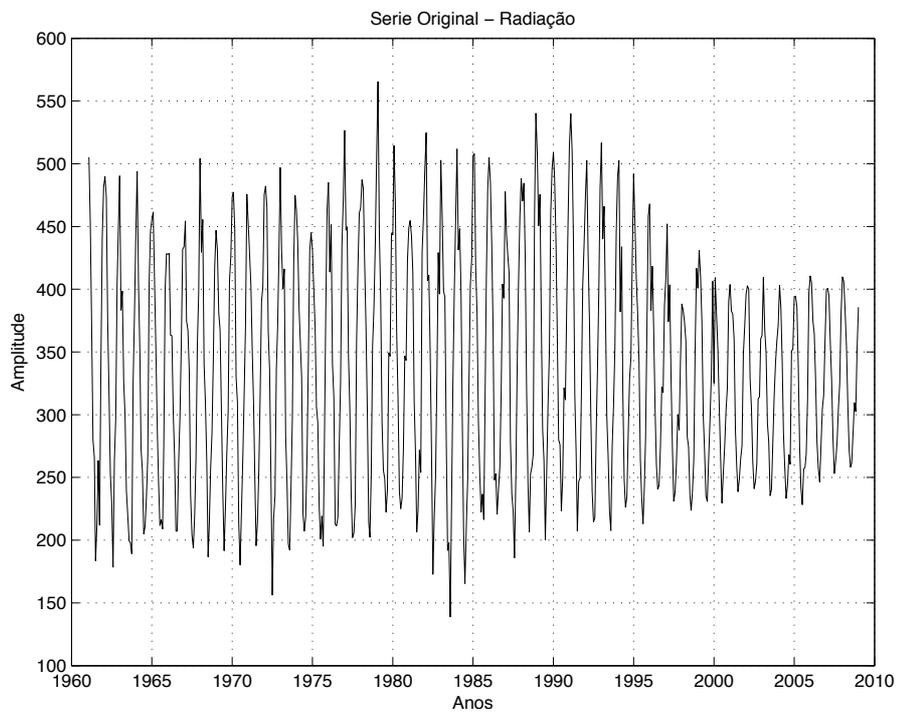


Figura 4.35 – Série histórica original da radiação média mensal (período x amplitude em ($cal \cdot cm^{-2}$))

4.7.1 Equações utilizadas na Transformada de Fourier

As equações aqui apresentadas foram utilizadas na rotina computacional que consta no apêndice B, juntamente com a formula para a reconstrução da série no apêndice BA para a obtenção dos resultados numéricos e gráficos.

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (4.1)$$

$$x(j) = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (4.2)$$

onde $X(k)$ corresponde à transformada da série temporal.

4.7.2 Gráficos obtidos com a Transformada de Fourier.

As Figuras 4.36 e 4.37 mostram as séries ajustadas da insolação e da radiação solar. O eixo y foi representado em escala logarítmica onde é possível observar-se melhor as amplitudes das componentes de frequência. Existe uma simetria que ocorre tradicionalmente em uma representação no domínio da frequência, ou seja, deve-se considerar apenas o lado positivo do gráfico e os valores do eixo y correspondem diretamente às amplitudes das componentes de frequência.

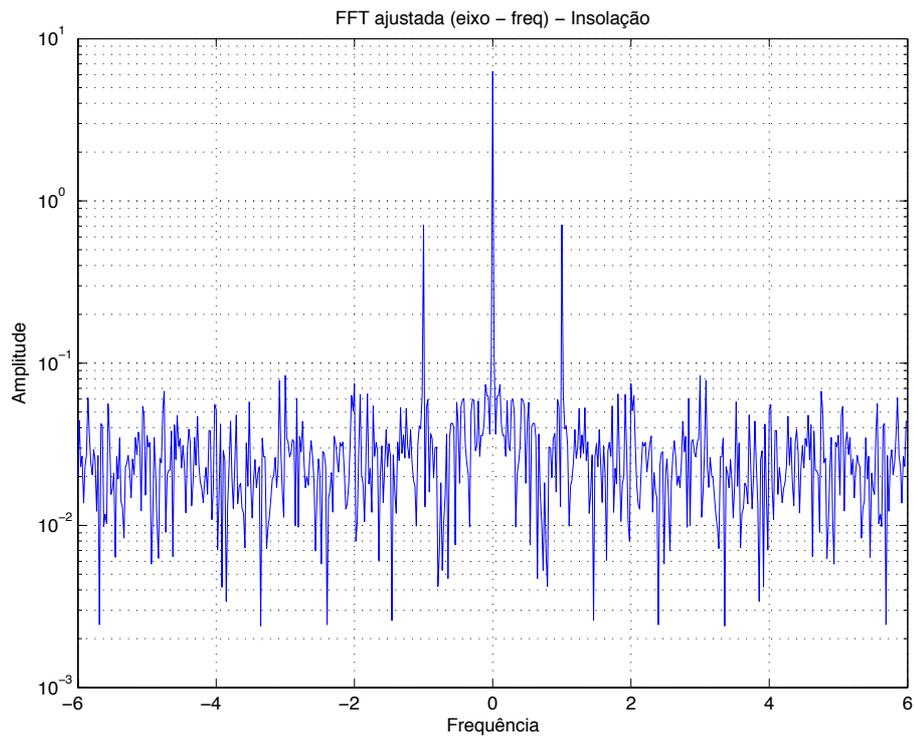


Figura 4.36 – Série da insolação ajustada (amplitude x frequência) (freq./ano)

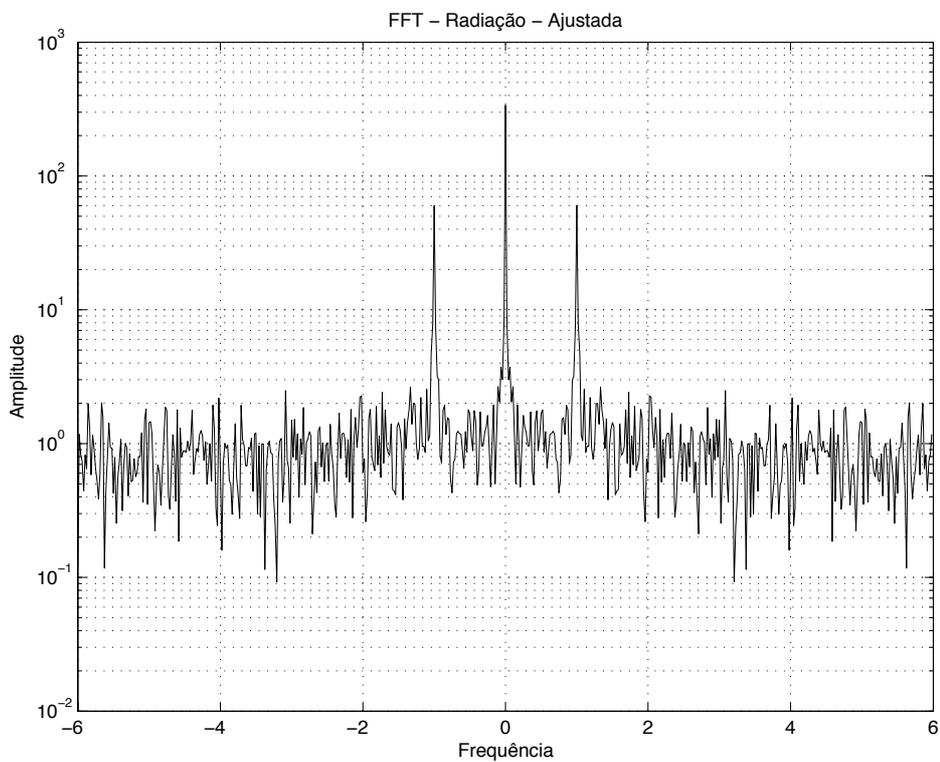


Figura 4.37 – Série da radiação ajustada (amplitude x frequência) freq.(1/ano)

Os principais componentes de frequência da série temporal estudados da insolação e da variável radiação solar global estão representadas através dos gráficos mostrados pelas Figuras 4.38 e 4.39 onde podem-se visualizar os principais períodos (em anos) encontrados com suas respectivas amplitudes. E na Tabela 4.33, constam os valores das amplitudes da variável insolação conforme os ciclos representados na Tabela 4.34.

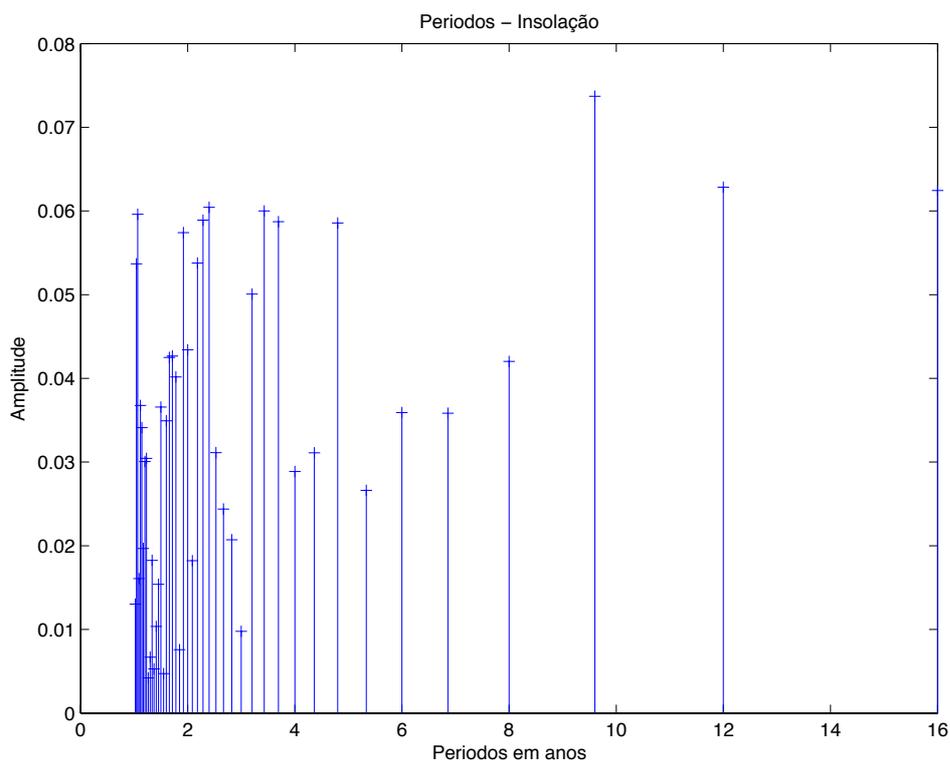


Figura 4.38 – Série da insolação com seus respectivos períodos e amplitudes em (h)

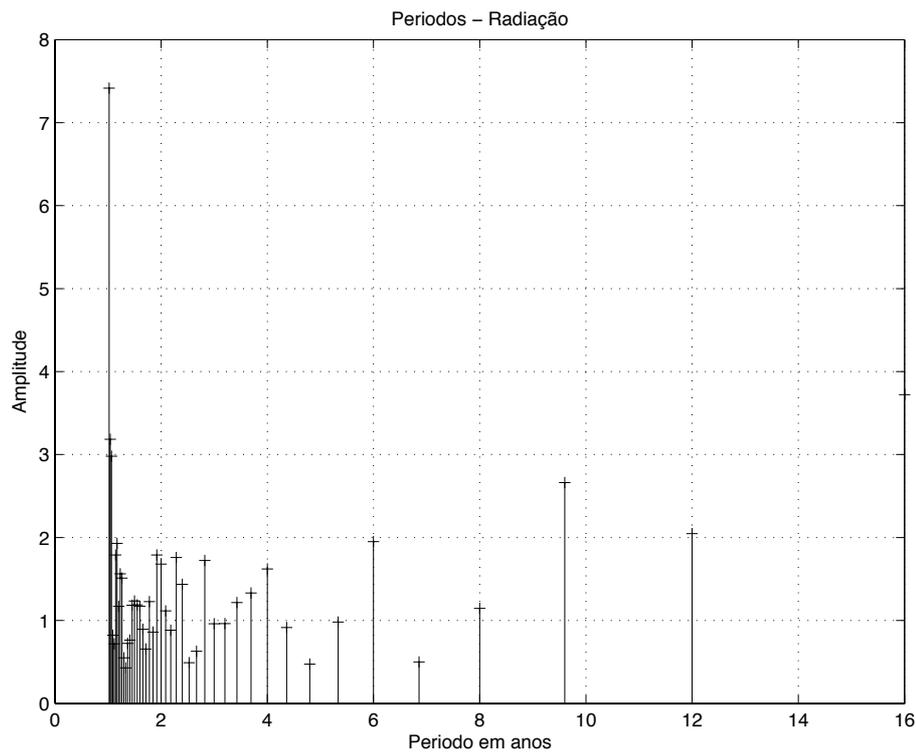


Figura 4.39 – Série da radiação solar global com seus respectivos períodos e amplitudes em $cal \cdot cm^{-2}$

A amplitude do gráfico representado na Figura 4.38 acima, o primeiro valor apresentado 0,0365 corresponde à linha do período de 24 anos, 0,0624 ao período de 16 anos e 0,0628 à linha do período de 12 anos, ou seja, os valores abaixo correspondem aos valores para as linhas da direita para esquerda, Tabela 4.33.

Tabela 4.33 – Valores das amplitudes da insolação (h)

0,0365	0,0624	0,0628	0,0737	0,0420	0,0358	0,0359	0,0266	0,0586	0,0311	0,0289
0,0587	0,0600	0,0501	0,0098	0,0207	0,0244	0,0311	0,0604	0,0589	0,0538	0,0182
0,0434	0,0574	0,0076	0,0402	0,0427	0,0425	0,0349	0,0047	0,0366	0,0154	0,0104
0,0053	0,0183	0,0067	0,0042	0,0304	0,0301	0,0197				
0,0341	0,0368	0,0161	0,0596	0,0537	0,0130					

Tabela 4.34 – Valores dos períodos (em anos) dos mesmos gráficos acima da direita para esquerda

24,0000	16,0000	12,0000	9,6000	8,0000	6,8571	6,0000	5,3333	4,8000	4,3636
4,0000	3,6923	3,4286	3,2000	3,0000	2,8235	2,6667	2,5263	2,4000	2,2857
2,1818	2,0870	2,0000	1,9200	1,8462	1,7778	1,7143	1,6552	1,6000	1,5484
1,5000	1,4545	1,4118	1,3714	1,3333	1,2973	1,2632	1,2308	1,2000	1,1707
1,1429	1,1163	1,0909	1,0667	1,0435	1,0213				

O gráfico representado pela Figura 4.40 mostra os dois períodos que não foram representados nos gráficos anteriores e referem-se aos ciclos de 24 e 16 anos.

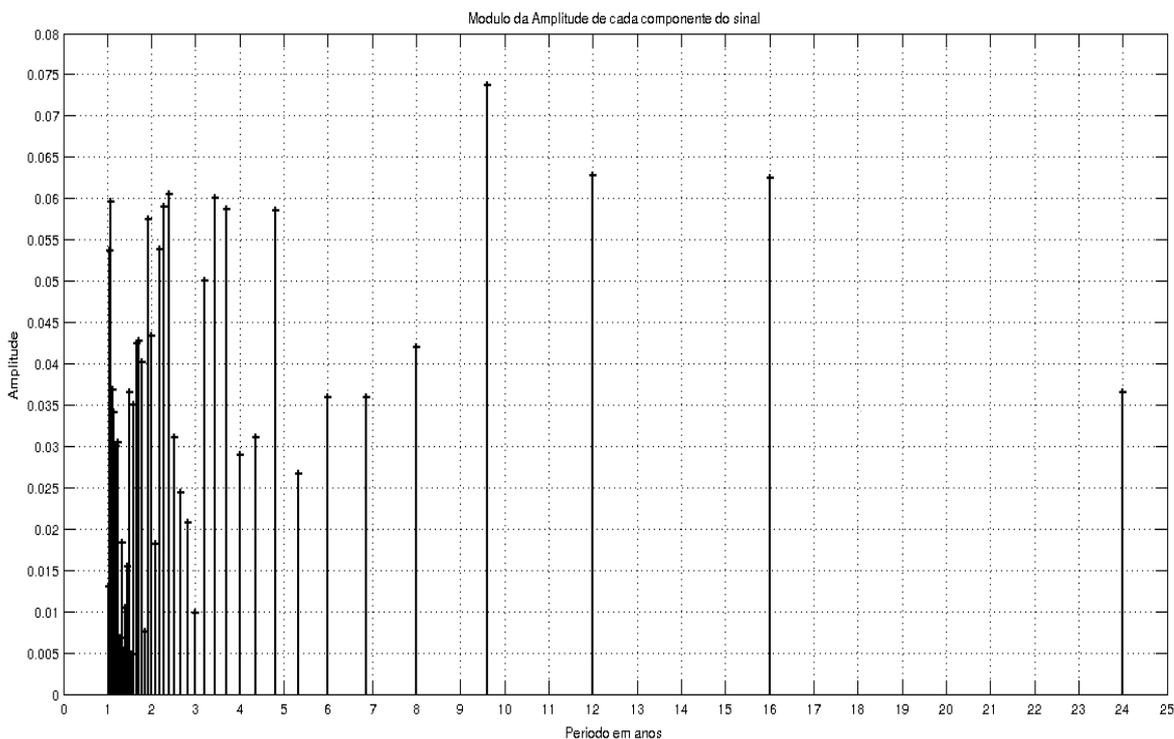


Figura 4.40 – Série da insolação com as principais componentes de períodos

4.7.3 Fases dos principais componentes da série para a variável insolação

A Tabela 4.35 contém as amplitudes, fase e frequência dos períodos mais representativos que foram observados na série de insolação. No apêndice BA, encontram-se todos os valores tabelados dos diferentes períodos que foram obtidos na reconstrução computacional e a sua respectiva equação. Os períodos relevantes para este trabalho foram aqueles que apresentaram condições de amplitude e frequência compatíveis com algum ciclo conhecido e que mostrassem valores de potência considerados. Para a radiação solar os valores encontrados foram obtidos através das variações cíclicas sobre a média de $340,4462 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$ (frequência “zero” – componente DC), da Figura 4.39.

Consideraram-se, para análise deste trabalho os períodos com amplitudes de 0,0624 (16 anos), 0,0628 (12 anos), 0,0737 (9,56 anos) e 0,0586 (4,8 anos), conforme a Tabela 4.35.

Tabela 4.35 – Amplitude, fase e frequências de alguns períodos observados na variável insolação

Amplitude(h)	Fase (graus)	Freq (1/ano)	Período (anos)
6,2789	0	0	0
0,1124	271,9351	0,0208	48,07692308
0,0365	348,9674	0,0417	23,98081535
0,0624	53,6093	0,0625	16
0,0628	185,7682	0,0833	12,00480192
0,0737	36,6274	0,1042	9,596928983
0,042	197,5897	0,125	8
0,0358	324,2945	0,1458	6,858710562
0,0359	181,3734	0,1667	5,99880024
0,0266	148,6445	0,1875	5,333333333
0,0586	314,6134	0,2083	4,800768123
0,0311	3,9807	0,2292	4,363001745
0,0289	300,1421	0,25	4

Amplitude(h)	Fase (graus)	Freq (1/ano)	Período (anos)
0,0587	120,9293	0,2708	3,692762186
0,06	283,5242	0,2917	3,428179637

4.8 Síntese do capítulo

Analisando os modelos e os resíduos utilizados nas séries temporais da insolação, radiação e eólica, pode-se concluir que o modelo foi capaz de explicar o fenômeno em estudo com relação à tendência comportamental das variáveis.

Viu-se que, em termos estatísticos, existem critérios bem definidos que determinam a escolha do modelo como comentado antes. Para realizar as extrapolações é necessário que a série tenha pelo menos 5 anos, e que erro absoluto médio de previsão nos últimos 3 anos seja inferior a 12%.

No que tange à extrapolação, é necessário que a série não tenha mais de 10 anos e que o erro de previsão nos últimos três anos seja inferior a 18% e que não existam sinais de sobre diferenciação. Logo, atendendo a todas as especificidades, foi apresentado o estudo das séries descrito neste capítulo.

O resultado do teste de Lanne, apresentado neste teste indica uma quebra estrutural em 08/2001. Logo, sugere que se faça uma análise global, uma análise antes deste período e após esta data para verificar alguma condição na série que possa levar a inferir comentários sobre as possíveis causas da quebra estrutural.

No caso do fenômeno escurecimento global no estado do Rio Grande do Sul, observa-se que houve um decaimento da insolação entre as diferentes estações do ano. Da década de 1980 para a década de 1990 todas as estações do ano indicaram diminuição no brilho solar. Na década de 2000 os índices voltam a crescer, mas resultando em médias menores de insolação do que as verificadas nas décadas de 1980 e 1990.

Com relação ao ciclo nas variáveis insolação e radiação solar, os períodos com amplitudes de 0,0624 (16 anos), 0,0628 (12 anos), 0,0737 (9,56 anos) e 0,0586 (4,8 anos), foram os que apresentaram maiores amplitudes para que se pudesse fazer alguma inferência com algum ciclo conhecido. Além disso, possibilitaram condições para avaliação das possíveis diferenças em nossas estimativas de

medidas no caso de não se considerar a fase e a amplitude em que se encontra o ciclo em um determinado momento.

No capítulo quinto, discute-se os resultados obtidos neste capítulo referente às variáveis analisadas e comparam-se com os dados medidos a tendência comportamental destas variáveis com vista à predição das variações cíclicas de intensidade solar e vento.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DAS VARIÁVEIS ANALISADAS

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos no capítulo quarto referentes às variáveis, insolação, radiação solar global e velocidade média dos ventos, bem como, as definições dos principais ciclos encontrados na análise espectral. Também são demonstrados os resultados das temperaturas mínima e máxima, bem como a velocidade máxima dos ventos por região. Estas informações extras, obtidas no banco de dados, objetivam contribuir em futuros trabalhos e servir como subsídio de comparação com aqueles já estudados.

Além disso, são analisados e comentados os resultados da possível diminuição de insolação no estado do Rio Grande do Sul verificados nas décadas de 1970 a 1990 e suas consequências para a geração elétrica e outras atividades que estejam relacionadas diretamente com a radiação solar.

5.1 Informações das variáveis do banco de dados

Pela análise das variáveis descritas no capítulo terceiro na estruturação do banco de dados, constatam-se, através dos gráficos representados pelas Figuras 5.1(a, b), as médias das temperaturas mínimas e máximas em graus centígrados por região.

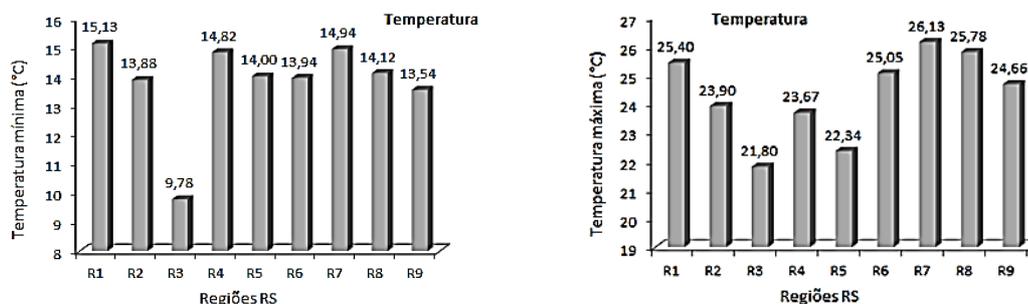


Figura 5.1 – Temperatura mínima (a - esquerda) e temperatura máxima (b - direita) em (°C) por região

Percebe-se que as regiões que mostraram a maior máxima foram as regiões Nordeste (R7) e Central (R8), e a mínima ficou com as regiões Serrana (R3) e a Planalto Nordeste (R9), juntamente com as regiões, Sul (R5) e Fronteira Oeste (R6).

Para a velocidade média dos ventos representada pela Figura 5.2 (a), os resultados no banco de dados mostram que as regiões Sul (R5), região Fronteira Oeste (R6) e região Litoral Norte (R4) foram as que apresentaram a maior média. Com relação à velocidade máxima do vento, Figura 5.2 (b), a região Serrana, a região Sul e o Litoral Norte (R4) foram as que apresentaram a maior velocidade máxima para o estado.

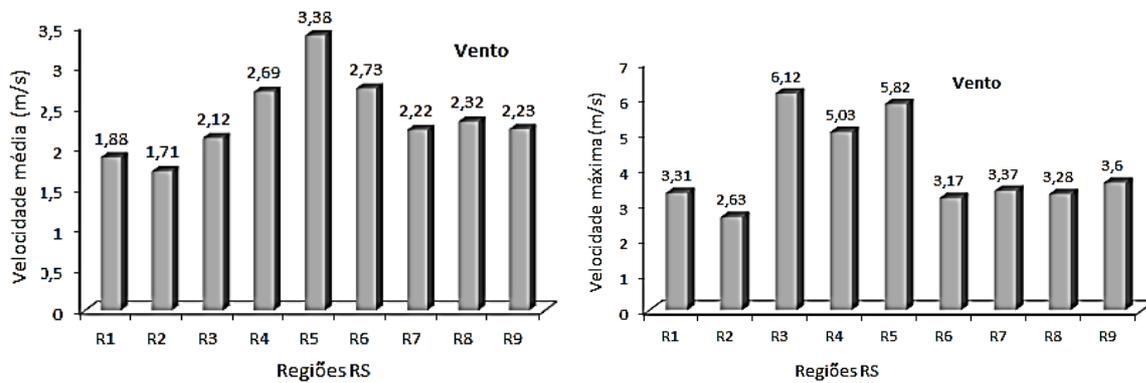


Figura 5.2 – Velocidade média (a - esquerda) e velocidade máxima (b - direita) dos ventos ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

A Figura 5.3 exibe as médias obtidas ao longo de todo o período analisado da insolação para as diferentes regiões. As três regiões que apresentaram o maior brilho solar em média, no período entre 1961 a 2008, foram as regiões Fronteira Oeste (R6), Nordeste (R7) e Planalto Nordeste (R9). A região do Litoral Norte (R4) apresentou a menor insolação para o mesmo período. Os gráficos foram construídos a partir das médias mensais de cada variável, através das informações do banco de dados.

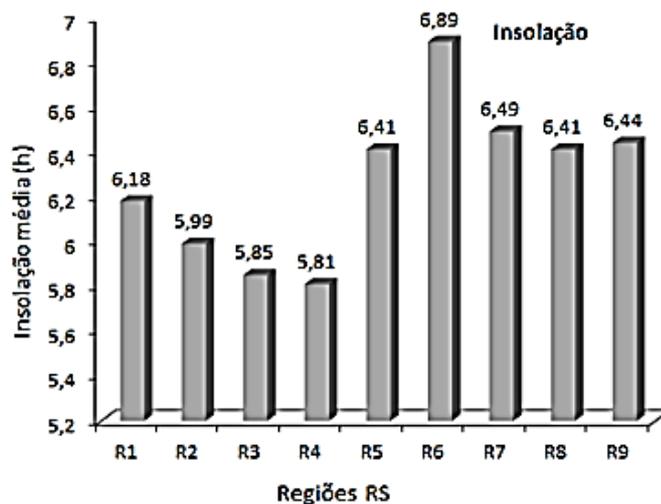


Figura 5.3 – Insolação média (h) por região

A radiação solar global para o estado do Rio Grande do Sul teve a maior média nas regiões Planalto Nordeste (R9), Central (R8) e metropolitana (R1), e a menor radiação solar global encontrada foi na região do Litoral Norte (R4), confirmando também a menor média registrada nas medidas de insolação, Figura 5.4.

A região Sul não consta neste estudo por insuficiência de dados sobre a radiação solar global que pudesse apresentar certa confiabilidade nos resultados.

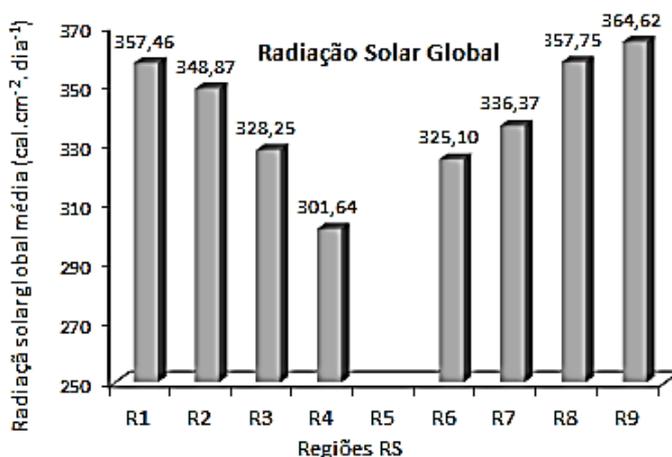


Figura 5.4 – Radiação solar global em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$

5.2 Análise da tendência do comportamento sazonal da insolação

De acordo com os resultados do comportamental da sazonalidade em diferentes anos e diferentes meses verificados na Figura 4.5, capítulo quarto, constata-se que os meses de dezembro, janeiro e fevereiro (estação verão) apresentaram uma previsão de tendência que influencia a série de forma descendente entre 2008 e 2012. Nota-se que os valores obtidos entre 2008 e 2011 foram valores gerados para determinar o comportamento tendencial da série. Os dados de 1961 e 2008 foram utilizados para obter uma série pura.

Como explicado antes, quando se analisa sazonalidade em uma série temporal, o que se pretende é a análise da própria sazonalidade e a remoção da sazonalidade da série para depois estudá-la em seus demais aspectos. Desta forma, obtém-se uma nova série com menor dispersão que a original, permitindo uma avaliação mais correta da fase do período analisado.

Com relação aos dados medidos para o mês de dezembro, o decaimento médio da insolação entre 2008 a 2011 foi de -3,18%, indicando uma diminuição desta variável como previsto no estudo do comportamento da sazonalidade. O mês de janeiro, também apresentou um decaimento médio de -3,33% para este mesmo período e o mês de fevereiro, a média chegou a -6,72%. Isto indica que entre 2008 e 2011, o verão apresentou índices negativos de insolação na ordem de 4,41%, confirmando a previsão (Figura 5.5).

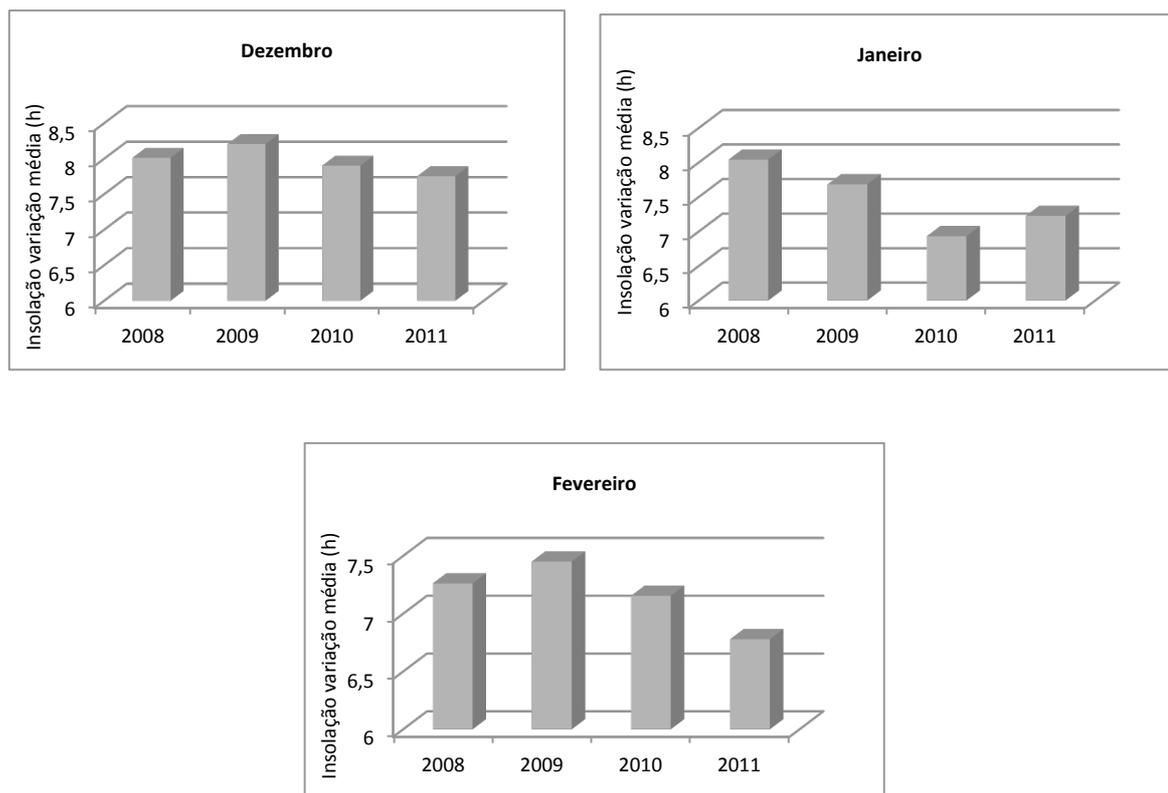
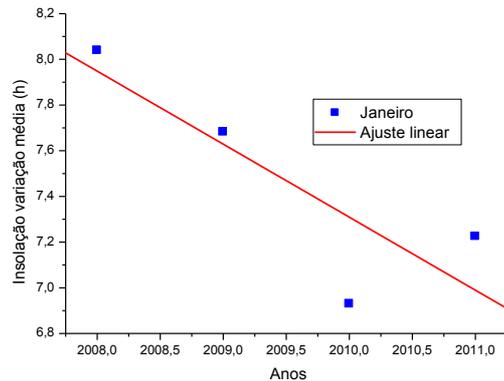
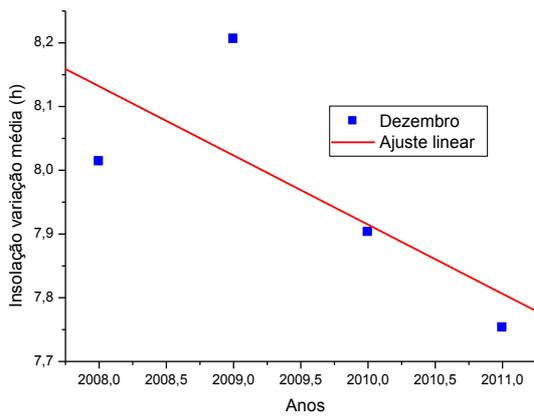


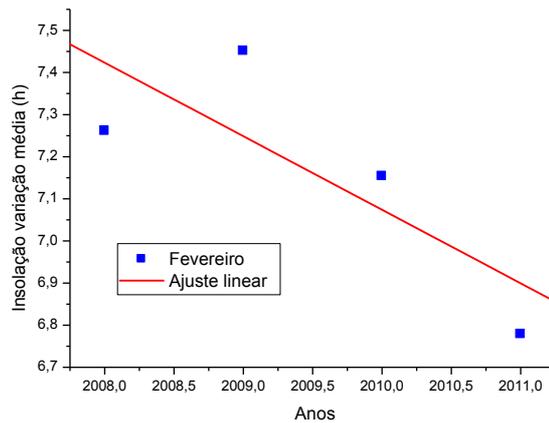
Figura 5.5 – Comportamento da sazonalidade para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, estação verão. Dados medidos

Os gráficos representados pela Figura 5.6, mostram os três meses que compõem o verão e os respectivos ajustes lineares. Estes meses indicaram índices médios negativos, confirmando a análise do comportamento sazonal com previsão para 2011.



R	SD	N	P
-0,73447	0,15855	4	0,26553

R	SD	N	P
-0,8414	0,32457	4	0,1586



R	SD	N	P
-0,79614	0,2095	4	0,20386

Figura 5.6 – Ajuste linear da variação média da insolação em diferentes meses e anos

Na Figura 5.6, R é o coeficiente de correlação, SD, o desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade.

É possível que estes índices de insolação para estes três meses, sofram um pequeno incremento nos próximos anos ou de manterem-se nos mesmos índices de 2011, segundo o comportamento sazonal verificado em diferentes anos.

A Tabela 5.1 mostra a média da variação do brilho solar para a estação verão em diferentes períodos e indica que a menor média percentual em 50 anos ocorreu

para o mês de dezembro. Entre 2008 e 2011, fevereiro foi o mês que apresentou o menor índice de insolação.

Tabela 5.1 – Média da variação do brilho solar na estação de verão em diferentes períodos.

Verão	Δ1961 a 1980	Δ1971 a 1990	Δ1981 a 2000	Δ1991 a 2011	Média variação
Dezembro	-0,37%	-1,00%	-9,32%	5,48%	-1,30%
Janeiro	-2,15%	-1,30%	-6,02%	6,26%	-0,80%
Fevereiro	0,00%	-4,16%	-8,83%	10,3%	-0,67%

Para os meses de março, abril e maio (estação outono), na Figura 5.7, observa-se uma tendência de escurecimento de -6,70% na média da variação para o mês de março. Com relação aos dados medidos entre 2008 e 2011 e pelo comportamento dos fatores sazonais finais pela Figura 4.5 do capítulo quarto, se verifica uma tendência para valores menores a partir de 2011, e confirmados pelos dados medidos.

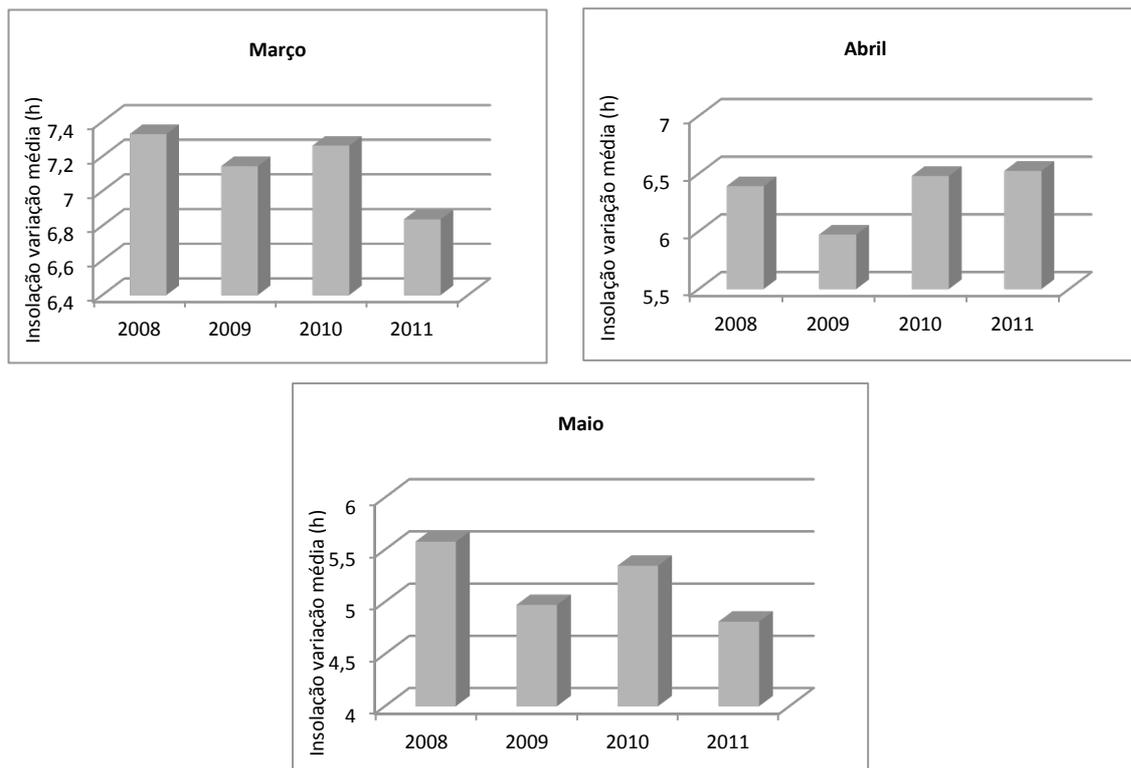


Figura 5.7 – Comportamento da sazonalidade para os meses de março, abril e maio, estação outono. Dados medidos.

No mês de abril, a média da variação entre 2008 e 2011, pelos dados medidos, o incremento foi de 2,57%. Os dados estimados pelo comportamento dos fatores sazonais finais indicaram um ganho nos índices de insolação, entre 2008 e 2011, e com possibilidades de manter esta tendência comportamental para 2012 ou permanecer estável. No mês de maio, a média da variação entre 2008 e 2011, foi de -4,46%.

Pelo comportamento dos fatores sazonais finais o que se observou foi um comportamento semelhante aos dos dados medidos, mas indicando possibilidades de quedas em seus índices para 2012. Isto indica que entre 2008 e 2011, a estação outono apresentou uma queda de -2,86% em seus índices. Para todo o período estudado de 1961 a 2011, o valor também foi negativo em -1,47%, sendo que, o maior saldo negativo ocorreu para o mês de maio que registrou -4,49% em média, entre 1961 e 2011.

A Tabela 5.2, mostra a média da variação do brilho solar para a estação outono em diferentes períodos e indica que maio foi o mês que apresentou o menor índice percentual em 50 anos.

Tabela 5.2 – Média da variação do brilho solar na estação do outono em diferentes períodos

Outono	Δ1961 a 1980	Δ1971 a 1990	Δ1981 a 2000	Δ1991 a 2011	Média variação
março	-1,06%	9,22%	-9,57%	5,28%	0,96%
abril	4,33%	-15,97%	-0,96%	9,77%	-0,70%
maio	-8,21%	-2,15%	-2,19%	-5,42%	-4,49%

Nos gráficos representados pela Figura 5.8, é possível visualizar o ajuste linear da média da variação da insolação em diferentes anos e os resultados dos ajustes. Entre os três meses do outono, somente o mês de abril mostrou aumento em sua média percentual entre 2008 e 2011.

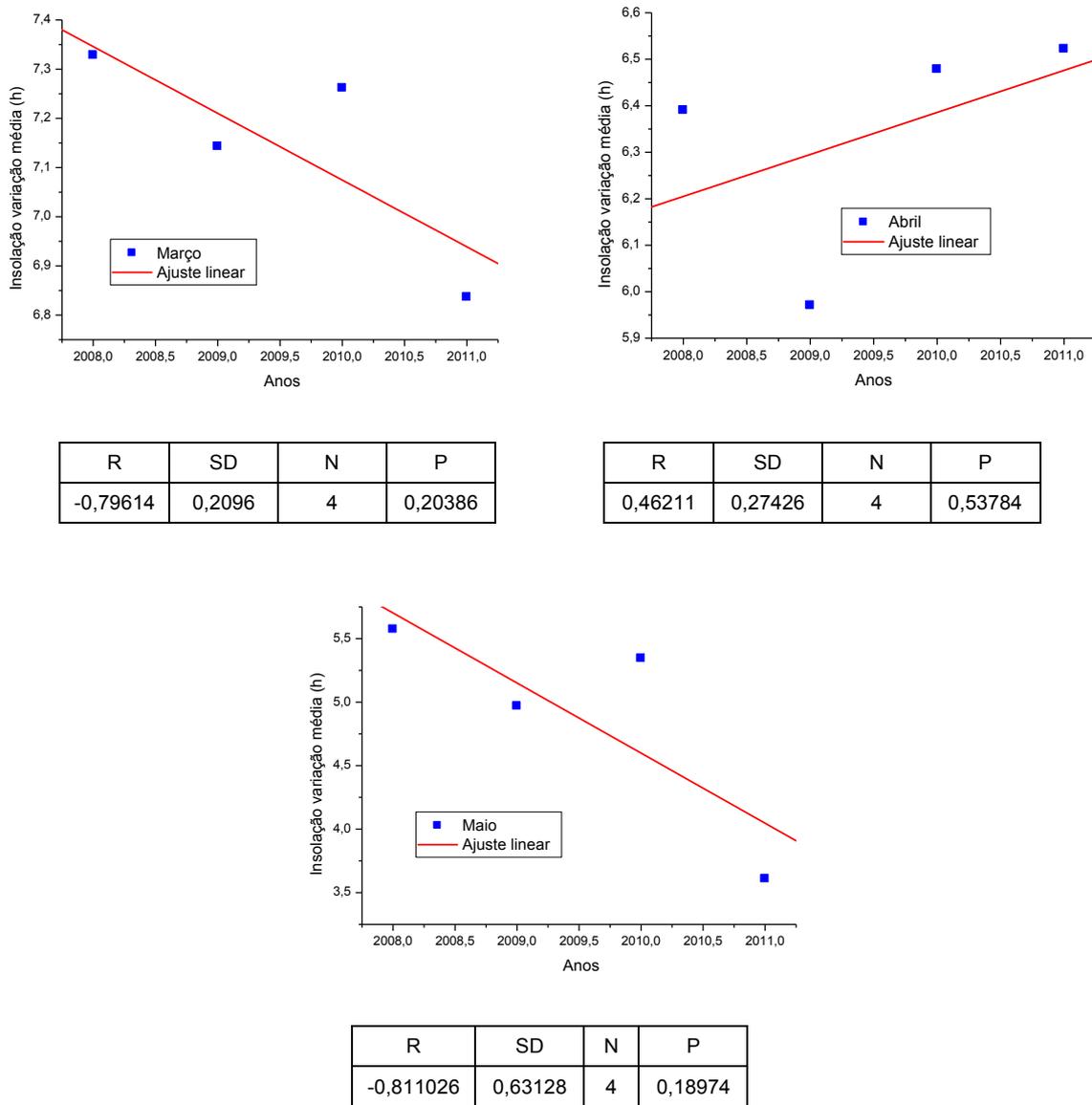


Figura 5.8 – Ajuste linear da variação média da insolação em diferentes meses e anos.

Na Figura 5.8, R é o coeficiente de correlação, SD, o desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade.

É importante salientar que, ao se avaliar um comportamento de sazonalidade como o da Figura 4.5 do capítulo quarto, se devem analisar os três gráficos que formam a figura, ou seja, uma sazonalidade irregular final não modificada, sazonalidade irregular modificada para extremos e os fatores sazonais finais para que se possa inferir o melhor resultado. Assim, fica evidenciado que nem sempre se

terá um comportamento idêntico dos dados medidos com relação aos dados previsto, mas com configurações que indiquem prováveis tendências semelhantes.

Na estação inverno composta pelos meses de junho, julho e agosto a tendência na variação média entre 2008 e 2011 foi de -13,58%. Para o mês junho, ocorreu uma diminuição de 14,26% neste período, verificada pelos dados medidos. Em relação aos fatores sazonais finais (Figura 4.5 do capítulo quarto), junho mostrou uma tendência comportamental de diminuição com possibilidade de manter-se ou diminuir esta tendência a valores menores.

Na Figura 5.9, verifica-se que em 2009, tanto pelos dados medidos como pela curva da sazonalidade irregular final não modificada (rácios) da Figura 4.5, ocorreu um comportamento diferenciado de tendência que se seguia para este mês levando a valor mais alto da insolação e voltando no ano seguinte, 2010 à tendência observada antes, em 2008. Com relação ao mês de julho a variação média foi de -15,11% entre 2008 e 2011 pelos dados medidos. Indicando para este mês menos brilho solar e confirmando as análises de previsão conforme demonstrado nas curvas tanto da sazonalidade irregular modificada para extremos, como pelos fatores sazonais finais, em que se pode observar esta queda acentuada e prevista para este período. Para o mês agosto, a variação média entre 2008 e 2011 foi negativa, -11,41%. Isto indica que para a estação inverno, entre 2008 e 2011, foi um período negativo com média de variação na ordem de -13,58%.

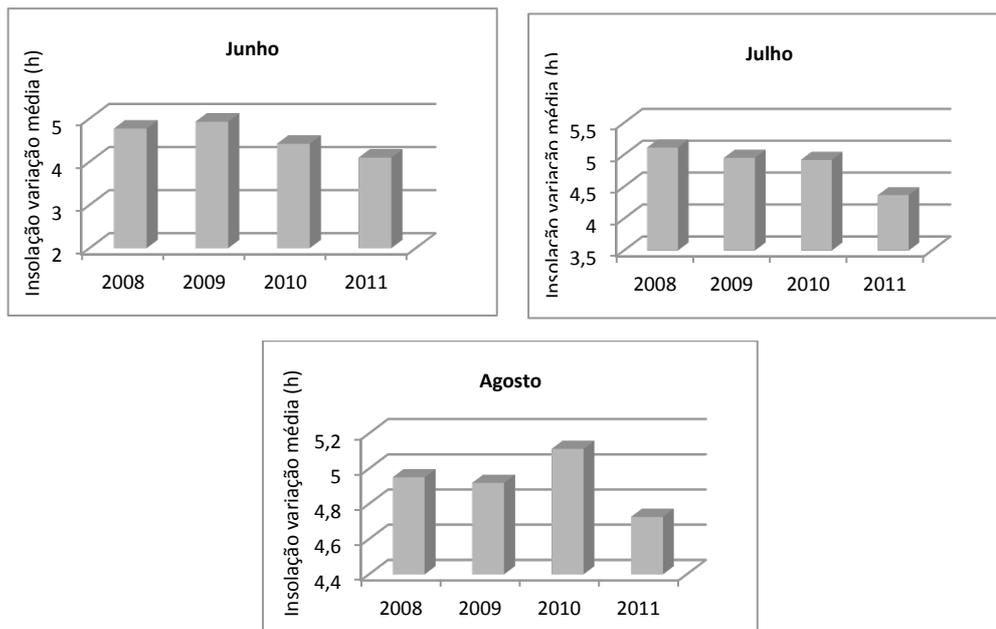


Figura 5.9 – Comportamento da sazonalidade para os meses junho, julho e agosto, estação inverno. Dados medidos.

Nos gráficos representados pela Figura 5.10, é mostrado o ajuste linear da variação média da insolação em diferentes anos e os resultados destes ajustes. Os três meses da estação inverno indicaram que ocorreu uma diminuição no brilho solar entre 2008 e 2011 e o mês de julho demonstrou ser o mais escuro entre os três meses da estação sazonal para este período.

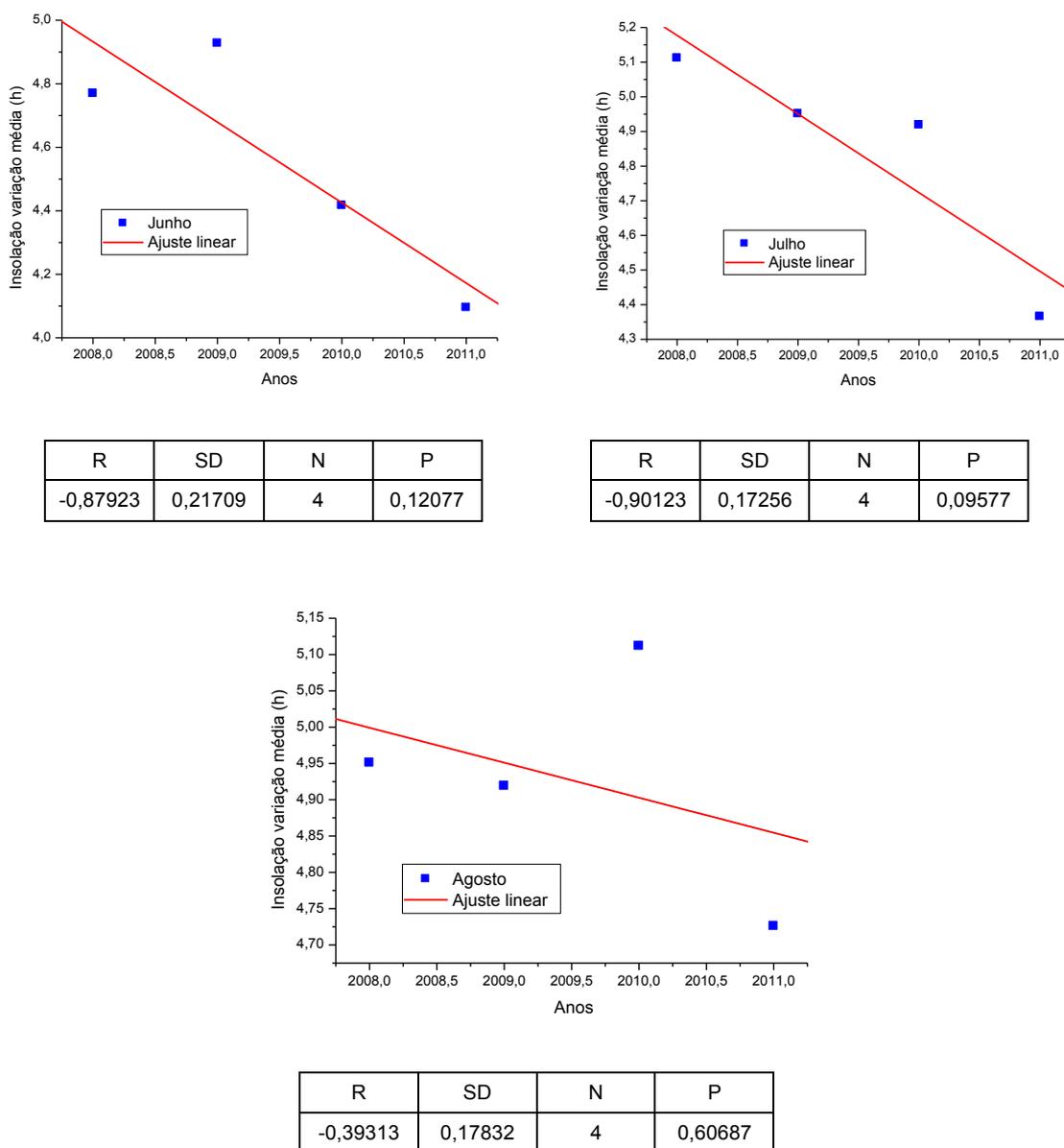


Figura 5.10 – Ajuste linear da variação média da insolação em diferentes meses e anos.

Na Figura 5.10, R é o coeficiente de correlação, SD é o desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade.

A Tabela 5.3 mostra a média da variação do brilho solar para a estação inverno em diferentes períodos e indica a menor média percentual entre estes três meses, em 50 anos. Neste caso, foi para o mês de junho o menor índice percentual, sinalizando que o inverno ficou mais escuro nestes últimos 50 anos.

Tabela 5.3 – Média da variação do brilho solar na estação inverno em diferentes períodos.

Inverno	$\Delta 1961$ a 1980	$\Delta 1971$ a 1990	$\Delta 1981$ a 2000	$\Delta 1991$ a 2011	Média variação
junho	-5,03%	-6,32%	0,21%	-2,40%	-3,38%
julho	-2,93%	0,59%	-5,78%	5,15%	-0,74%
agosto	-6,83%	1,93%	-0,97%	2,13%	-0,92%

Na primavera, Figura 5.11 nos meses de setembro, outubro e novembro, a variação média no período entre 2008 e 2011 foi de 6,38%. O mês de setembro, entre 2008 e 2011, apresentou queda no brilho solar confirmado pela previsão dos fatores sazonais finais da Figura 4.5 do capítulo quarto para o mesmo período, com índice percentual de -15,71%.

Outubro teve como média de variação entre 2008 e 2011 um ganho de 23,03% e novembro, para o mesmo período, foi de 11,82%. Estes dois meses mostraram um aumento em seus índices de clareamento. Também é visto o mesmo comportamento pelos dados das curvas dos fatores sazonais finais com relação à previsão.

Os ajustes lineares para a variação média da insolação em diferentes anos para a estação primavera estão representados na Figura 5.12. Os dois meses outubro e novembro mostram um aumento no brilho solar para esta estação, sendo que a média para o período foi de 17,42%.

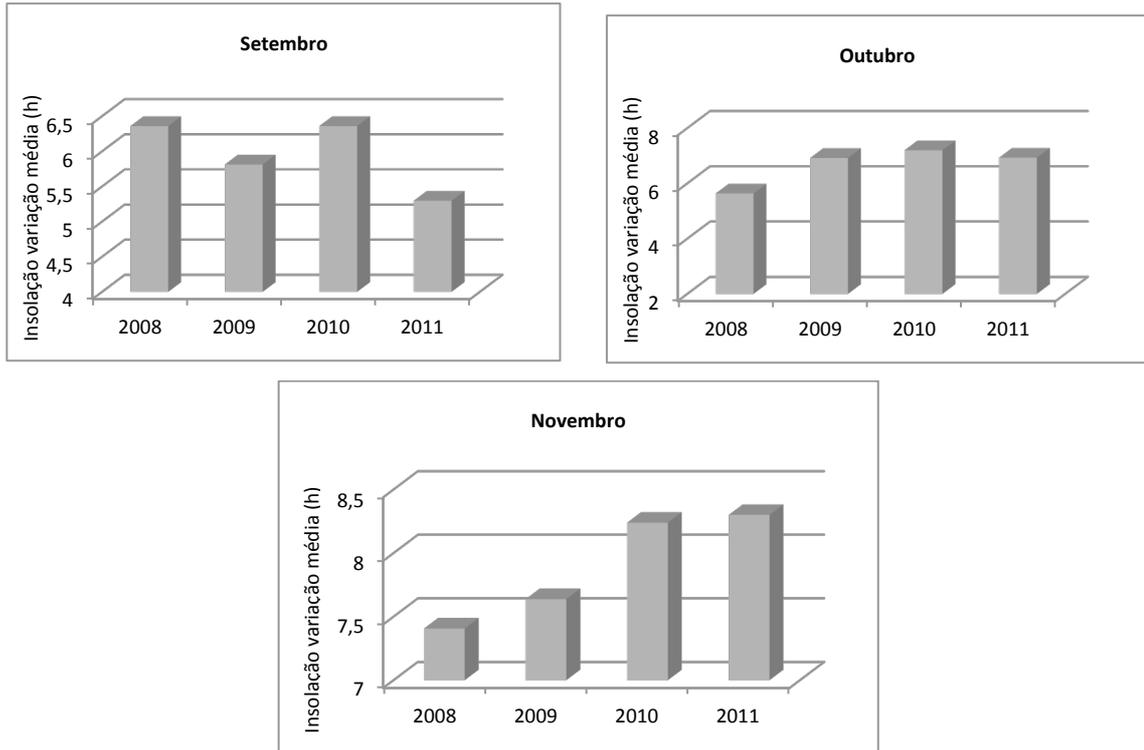
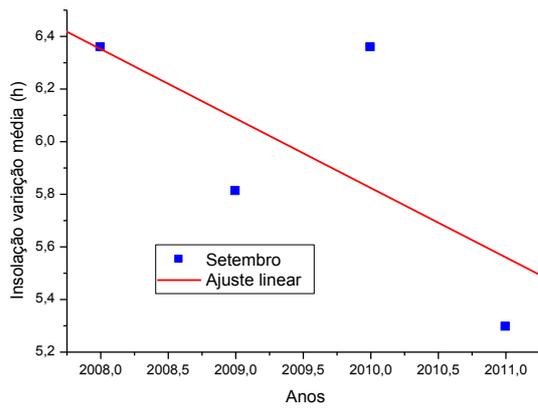


Figura 5.11 – Dados medidos da sazonalidade para os meses setembro, outubro e novembro, e da estação primavera.

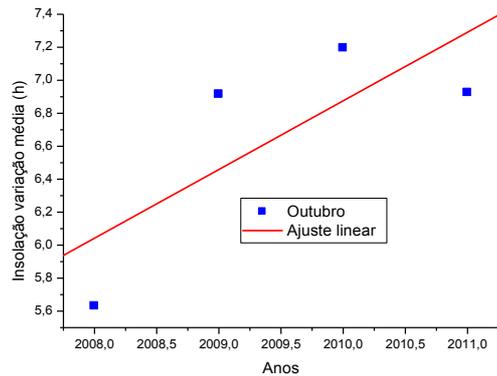
Na Figura 5.12, R é o coeficiente de correlação, SD é o desvio padrão, N o número de pontos da curva e P é uma probabilidade.

A Tabela 5.4 mostra a média da variação do brilho solar para a primavera em diferentes períodos e indica que a menor média percentual entre estes três meses, em 50, anos foi o do mês de setembro.

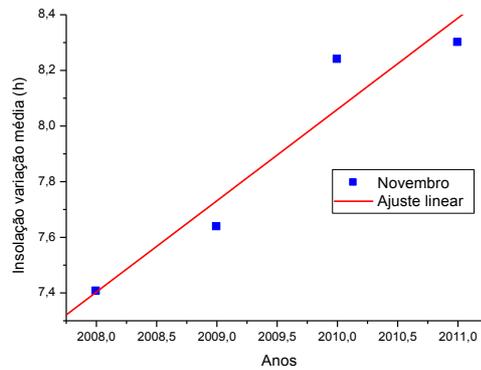
Esta estação do ano manteve-se estável na sua média de variação de brilho solar ao final deste período. Mas, para o mês de setembro, a indicação de tendência para valores menores nos próximos anos, segundo o comportamento dos fatores sazonais finais da Figura 4.5, é confirmada com o valor negativo de -1,15% na média final entre 1961 e 2011 pelos dados medidos.



R	SD	N	P
-0,66835	0,46462	4	0,33165



R	SD	N	P
0,76498	0,55428	4	0,23502



R	SD	N	P
0,95752	0,15632	4	0,04248

Figura 5.12 – Ajuste linear da variação média da insolação em diferentes meses e anos para a primavera.

Tabela 5.4 – Média da variação do brilho solar na estação primavera em diferentes períodos

Primavera	Δ1961 a 1980	Δ1971 a 1990	Δ1981 a 2000	Δ1991 a 2011	Média variação
setembro	7,12%	-8,46%	-2,14%	-1,12%	-1,15%
outubro	2,01%	6,67%	-16,34%	7,99%	0,08%
novembro	5,60%	-4,27%	-2,09%	4,00%	0,81%

5.2.1 Comentários sobre a análise do comportamento sazonal da insolação

Ao serem comparados, os dados medidos do comportamento da sazonalidade da Figura 4.5 (dados estimados) e as médias de variações da série histórica para todo o período de 1961 e 2011 sugerem que os índices de insolação não foram suficientes para superarem os índices das décadas de 1960 e 1970. Alguns meses do ano devem continuar como demonstrados, com valores descendentes, ou permanecerem sem grandes alterações que levem a valores ascendentes na série.

Para um melhor esclarecimento do que foi discutido sobre os resultados das médias percentuais da variável insolação entre 2008 a 2011 a Figura 5.13 e a Tabela 5.5 ilustram um resumo dos resultados obtidos. Mais uma vez pode-se visualizar que entre os dozes meses do ano, nove apresentaram decaimento em seus índices para este período indicando possível retomada para um novo escurecimento. A estação do inverno foi a que apresentou a maior média de diminuição e o mês de outubro o maior ganho para estação de primavera. Estes resultados demonstram um provável retorno aos índices observados entre as décadas de oitenta e noventa onde foi constatado um significativo decaimento do brilho solar sobre o Estado.

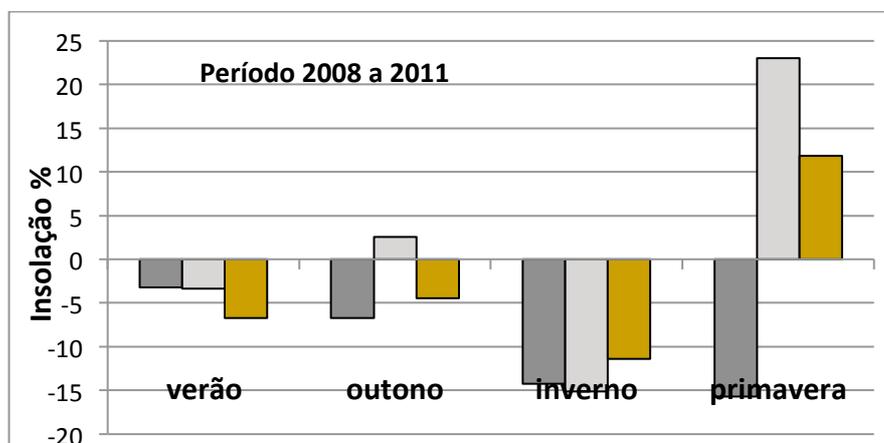


Figura 5.13 – Médias percentuais para variável insolação entre 2008 a 2011. Da esquerda para direita correspondem os meses que compõem as respectivas estações sazonais de acordo com a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Média da variação do brilho solar no período entre 2008 a 2011 nas quatro estações do ano.

Média percentual Insolação – 2008 a 2011											
Dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov
-3,18	-3,33	-6,72	-6,7	3,57	-4,46	-14,26	-15,1	-11,4	-15,7	23,0	11,8
-4,41%			-2,86%			-13,58%			6,36%		

A Figura 5.14 mostra as estações sazonais para os anos de 2008, 2009, 2010 e 2011 através dos dados medidos indicando novamente diminuições para a maior parte destas estações. A média entre estes períodos mostrou que o verão e o inverno foram os que apresentaram maiores índices percentuais de decaimento em seu brilho solar, como verificado antes pelos resultados das análises no período compreendido entre 1961 e 2011. A primavera teve um ganho nos índices de insolação e o outono mostra uma tendência a decaimento para os próximos períodos.

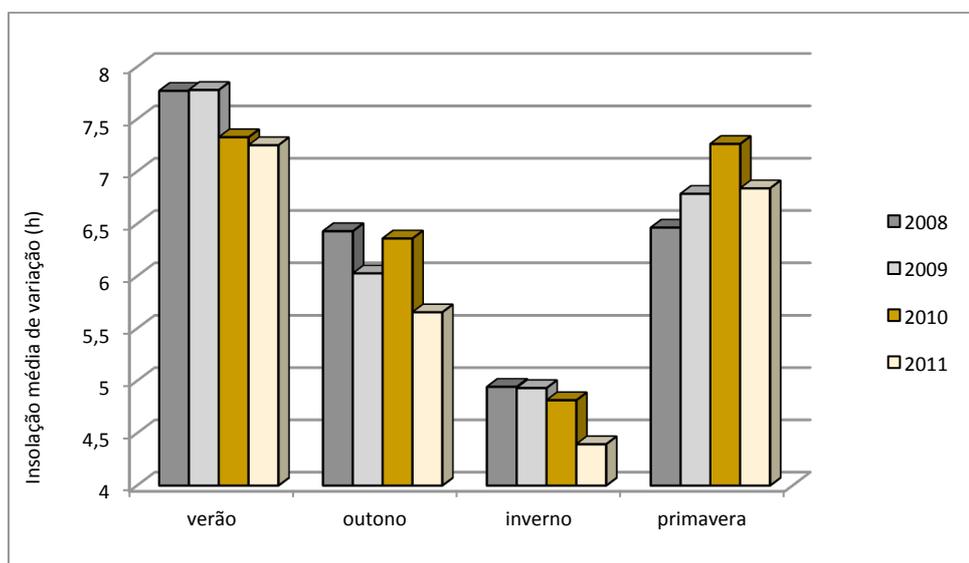


Figura 5.14 – Comparação entre as estações do ano da média de variação da insolação em (h) para diferentes anos

Conforme o gráfico da sazonalidade irregular final não modificada (rácios) e da sazonalidade irregular modificada para os extremos da Figura 4.5, alguns pontos atípicos ou valores extremos podem ter afetado o clima e influenciado de forma ascendente ou descendente na série em estudo, provavelmente relacionados ao fenômeno ENOS (El Niño Oscilação Sul). Este é um fenômeno de interação atmosférica-oceano associado a alterações dos padrões normais de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) Oliveira. S.G, (2001), conforme o estudo relacionado ao caso.

Durante o verão e a primavera, os efeitos ENOS são mais proeminentes no estado do Rio Grande do Sul. Na maioria dos eventos, o El Niño coincide com valores menores de insolação e o La Niña com valores maiores.

Segundo as identificações dos eventos ENOS, utilizou-se a classificação do *National Weather Service/Climate Prediction Center* (NOAA, 2014, Anexo A). Nos meses de janeiro, fevereiro, junho e dezembro de 2008, La Niña, esteve mais presente e os índices de insolação podem ter ficado maiores. Os meses de agosto e setembro de 2007, outubro de 2009 a 2011, novembro de 2009, dezembro de 2006 e fevereiro 2009, a presença de La Niña pode ter puxado os índices da série para cima aumentando os valores de insolação nestes períodos da fase fria, devido à baixa umidade relativa do ar. O fenômeno El Niño se manifestou em janeiro, setembro e novembro de 2006 com possibilidades de ter contribuído neste período para os valores mais baixos de insolação, fato este, relacionado à fase quente e ao aumento de nebulosidade na região.

Outra possibilidade é a ocorrência de um novo período de resfriamento do planeta, um fenômeno que pode estar associado à Oscilação Decadal de grande duração do Pacífico (ODP), como sendo um evento El Niño-Oscilação Sul (ENOS), em que o El Niño é a fase quente do ENOS e La Niña sua fase fria, (Matual et al., 1997).

As fases dos ENOS possuem uma duração média de 6 a 18 meses, com cerca de 3 a 4 anos por ciclo completo. A ODP apresenta um ciclo de 50 a 60 anos, tendo cada fase uma duração de 25 a 30 anos. Já a fase fria é caracterizada por uma configuração de temperaturas da superfície (TSM) com anomalias negativas onde as águas ficam mais frias no Pacífico Tropical e ao longo da costa das Américas. As anomalias positivas ocorrem no extra trópico, com grande influência nos ventos marítimos.

A fase quente apresenta configurações opostas, pois os dois períodos de aquecimento global entre 1925-1946 e 1977-1998 coincidem com as fases quentes da ODP, e por outro lado o resfriamento global no período 1947 e 1976 correspondeu à fase fria.

Segundo Molion, (2005), a frequência de eventos El Niño (La Niña) foi maior durante a fase quente (fria) da ODP. Sabe-se que os eventos El Niño podem produzir excessos de chuvas nas regiões Sul e o contrário com os eventos La Niña.

É possível que o Pacífico entre em uma nova fase fria, segundo dados das anomalias de TSM do Pacífico para o período de 1999 a 2007 ((ESRL/PSD/NOAA, 2008), e o Sol esteja entrando em um provável período de baixa atividade (um novo mínimo do Ciclo de Gleissberg), pois haverá um ciclo com duração média de 90 anos. Juntos, podem levar o Pacífico a repetir o período da fase fria de 1947 a 1976, com o agravante da baixa atividade solar, e ter uma nova fase fria. O período de resfriamento global pode ser mais intenso do que foi no anterior e esconder possivelmente o abrandamento da subida de temperatura em nível mundial e mascarar o fenômeno do aquecimento global. Outra consequência com relação à ODP (fase fria) é a possível escassez de precipitações produzindo um período de seca na região sul do Brasil e a possibilidade de desabastecimento das inúmeras barragens hidrelétricas responsáveis por parte da geração de energia elétrica no sistema interligado brasileiro em um futuro próximo além de alterar a movimentação dos ventos na região.

5.3 Evidências de tendência da redução do brilho solar no Estado do Rio Grande do Sul entre 1975 e 2000

Entende-se que qualquer mudança significativa e generalizada na radiação global seja susceptível de ser de grande importância para geração de eletricidade e produção agrícola, bem como para as mudanças climáticas e aplicação direta da energia solar. Neste item é apresentada a evidência de que o escurecimento global pode ter reduzido seus índices no estado do Rio Grande do Sul assim como constatado em outras partes do planeta por diferentes estudos científicos e comentado no capítulo quarto e nos apêndices A (AB, AC e AD).

Existe evidência de que os resultados dos estudos na série histórica da insolação, analisada neste trabalho, e a possibilidade de que, nas décadas de 1980 e 1990, tenha ocorrido um escurecimento mais intenso do que nas demais décadas, que também podem estar relacionadas ao fenômeno conhecido como “global dimming”. Este fenômeno é reconhecido pela redução de radiação solar incidente entre os anos 1960 e 1990. Estes períodos de escurecimento variam de acordo com a posição geográfica, ciclos naturais e a atividade humana local.

Na década de 2000 foi observado que os índices de insolação voltaram a subir no estado do Rio Grande do Sul, mas com variações médias finais menores, comparadas com os índices constatados nas décadas anteriores de 1980 e 1990, indicando a possibilidade de que este decaimento tenha se pronunciado significativamente muito antes, a partir da década de 1970 ou 1980. Também foi verificado, que a média de variação entre 1961 e 2011 registrou nove meses com valores negativos, conforme verificado neste estudo e demonstrado na Tabela 4.30 do capítulo quarto e, entre 1961 e 2000, foram dez meses com índices negativos, Tabela 4.32. Em trabalhos como o de Custódio et al (2009), também foi encontrada uma tendência à redução da insolação no Rio Grande do Sul e mostrado que a nebulosidade diurna teria aumentado no Estado no período de 1960 a 2005, durante as quatro estações do ano. Estes resultados estão de acordo com outros trabalhos publicados com relação ao escurecimento global que ocorreu a nível mundial, mas com diferentes intensidades e períodos de acordo com as regiões estudadas.

Pela Figura 4.32 do capítulo quarto, comparando as estações do ano da média de insolação em número de horas para diferentes períodos, fica bem evidenciado este decaimento da insolação entre as décadas de 1980 e 1990. Mesmo após a volta do clareamento, essa não foi ainda suficiente para atingir os níveis anteriores ao escurecimento, quando comparados com as décadas anteriores.

Para compreender melhor esta redução no brilho solar e o que ela pode significar em termos de potencial energético, comparam-se os valores tabelados no Atlas Brasileira de Energia (2008) com os prováveis índices de escurecimento estudado neste trabalho de tese, no sentido de verificar o quanto diminuiria este potencial.

Estima-se para região sul do Brasil, segundo o Atlas Brasileiro de Energia, mais precisamente para o estado do Rio Grande do Sul, uma média sazonal de irradiação solar global horizontal diária média anual (energia por unidade de área),

na ordem de 6,30 a 6,65 kWh·m⁻²·dia⁻¹, para os meses de dezembro a fevereiro (verão), e de 3,15 a 3,50 kWh·m⁻²·dia⁻¹ em junho a agosto (inverno).

Para um plano inclinado, a média sazonal de irradiação solar global diária média anual, para dezembro a fevereiro, (verão) é estimado em 5,80 a 6,20 kWh·m⁻²·dia⁻¹ e para junho a agosto, (inverno) de 4,40 a 4,80 kWh·m⁻²·dia⁻¹.

Os resultados desta comparação encontram-se nas Tabelas 5.6 e 5.7, as quais apresentam os valores de decréscimo na irradiação solar global diária média anual, do Atlas Solar Brasileiro (2008), para um plano horizontal e um plano inclinado. Estes seriam os índices de decaimento na irradiação solar, caso venha a se confirmar nas próximas décadas, um novo escurecimento com valor médio de variação semelhante ao verificado no período de 1975-1995. Tudo indica ter sido este período o que apresentou maior evidência do fenômeno “global dimming” no Rio Grande do Sul. Para essas estimativas, admite-se que o percentual médio da variação verificada no período do escurecimento seja o mesmo e as informações da irradiação solar global, indicados no Atlas Solar Brasileiro (2008), tenham sido estimadas no período de clareamento, isto é, na década de 2000.

Tabela 5.6 – Decréscimo da irradiação solar global diária média anual em kWh·m⁻²·dia⁻¹ no plano horizontal dos dados apresentado no Atlas Solar Brasileiro (2008), para Região Sul

Decréscimo da Radiação Solar Global no Plano Horizontal (Médias em relação ao Atlas Brasileiro, 2008)	
Δ Verão (kWh/m ² ·dia ⁻¹)	Δ Inverno (kWh/m ² ·dia ⁻¹)
-25,2·10 ⁻² a -26,6·10 ⁻²	-9,45·10 ⁻² a -10,5·10 ⁻²

Tabela 5.7 – Decréscimo da irradiação solar global diária média anual em kWh·m⁻²·dia⁻¹ no plano inclinado apresentado no Atlas Solar Brasileiro (2008), para Região Sul.

Decréscimo da Radiação Solar Global no Plano Inclinado (Médias em relação ao Atlas Brasileiro, 2008)	
Δ Verão (kWh/m ²)	Δ Inverno (kWh/m ²)
-23,2·10 ⁻² a -24,8·10 ⁻²	-13,2·10 ⁻² a -14,4·10 ⁻²

Nas estações do verão e inverno, o consumo de energia elétrica são maiores em relação às demais estações sazonais, na região sul devido às grandes variações de temperaturas. Índices menores de radiação solar sobre a região e as consequentes influências diretas no clima podem resultar na diminuição do rendimento no aproveitamento da energia solar, principalmente termosolar e fotovoltaica. Além disso, alterações climáticas podem atingir o setor hidroelétrico e alterar a movimentação dos ventos colocando em risco nossa principal fonte de energia, a hídrica, para geração de eletricidade. Menores índices de radiação solar também comprometem o planejamento das atividades humanas, entre elas, a fabril, a agricultura e a pecuária, entre outras.

O comportamento do clima é imprevisível pois, é muito dinâmico e depende de inúmeros fatores. Dentre eles, a atividade solar e a temperatura nos oceanos que são os principais responsáveis por estas mudanças climáticas. Assim, é possível efetuar por meio de dados históricos e das estimativas estatísticas, algumas previsões de médio e curto prazos das reações climáticas que possam afetar uma determinada região e providenciar meios de amenizar eventuais crises.

5.4 Análises da tendência do comportamento sazonal da variável radiação solar global.

Ao comparar-se os dados de radiação solar global com os dados de insolação, nota-se que não foram utilizadas nas análises as informações referentes à radiação para a região sul e muitos dos municípios utilizados na análise da insolação também não contaram nos estudos da radiação solar, o que de certa forma leva a algumas variações no comportamento da sazonalidade para esta variável. Também é possível que algumas das informações sobre a radiação solar, fornecidas pelas estações climatológicas do estado, não tenham sido realizadas através de medições da radiação global, mas, efetuadas estimativas da radiação solar global a partir das informações dos dados de insolação.

Os gráficos mostrados pela Figura 5.15 e Figura 5.16 representam o comportamento sazonal, variação média, para os meses da estação de verão entre 2003 a 2008 dos dados medidos e o ajuste linear para cada mês.

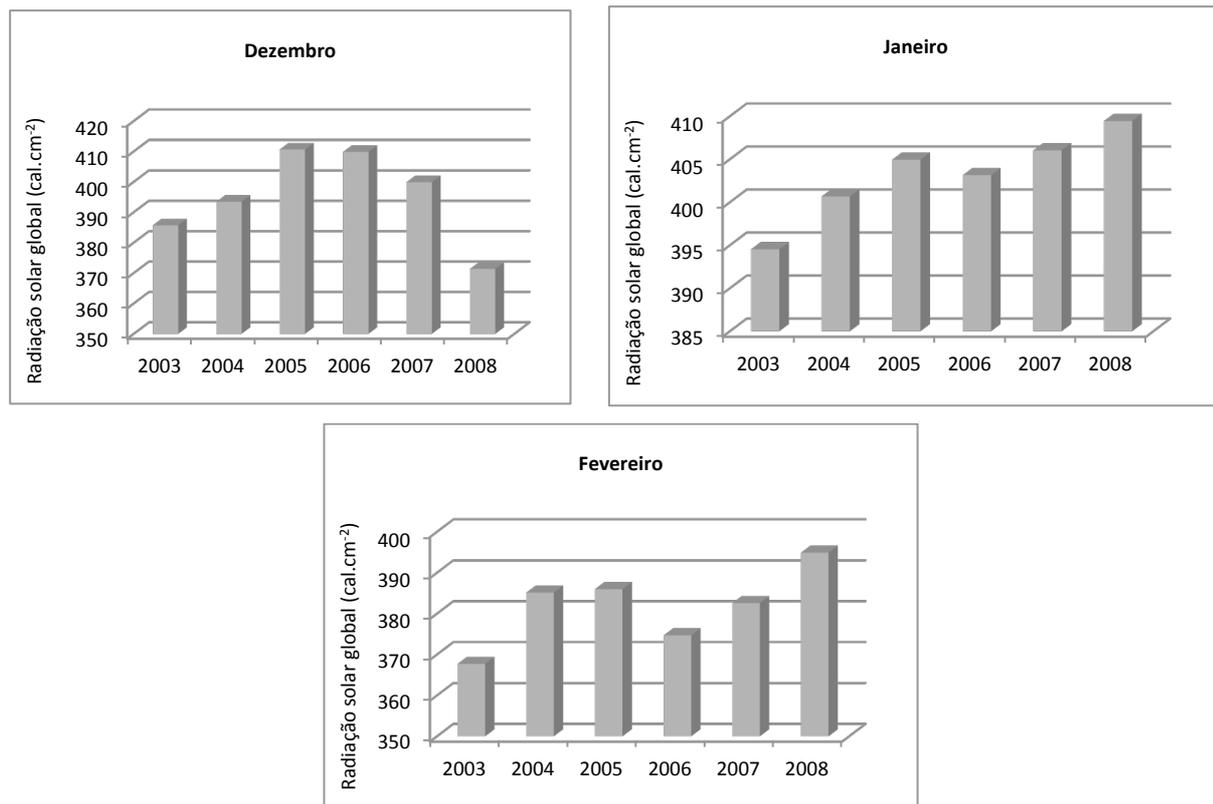
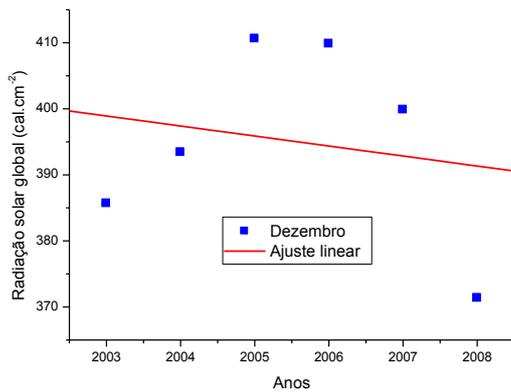
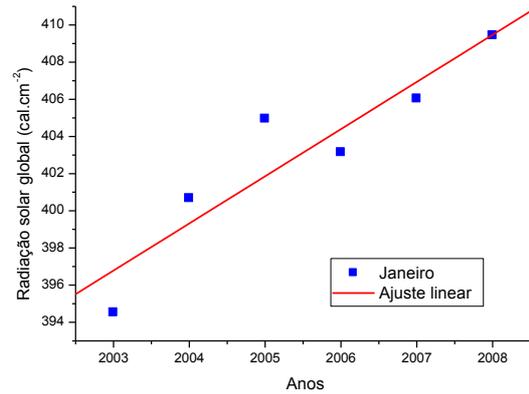


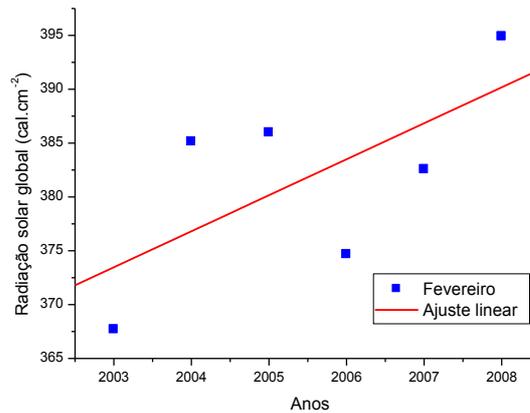
Figura 5.15 – Comportamento da sazonalidade para os meses dezembro, janeiro e fevereiro, estação verão para a radiação solar global, variação média dos dados medidos



R	SD	N	P
-0,18807	16,55171	6	0,72122



R	SD	N	P
0,92569	2,16964	6	0,00808



R	SD	N	P
0,65895	7,92205	6	0,15464

Figura 5.16 – Ajuste linear da média da variação da radiação solar global em diferentes meses e anos para estação verão. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade

Os mesmos órgãos citados, que detêm as informações das estações climatológicas do estado do Rio Grande do Sul não forneceram informações sobre os dados medidos entre 2009 e 2012 para radiação solar global para que pudesse ser realizada comparação com os dados estimados à previsão da sazonalidade. Mas, é possível verificar que a tendência do comportamento da radiação solar global siga a tendência da variável insolação para esta estação, como verificado em 5.2.

Para o verão, o mês de dezembro apresentou média da variação de -1,15% entre 2003 e 2008, e janeiro com um aumento de 3,64% seguindo fevereiro com 5,18%. Isto indica que houve um aumento da radiação solar global neste período, para o verão de 2,55%. Pelas análises dos fatores sazonais da variável insolação, é importante notar que os meses de janeiro e fevereiro, entre 2004 e 2008, também apresentaram aumento em seus índices antes de indicarem decaimento a partir de 2008, levando o verão a valores negativos.

As Figuras 5.17 e 5.18 mostram o comportamento da sazonalidade média da variação para o período de 2003 a 2008, estação do outono, composto pelos meses de março, abril e maio, e o seu correspondente ajuste linear. Constata-se que o mês de março apresentou índice de -1,81% neste período, e o mês de abril mostrou uma diminuição na radiação solar global de -9,15%, mas sinalizando para um aumento para os próximos períodos. O mês de maio mostrou um decaimento neste período de -8,24%, a mesma tendência verificada na variável insolação. A média da variação para a estação do outono apresentou índice de decaimento, na ordem de -6,40%, o mesmo comportamento encontrado para a variável insolação, mas com índices maiores devido ao mês de abril que puxou a série para baixo.

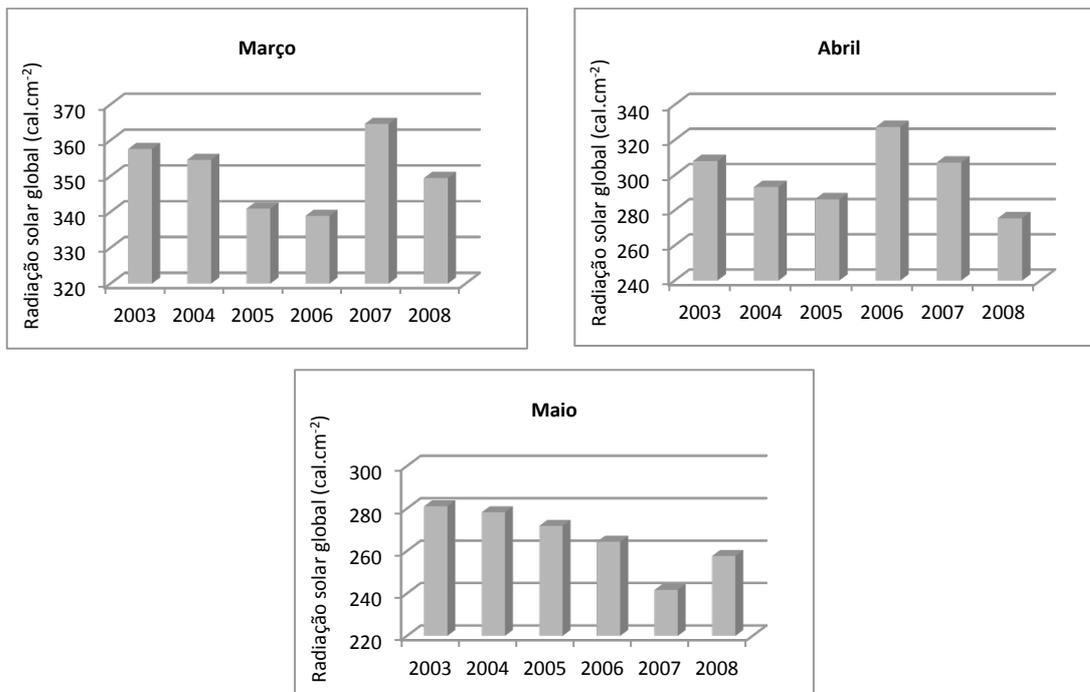
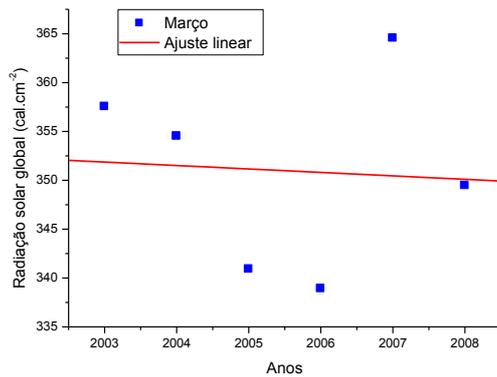
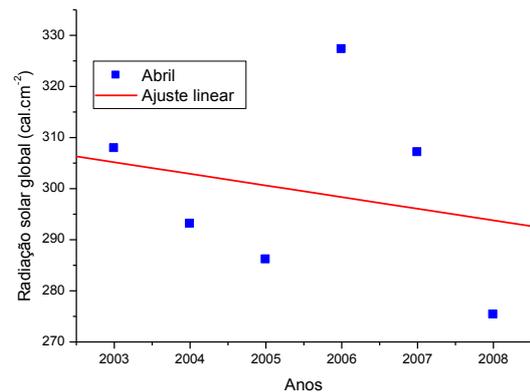


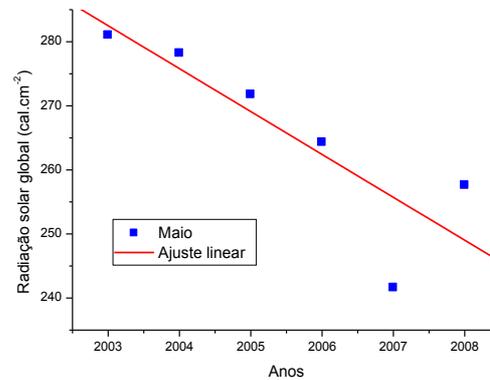
Figura 5.17 – Comportamento da sazonalidade para os meses março, abril e maio, estação outono para a radiação solar global, variação média dos dados medidos.



R	SD	N	P
-0,006682	11,0310	6	0,89992



R	SD	N	P
-0,23065	20,0771	6	0,66017



R	SD	N	P
-0,85418	8,52547	6	0,03035

Figura 5.18 – Ajuste linear da média da variação da radiação solar global em diferentes meses e anos para estação outono. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade

Com relação aos meses de junho, julho e agosto, entre 2003 e 2008, estação de inverno, o que se observou foi uma diminuição nos três meses, conforme o verificado na variável insolação solar. O mês de junho teve uma média da variação de -9,84%, julho com -7,73% e agosto com -10,15% (Figura 5.19) e o ajuste linear pela Figura 5.20. A média da variação para a estação do inverno apresentou índice de decaimento na ordem de -9,24% e o mês de agosto foi o mês mais escuro neste período.

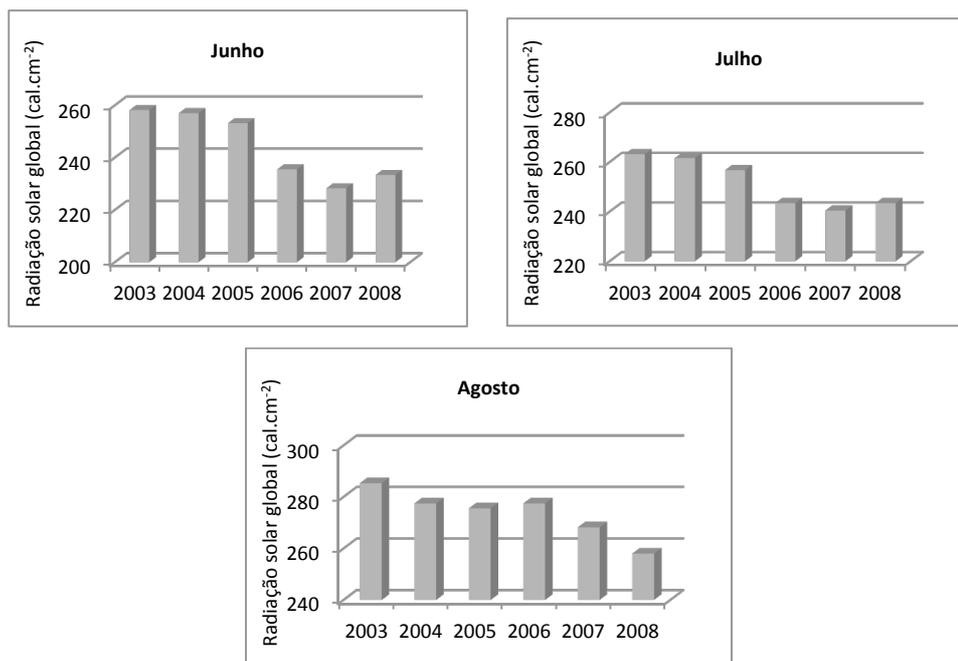
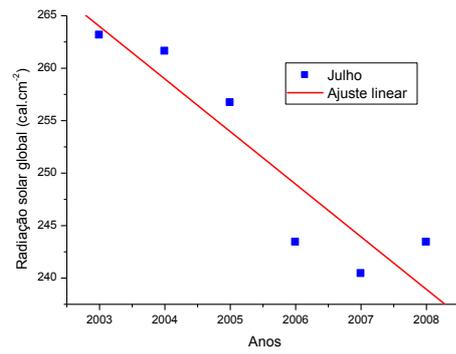
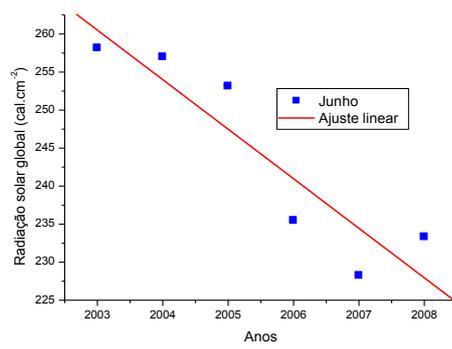


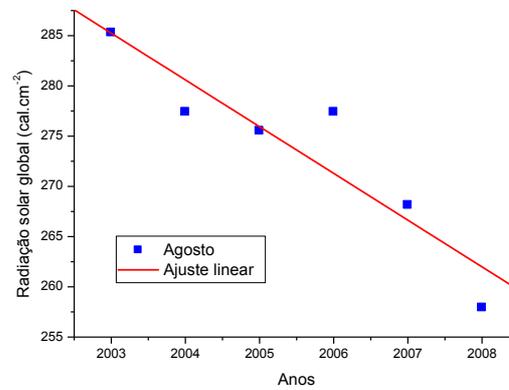
Figura 5.19 – Comportamento da sazonalidade para os meses junho, julho e agosto, estação inverno para a radiação solar global, variação média dos dados medidos.

Na primavera, setembro apresentou uma diminuição na média da variação de -8,09% no período de 2003 a 2008 em conformidade com o verificado nas análises da insolação. Para o mês de outubro, o índice de radiação solar global foi de 19,77% entre 2003 e 2008 e novembro apresentou aumento na média de variação de 12,62%, Figuras 5.21. O ajuste linear para cada mês da estação de primavera encontra-se na Figura 5.22. Constata-se aí que ocorreu um ganho de radiação solar global na estação de primavera entre 2003 e 2008 de 8,10%, mas ainda indicando tendência de decréscimo para o mês de setembro nos próximos anos, como foi verificado também na variável insolação e nos ajustes dos fatores sazonais finais pela Figura 4.13 do capítulo quarto.



R	SD	N	P
-0,91504	6,00572	6	0,01052

R	SD	N	P
-0,92132	4,42453	6	0,0904



R	SD	N	P
-0,92231	4,07728	6	0,00882

Figura 5.20 – Ajuste linear da média da variação da radiação solar global em diferentes meses e anos para estação inverno. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade.

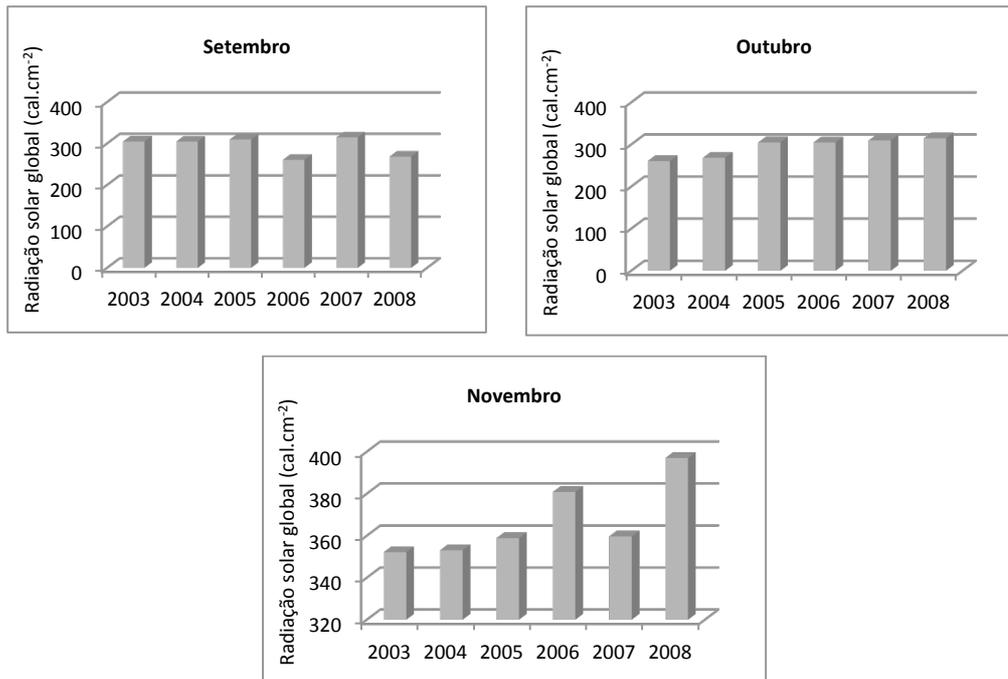


Figura 5.21 – Comportamento da sazonalidade para os meses setembro, outubro e novembro, estação primavera, para a radiação solar global, variação média dos dados medidos.

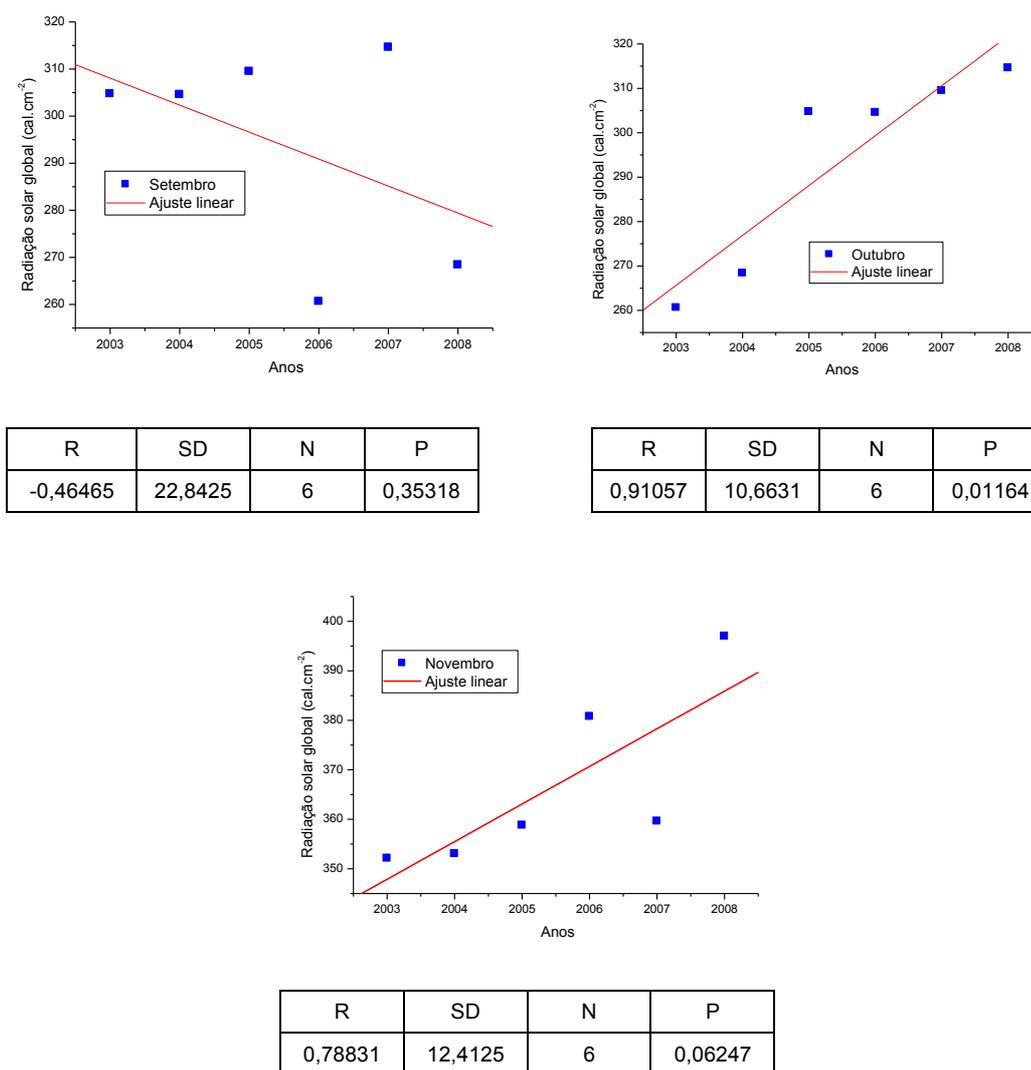


Figura 5.22 – Ajuste linear da média da variação da radiação solar global em diferentes meses e anos para estação primavera. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade.

5.4.1 Comentários sobre a análise de tendência do comportamento sazonal da radiação solar global

Como verificado no caso da insolação, observou-se uma redução da radiação solar global no Rio Grande do Sul, na maioria dos meses indicando índices negativos para o outono na ordem de -6,4% e de -9,24 % no inverno. Para a primavera, ocorreu um aumento de 8,10% e para o verão, a radiação solar global foi de 2,55%, no período de 2003 e 2008. Se seguir a tendência, estimada e comparada

com os dados medidos entre 2008 e 2011 da variável insolação, a maioria dos meses deve continuar apresentando redução nos índices de radiação solar global.

Para um melhor esclarecimento do que foi discutido sobre os resultados das médias percentuais da variável radiação solar global entre 2003 a 2008 a Figura 5.23 e a Tabela 5.8 ilustram um resumo dos resultados obtidos. Como era de se esperar, os resultados são semelhantes ao da insolação. A diferença fica nos meses de janeiro e fevereiro que apresentaram ganhos em seus índices. Mas, a explicação para esta diferença encontra resposta entre os períodos analisados.

A radiação solar global foi entre 2003 a 2008 e para a insolação o período ocorreu entre 2008 a 2011. Como observado nas análises, a partir de 2008 a radiação solar global também indica decaimento em seus índices em acordo com o observado na variável insolação. Estes resultados corroboram para um possível retorno na diminuição do brilho solar para os próximos períodos. O fato de não ter sido realizado as análises da radiação solar global para o mesmo período da insolação se deve a ausência de informações dos dados medidos além de 2008. Somente até 2008 foi possível comparar os dados medidos da radiação solar global com os resultados dos ajustes sazonais com as respectivas previsões comportamentais para 2011.

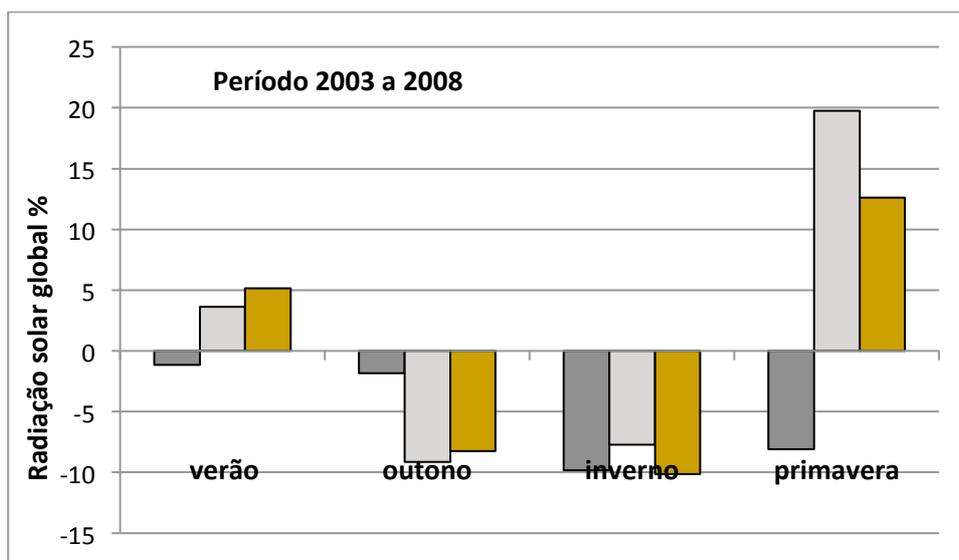


Figura 5.23 – Médias percentuais para variável radiação solar global entre 2003 a 2008. Da esquerda para direita correspondem os meses que compõem as respectivas estações sazonais de acordo com a Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Média da variação da radiação solar global no período entre 2003 a 2008 nas quatro estações do ano.

Média percentual Radiação Solar Global – 2003 a 2008											
dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov
-1,15	3,64	5,18	-1,81	-9,15	-8,24	-9,84	-7,73	-10,15	-8,09	19,77	12,62
2,55 %			-6,40 %			-9,24 %			8,10 %		

Pela Figura 5.24, comparam-se os anos entre 2005 a 2008, e nota-se redução nas estações do outono e do inverno na média da radiação solar global. A estação sazonal de primavera indicou aumento e a estação do verão também teve um ganho de claridade, mas indicando diminuição para os próximos anos, como foi verificado na variável insolação.

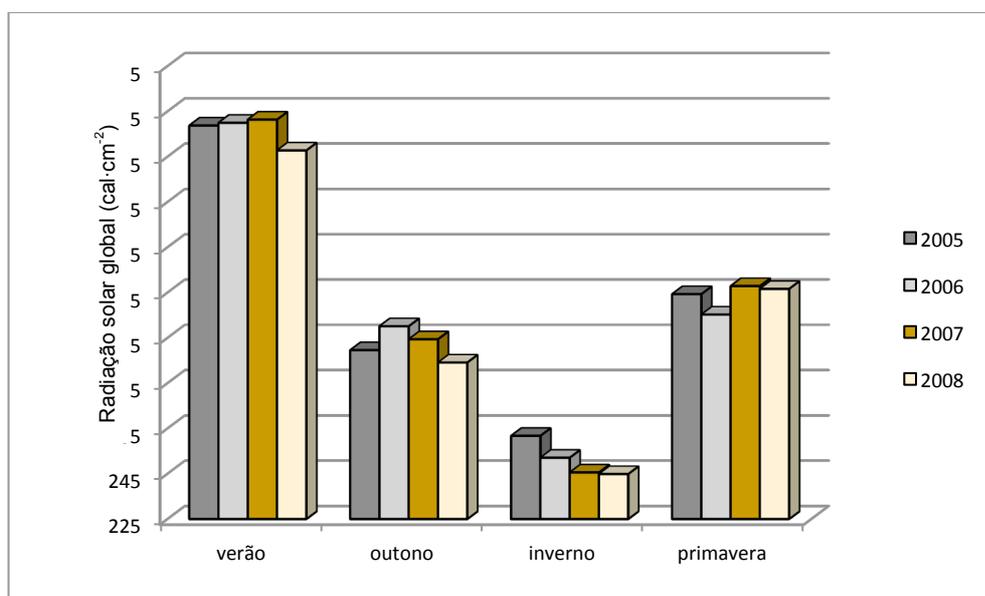


Figura 5.24 – Comparação entre as estações do ano da média de radiação solar global em $cal \cdot cm^{-2}$ entre, 2005 a 2008

Entre as possíveis causas para este decaimento tem-se o aumento na quantidade de vapor d'água na atmosfera devido ao incremento da precipitação pluvial, segundo os estudos de Custódio, 2009. Neste caso, acontece uma maior

nebulosidade diurna interceptando a maior parte dos raios solares. A influência dos eventos EL Niño na redução da radiação total ou mesmo o efeito do fenômeno do escurecimento global devido provavelmente à ação antrópica (ver Apêndice A), leva a esta tendência de declínio constatado nos últimos cinquenta anos e validado pelas previsões da sazonalidade em diferentes anos e meses, conforme este estudo.

A importância de acompanhar estes índices de variação no comportamento da radiação solar ou insolação refere-se ao planejamento estratégico de geração de energia. Deve-se acrescentar que qualquer variação por pequena que seja nos índices de radiação solar pode ocasionar mudanças no clima com consequências imprevisíveis afetando diretamente geração elétrica e outras atividades de grande significância como o da agricultura, como exemplo.

5.5 Análises da tendência do comportamento sazonal da variável eólica.

Os dados fornecidos pelas estações climatológicas do estado do Rio Grande do Sul foram obtidos de sensores de medidas do vento das estações convencionais com alturas das torres de medição de 10 metros. Assim, as médias das velocidades dos ventos para estas regiões, parecem ser baixas. Mas, para alturas maiores, como 50, 100m, o potencial eólico torna-se muito mais proeminente. O estado do Rio Grande do Sul possui um grande potencial eólico e de acordo com Ramos e Seidler (2011), com uma velocidade média dos ventos de $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, já se pode utilizar os geradores de pequeno porte em regiões remotas ou até para redução dos gastos com energia no processo produtivo.

Nesta tese, o objetivo foi demonstrar o comportamento sazonal cíclico da velocidade média dos ventos em diferentes meses e anos com previsões entre 2008 e 2011. Comparam-se estas previsões com dados medidos nas diferentes estações no estado do Rio Grande do Sul para estas regiões, sul e fronteira oeste, e procura inferir informações que possam servir para melhorar os resultados na previsibilidade do potencial eólico com relação a possíveis mudanças neste potencial.

Conforme os resultados do comportamento da sazonalidade da variável eólica em diferentes anos e diferentes meses (Figura 4.22, capítulo quarto), nas duas regiões de maior potencial eólico do Estado, região sul e fronteira oeste, quando

comparadas com os dados medidos entre 2003 e 2011, constata-se que nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, (estação verão), a tendência foi de um aumento em seu potencial eólico em 16,62%, na média de os três meses. O mês de janeiro foi o mês que apresentou o maior índice médio e o mês de dezembro o menor valor médio, confirmando a tendência comportamental da sazonalidade irregular modificada para extremos. As Figuras 5.25 e 5.26 mostram o comportamento da sazonalidade para os meses dezembro, janeiro e fevereiro, estação verão, da velocidade média eólica, variação média dos dados medidos e o resultado dos ajustes linear e polinomial desta média de variação.

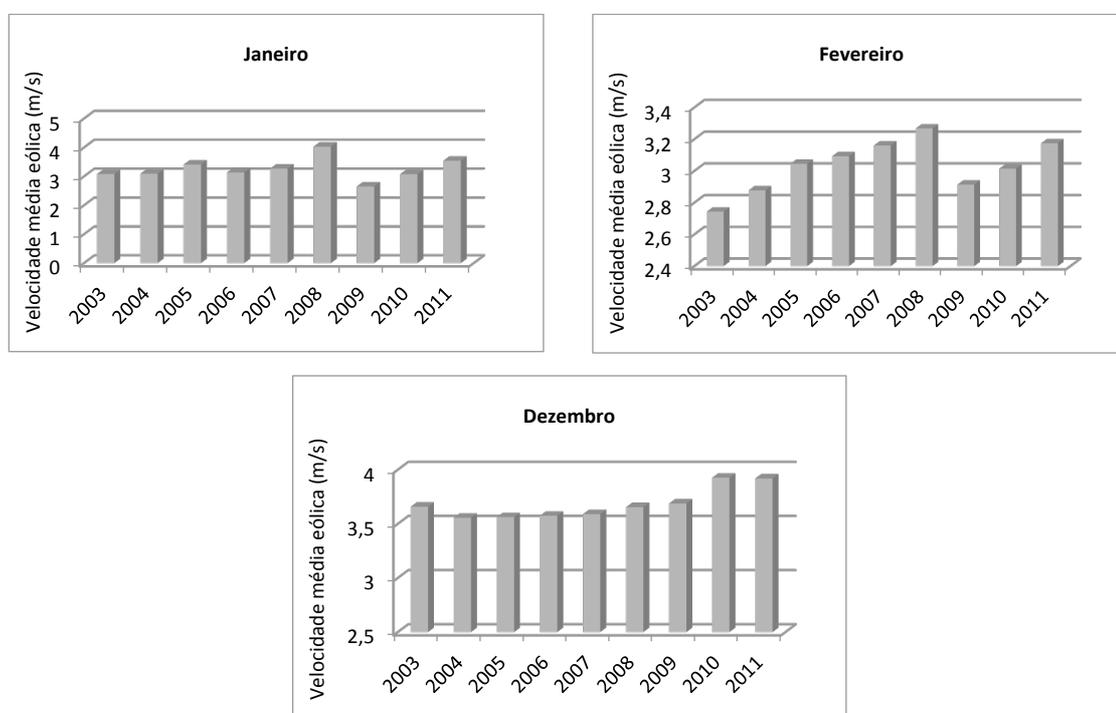
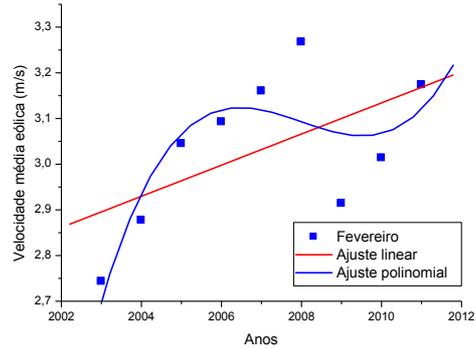
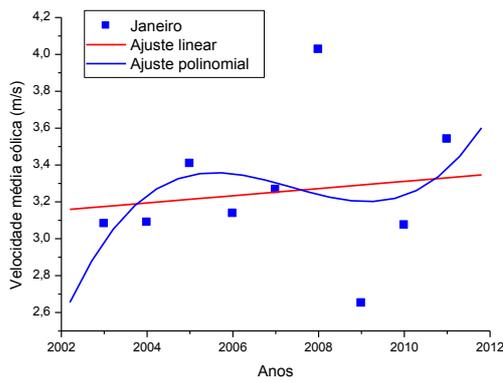
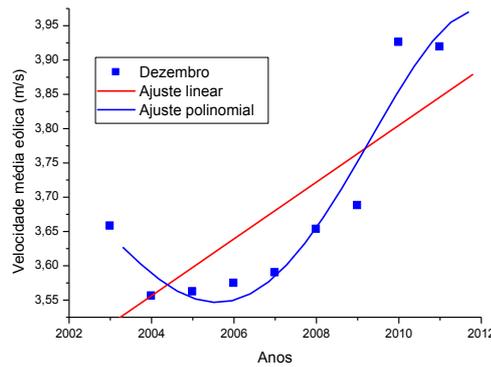


Figura 5.25 – Comportamento da sazonalidade para os meses dezembro, janeiro e fevereiro, estação verão para a velocidade média eólica, variação média dos dados medidos



R	SD	N	P
0,13936	0,40491	9	0,72065
R-Square	SD	N	P
0,09504	0,4025	9	0,90889

R	SD	N	P
0,56643	0,1452	9	0,11182
R-Square	SD	N	P
0,68862	0,11633	9	0,01711



R	SD	N	P
0,78409	0,09597	9	0,01238
R-Square	SD	N	P
0,93136	0,05359	9	0,01349

Figura 5.26 – Ajuste linear (linha vermelha) e polinomial (linha curva azul) da média da variação da velocidade eólica em diferentes meses e anos para estação verão.

Na Figura 5.26, R é o coeficiente de correlação, SD é o desvio padrão, N, número de pontos da curva, P é uma probabilidade e R-Square o coeficiente de determinação.

O outono, no mesmo período, também mostrou tendência de aumento em 15,99%, sendo que março teve o menor índice na média da variação entre 2003 e 2011 de -3,25% e abril com 27,27%, sendo o maior valor registrado para este

período. Confirmando as análises comportamentais da sazonalidade para os meses desta estação, demonstrada na Figura 4.22, capítulo quarto e pela Figura 5.27.

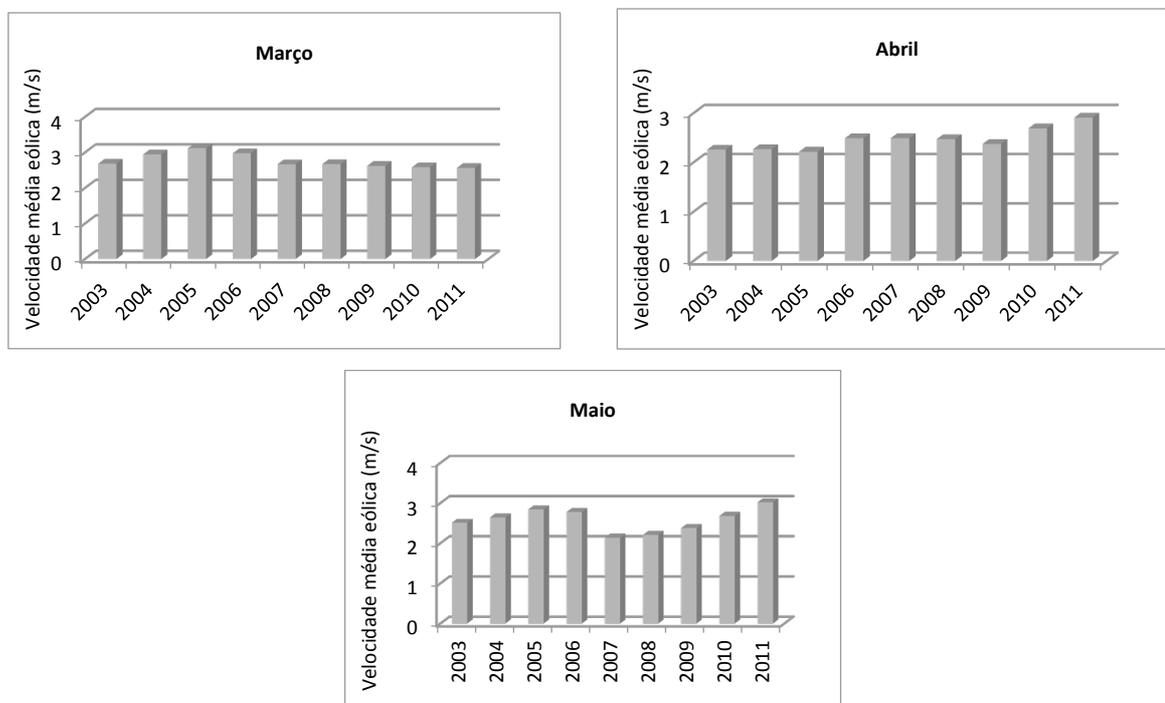
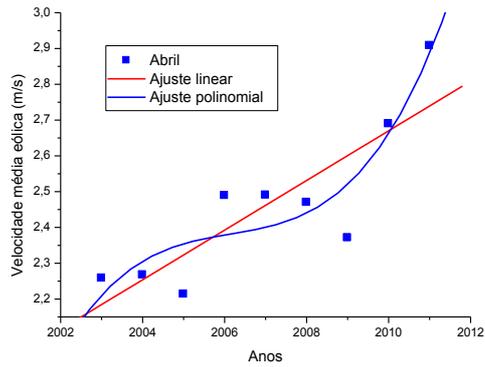
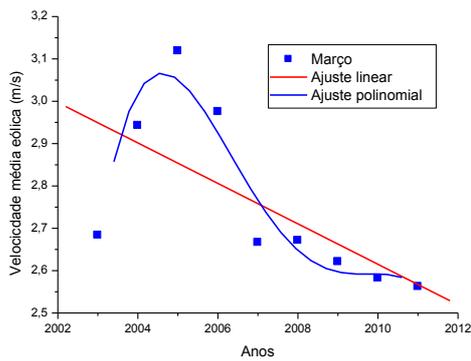


Figura 5.27 – Comportamento da sazonalidade para os meses março, abril e maio, estação outono para a velocidade média eólica, variação média dos dados medidos

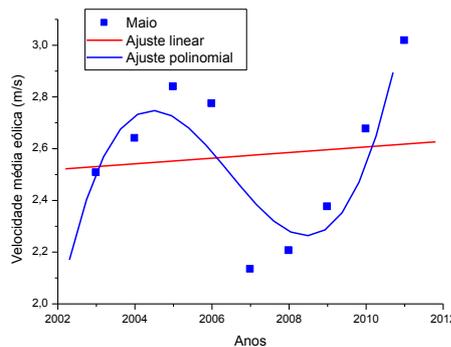
A Figura 5.28, mostra os ajustes linear (linha vermelha) e polinomial (linha curva em azul) da média de variação da velocidade eólica em diferentes meses e anos para a estação do outono.

Na Figura 5.28, R é o coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade e R-Square o coeficiente de determinação.



R	SD	N	P
-0,65305	0,16215	9	0,05649
R-Square	SD	N	P
0,84877	0,09853	9	0,01711

R	SD	N	P
0,84776	0,12703	9	0,00389
R-Square	SD	N	P
0,83039	0,11671	9	0,02226



R	SD	N	P
0,10113	0,31354	9	0,79572
R-Square	SD	N	P
0,75419	0,18488	9	0,05539

Figura 5.28 – Ajuste linear e polinomial da média da variação da velocidade eólica em diferentes meses e anos para estação outono.

Para o inverno, a tendência foi de decaimento em -2,63% na média de variação entre 2003 e 2011. O mês de agosto foi o que apresentou o menor índice na média da variação chegando a -10,84%, e junho o maior índice com 11,26% puxando a estação um pouco mais para cima. Esta estação sazonal mostrou uma diminuição do seu potencial confirmado pelas análises do comportamento tendencial

da sazonalidade. As Figuras 5.29 e 5.30 mostram a evolução desta variável em diferentes anos dos dados medidos e os respectivos ajustes lineares e polinomiais.

O mês de junho foi o de maior potencial eólico para o aproveitamento energético se comparado com os demais meses da estação de inverno. Mesmo assim, foi inferior à média dos outonos que mostraram um incremento de 15,99% em seus índices da média da variação para o mesmo período.

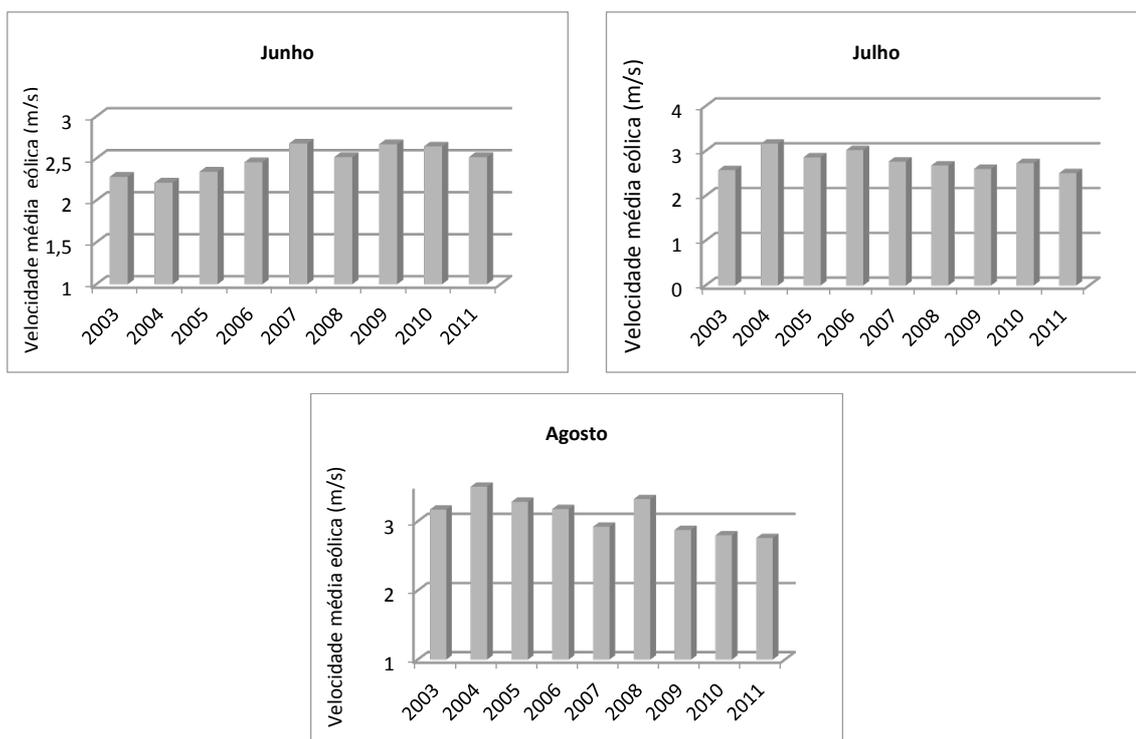
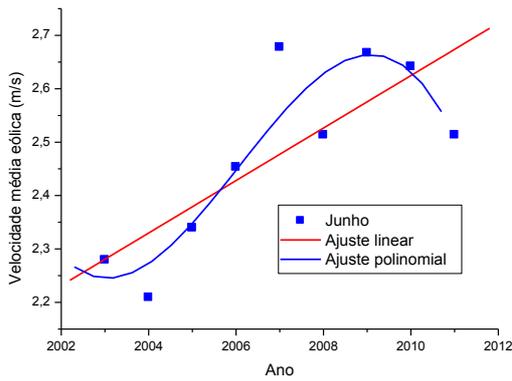
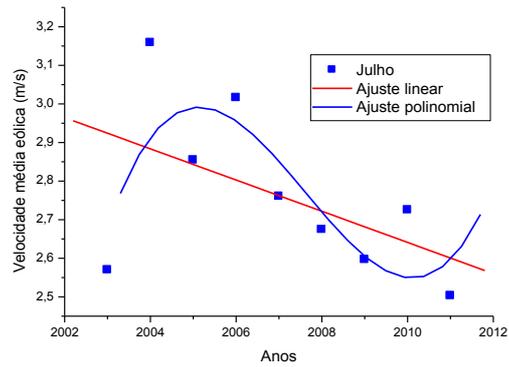


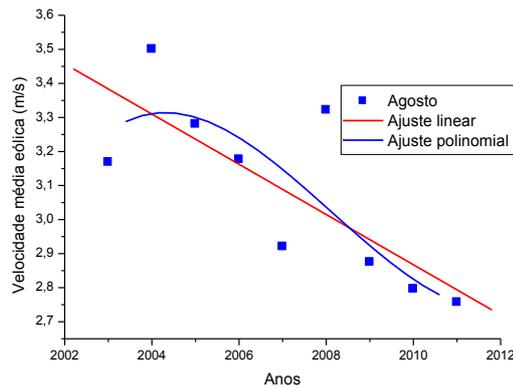
Figura 5.29 – Comportamento da sazonalidade para os meses junho, julho e agosto, estação inverno para a velocidade média eólica, variação média dos dados medidos.



R	SD	N	P
0,75419	0,18488	9	0,05539
R-Square	SD	N	P
0,85058	0,08406	9	0,01661



R	SD	N	P
-0,51857	0,19748	9	0,15262
R-Square	SD	N	P
0,6104	0,17004	9	0,16371



R	SD	N	P
-0,77429	0,1764	9	0,01431
R-Square	SD	N	P
0,66149	0,1919	9	0,11813

Figura 5.30 – Ajuste linear e polinomial da média da variação da velocidade eólica em diferentes meses e anos para estação inverno. R, coeficiente de correlação, SD, desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade e R-Square o coeficiente de determinação

A primavera, Figuras 5.31 e 5.32, teve a tendência de um decaimento em 11,19% na média de variação entre 2003 e 2011. O mês de setembro foi o mês que apresentou o menor valor entre 2003 e 2008 chegando a -13,71%. Os meses de outubro e novembro praticamente permaneceram iguais, mas com índices negativos

entre 2003 a 2011. O mês de novembro apresentou valor na ordem de -10,24% e outubro com -9,64%.

Pode-se observar que a tendência comportamental da sazonalidade, mostrada na Figura 4.22, capítulo quarto, está de acordo quando confrontada com os dados medidos. Isto indica que houve um bom ajuste dos dados e uma previsão comportamental semelhante à observada. A possibilidade tendencial e a medida da variável eólica mostram que seis dos doze meses no ano apresentaram valores negativos, isto é, menores velocidades do potencial eólico, o que possibilitaria potenciais menores de geração elétrica, caso permaneça esta tendência.

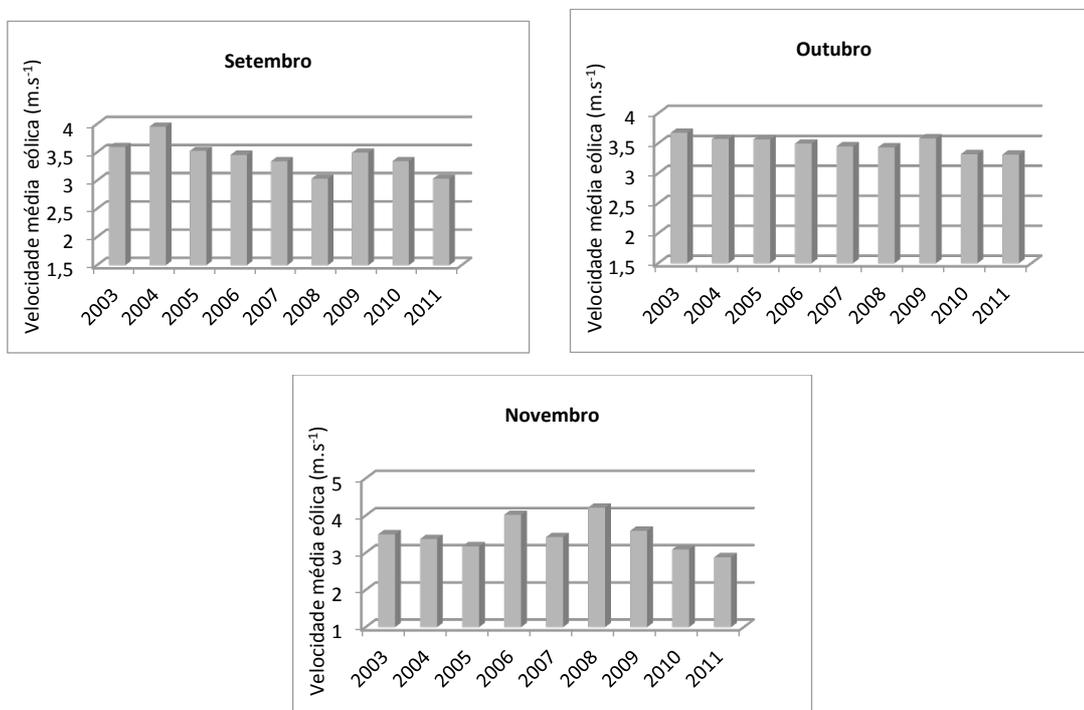
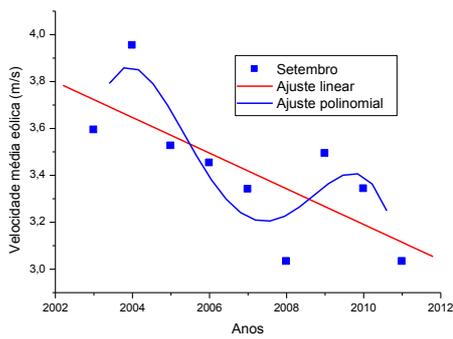
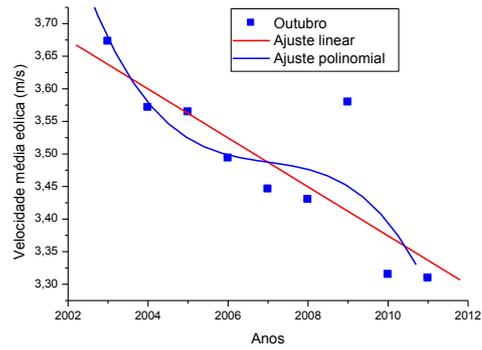


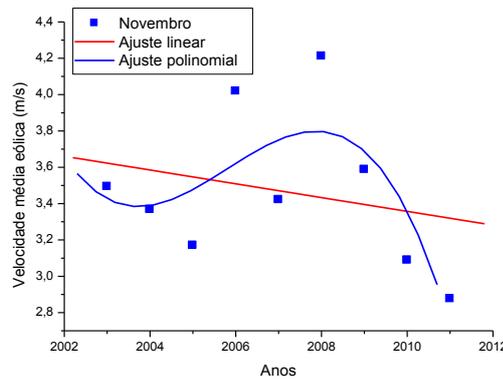
Figura 5.31 – Comportamento da sazonalidade para os meses setembro, outubro e novembro, estação primavera para a velocidade média eólica, variação média dos dados medidos



R	SD	N	P
-0,73328	0,20646	9	0,02457
R-Square	SD	N	P
0,54476	0,24249	9	0,23343



R	SD	N	P
-0,83274	0,07315	9	0,00533
R-Square	SD	N	P
0,76391	0,07595	9	0,05028



R	SD	N	P
-0,24266	0,44419	9	0,52928
R-Square	SD	N	P
0,56263	0,35829	9	0,21323

Figura 5.32 – Ajuste linear e polinomial da média da variação da velocidade eólica em diferentes meses e anos para estação primavera.

Na Figura 5.32, R é o coeficiente de correlação, SD é o desvio padrão, N, número de pontos da curva e P é uma probabilidade e R-Square o coeficiente de determinação.

A Tabela 5.9 mostra os valores percentuais da média da variação eólica para os diferentes meses do ano no período compreendido entre 2003 a 2011, dados medidos.

Tabela 5.9 – Média da variação eólica para os diferentes meses do ano entre 2003 e 2011, dados medidos.

Meses	2003 a 2011 (%)
Janeiro	26,99
Fevereiro	15,75
Março	-3,25
Abril	27,27
Maiο	23,97
Junho	11,26
Julho	-2,21
Agosto	-10,84
Setembro	-13,71
Outubro	-9,64
Novembro	-10,24
Dezembro	7,14

5.5.1 Comentários sobre a análise de tendência do comportamento sazonal da variável eólica.

Nas análises dos dados estimados com relação ao comportamento da variável eólica e nos dados medidos, observou-se uma redução na velocidade média dos ventos entre as duas regiões de maior potencial para geração elétrica no inverno e na primavera. Apesar das medidas terem sido tomadas a dez metros de altura, elas podem ser um indicativo que, para diferentes alturas onde a velocidade ocorre com maior intensidade, os dados medidos também demonstrem este decaimento. Em se tratando de clima, qualquer diferença, por mais ínfima que seja, pode representar grandes mudanças em seu comportamento com resultados imprevisíveis.

Pela Figura 5.33, resume o que foi comentado acima e ilustra de forma mais clara a tendência comportamental das estações do ano. Observa-se que a estação sazonal do outono tende a um significativo aumento percentual no seu potencial

eólico para este período, enquanto que a estação de primavera indica nos seus três meses o contrário, tendência à diminuição.

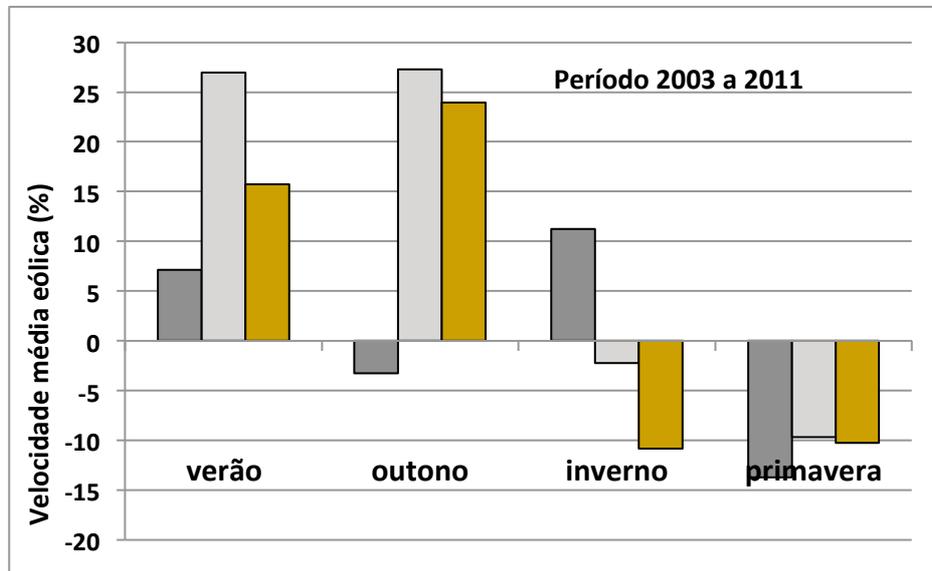


Figura 5.33 – Médias percentuais para variável eólica entre 2003 a 2011. Da esquerda para direita correspondem os meses que compõem as respectivas estações sazonais de acordo com a Tabela 5.9.

Na Figura 5.34, mostram-se as diferentes médias de variação entre as estações sazonais de 2003, 2005, 2008 e 2011, e na Tabela 5.10, é demonstrado a média de variação entre estes períodos.

As estações do ano que demonstraram o menor índice de decaimento no potencial eólico foram as do verão e outono, e a primavera indicou ser a estação com a maior perda. É importante salientar que estas tendências se referem ao comportamento da série eólica com vistas à previsão. Isto, porém, não significa que estas estações do ano sejam as melhores ou as piores estações para o aproveitamento do seu potencial para geração de energia elétrica ou para outra atividade qualquer, como no processo de produção agrícola em sistema de irrigação. Trata-se de buscar uma melhor avaliação comportamental da série temporal eólica para estas regiões, com vista ao melhor aproveitamento energético.

Ao confrontar os dados medidos com os dados estimados na previsão na Figura 4.22, capítulo quarto, observa-se que as previsões com relação ao

comportamento tendencial da variável eólica foram semelhantes indicando que os ajustes estatísticos foram satisfatórios para um melhor entendimento do perfil da série eólica.

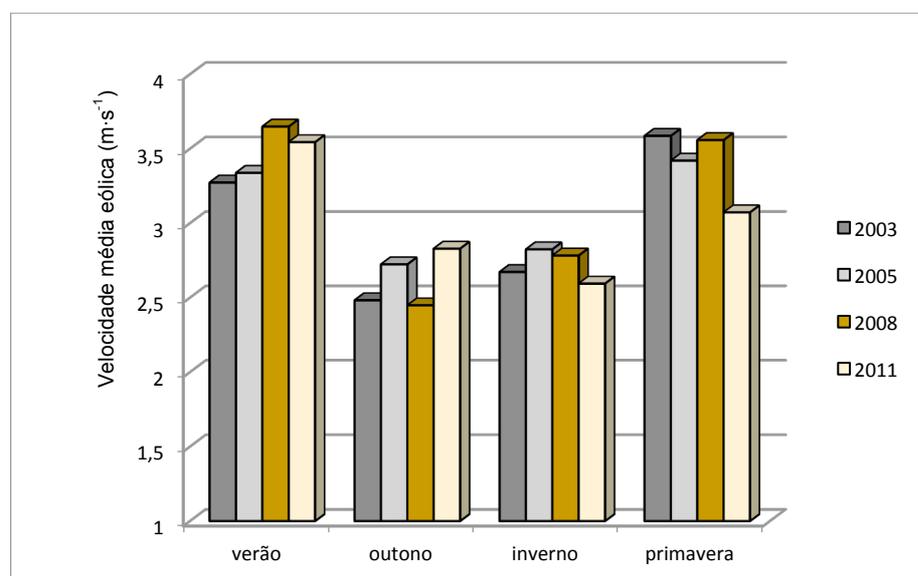


Figura 5.34 – Comparação entre as estações do ano da média de variação na velocidade média dos ventos ($m \cdot s^{-1}$) em diferentes anos.

Tabela 5.10 – Média da variação eólica entre os diferentes anos para as quatro estações do ano.

Meses	2003 a 2005 (%)	2005 a 2008 (%)	2008 a 2011 (%)
Verão	1,83	9,30	-2,74
Outono	9,67	-10,29	18,44
Inverno	5,61	-1,41	-6,83
Primavera	-4,46	3,80	-13,52

Na Figura 5.35, é apresentado o gráfico da velocidade média dos ventos nos diferentes meses do ano para todo o período entre 1970 e 2008.

Conhecer o comportamento da velocidade média eólica mensal para obter o perfil de maior ou menor potencial para geração é fundamental já que o

dimensionamento de demanda ocorre em função deste perfil. Aqui se refere apenas a este comportamento de maior ou menor potencial eólico em todo o período analisado entre 1970 e 2008, mas não com relação à tendência cíclica comportamental desta variável para previsões futuras como foi comentado. Neste caso, a primavera apresenta o melhor potencial para geração e o outono, o menor potencial. No caso da tendência comportamental desta variável, o outono foi o que apresentou o menor valor de queda percentual na velocidade média do vento e a primavera, o maior percentual.

Ao confrontar o perfil mostrado do potencial eólico da Figura 5.34 e os dados da Tabela 5.10 com a Figura 5.35, parece existir uma contradição, já que a estação de maior potencial para geração a primavera é a estação que apontou na direção contrária, com valores menores no seu potencial para geração. O mesmo ocorrendo com a estação do outono que demonstrou ter o menor potencial eólico na série histórica, mas, indicando tendência de aumento do seu potencial a partir de 2008.

É necessário que se faça um acompanhamento futuro do perfil destas estações sazonais, para se certificar o que aqui foi comentado, já que as variações climáticas atuais, também não andam muito comportadas.

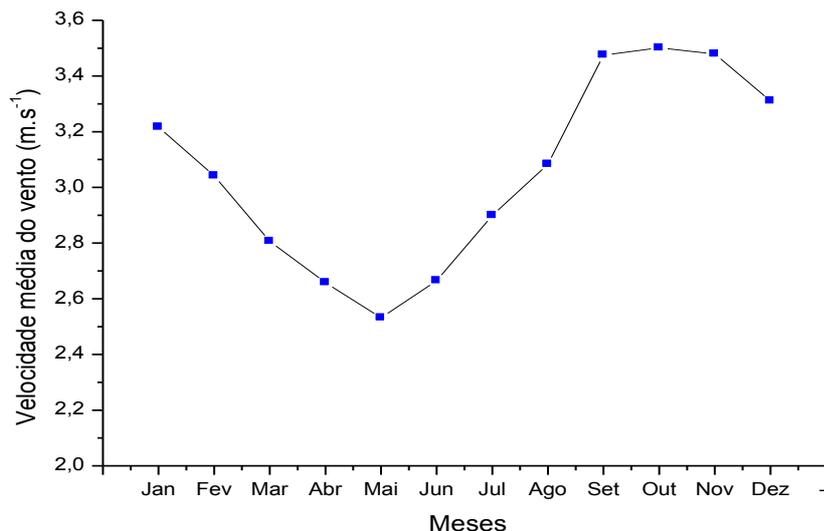


Figura 5.35 – Variação da velocidade média do vento ao longo dos meses para o período de 1970 a 2008.

5.5.2 Comentários sobre a estabilidade da série eólica e possíveis quebras estruturais

A quebra de dados em uma série é uma alteração em seu nível, algo que alterou a evolução da mesma. A partir dos dados entre 1970 e 2008 buscou-se verificar se neste período teria ocorrido uma ou mais alterações que levasse a modificar o seu perfil com relação à velocidade média dos ventos relativos às duas regiões de maior potencial eólico no estado do Rio Grande do Sul.

Após análise para verificar a estabilidade na série através dos testes CUSUM e o resultado do teste CUSUMQ, observou-se uma significativa evidência de instabilidade dos parâmetros sugerindo existência de quebra estrutural na série. Através do teste de Lanne et al (2001 e 2002), o resultado do teste apresentado sugere uma quebra estrutural na série histórica eólica em 08/2001. Isto indica que a série eólica analisada sofreu mudança em seu comportamento neste período, o que também pode ser verificado através da Figura 5.36.

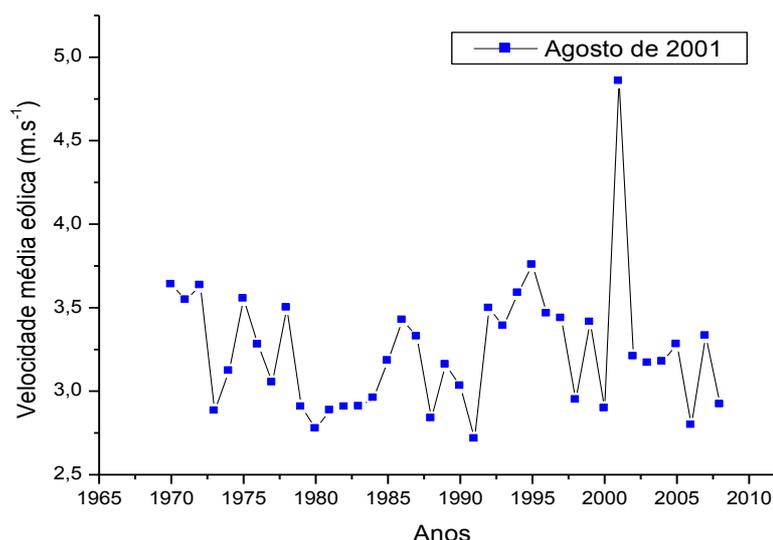


Figura 5.36 – Representação da velocidade média dos ventos (m.s⁻¹) para o mês de agosto entre 1970 a 2008.

A Figura 5.37 mostra a velocidade média dos ventos em diferentes meses e anos entre 1970 e 2008. A linha que representa a data de agosto de 2001 é a mais evidenciada entre os demais pontos que indicam certo decaimento entre 1997 e 2006, sinalizando para um acentuado aumento na velocidade dos ventos neste período.

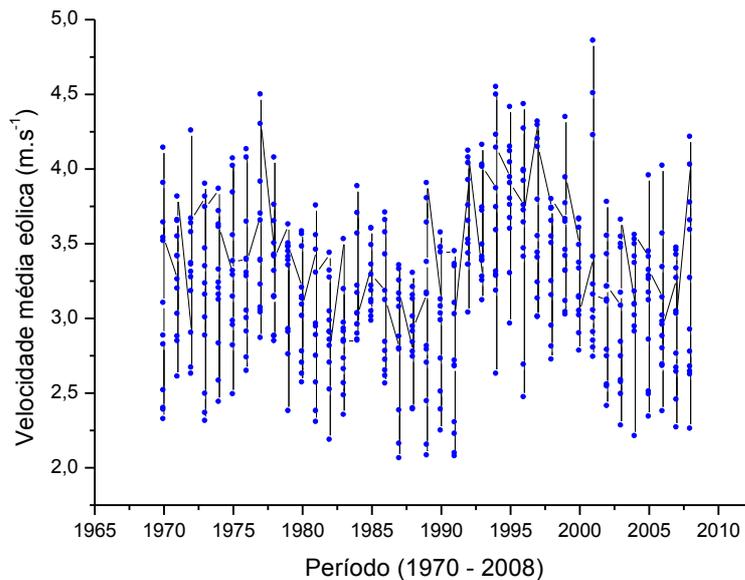


Figura 5.37 – velocidade média dos ventos em diferentes meses e anos entre 1970 a 2008.

Na Figura 5.38, é apresentada a velocidade média do vento referente a cada mês para os anos entre 2000 e 2002. Fica evidenciado que o mês de agosto de 2001 alterou a evolução da série e, juntamente com ele, elevou os índices dos meses de setembro e outubro. Esta quebra estrutural não foi encontrada nos demais meses dos diferentes anos analisados em toda a série. Algo, possivelmente no clima, possibilitou esta variação no perfil da série aumentando a velocidade o vento. Aparentemente, não se trata de algo normal que ocorra com certa frequência, mas algo que diferenciou o perfil da série já que não foi identificado entre 1970 e 2008, algo semelhante nos testes para verificação de possíveis quebras estruturais.

Possíveis medidas que tenham sido realizadas neste período podem levar a valores maiores, superestimando desta forma o perfil do potencial eólico.

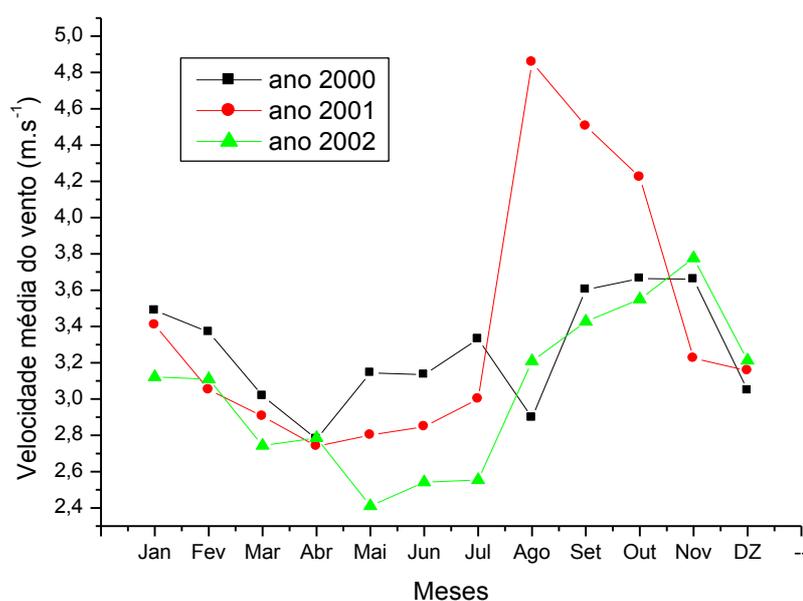


Figura 5.38 – Representação da velocidade média do vento em diferentes meses para os anos de 2000, 2001 e 2002.

5.5.3 Comentários gerais sobre a análise de tendência do comportamento sazonal da variável eólica e possíveis quebras estruturais.

A produção de energia elétrica em projeto de energia eólica tem importância fundamental, principalmente neste momento em que a busca por fontes alternativas de geração possa amenizar o impacto ao meio ambiente com relação às atividades antrópicas e suprir uma parte da demanda de energia cada vez maior.

O que foi observado pelas análises estatísticas e pela comprovação dos dados medidos, é que a variável eólica demonstrou tendências de diminuição nos seis meses do ano, entre 2003 e 2011. Apesar da estação da primavera apresentar o maior potencial para geração, ela também mostrou ser a estação com o maior índice de redução na sua velocidade média do vento. O mesmo ocorrendo com a estação do outono que demonstrou menor queda percentual em seus índices, apesar de ser uma estação sazonal de menor potencial.

Também foi constatada uma diferença na evolução da série para o mês de agosto de 2001, evidenciando uma instabilidade dos parâmetros e sugerindo existência de quebra estrutural. Nota-se que não foi verificada semelhante instabilidade em outro período da série, o que leva a evidenciar o que teria ocorrido neste período para que seus índices mudassem significativamente de valores. É possível que seja apenas um caso isolado, mas não se deve descartar a possibilidade de serem as mudanças climáticas comprovadamente discutidas nos meios científicos.

No estado do Rio Grande do Sul prevalecem os efeitos dinâmicos entre o anticiclone subtropical Atlântico, os intermitentes deslocamentos de massas polares e a depressão barométrica do nordeste da Argentina. Assim, o gradiente de pressão atmosférica entre a depressão do nordeste da Argentina e o anticiclone subtropical Atlântico levam a um escoamento persistente de Leste-nordeste ao longo de toda a região Sul do Brasil. E ainda têm-se, além dos regimes predominantes do vento, as intermitentes passagens de frentes frias, que se intensificam no inverno e na primavera, o que agrega por períodos curtos de três dias um maior potencial eólico ao Estado. Uma diminuição deste potencial nas estações de primavera e do inverno, como foram constatados, indica alguma mudança nos regimes dos ventos, com causas a serem investigadas devido à complexidade dinâmica dos mesmos. Também não é possível associar a quebra estrutural constatada no inverno com a predominância das frentes frias sem antes realizar um estudo mais aprofundado nas mudanças da série. Fica como sugestão no prosseguimento deste trabalho.

5.6 Análises do comportamento cíclico das variáveis insolação e radiação solar global

Os principais picos no espectro nas Figuras 4.38 e 4.39 do capítulo quarto mostram estarem relacionados a ciclos conhecidos. Os períodos de 12 e de 9,6 anos podem representar o ciclo solar de 11 anos, no qual o Sol sofre uma inversão dos seus polos magnéticos provocando maior emissão de partículas e radiação e, conseqüentemente, numa maior atividade solar.

O ciclo de 16 anos pode estar relacionado ao ciclo solar de Halle de 22 anos e o de 4,8 anos, segundo informações a partir de manchas solares e de dados climáticos, relacionados a um período de em torno 5,5 anos da atividade solar, (Vitinsky et al., 1986), conhecido como segundo harmônico do ciclo solar de 11 anos.

Segundo, Kocharov et al. (1995) atribuíram as influências da atividade solar aos períodos de 21,4 anos, 9,4 a 9,6 anos e 5,5 anos, em celulosas de anéis de crescimento de árvores pelo método de análise de Fourier, e períodos entre 21,3 anos, 9,7 a 13,5 anos e 5,5 anos, com o método de análise da máxima entropia. Utilizando o método de análise por regressão interativa, Rigozo et al. (2001), mostraram que os componentes espectrais mais estatisticamente significativos, para o período 1700 -1999, foram 65,3; 52,0; 12,0; 11,0; 10,0; e 8,5 anos.

Atualmente têm se observado uma tendência no aquecimento global do clima a qual se atribui principalmente ao efeito estufa. Mas nem toda variação da temperatura global pode ser atribuída às emissões do CO₂. Segundo Hoy e Schatten, (1997), apesar da concentração deste gás na atmosfera continuar aumentando, uma redução da atividade solar cíclica nas próximas décadas ou séculos pode contribuir para o resfriamento do clima. Estas reduções foram observadas neste trabalho nas análises de insolação e radiação solar. Também abordou-se a influência cíclica ou não do Sol no clima, juntamente com as variações de temperaturas dos oceanos, que podem ajudar a acontecer estas mudanças a nível global ou até serem aceleradas pelas atividades antrópicas.

Com relação aos principais ciclos observados na análise espectral da insolação, entre 1961 e 2011, as máximas amplitudes constatadas a nível estatisticamente significativo foram em períodos de 16; 12; 9,6 e 4,8 anos. Estes picos espectrais mostram a possibilidade de estarem associados às atividades solar e passíveis de influenciarem nas avaliações do potencial energético eólico ou solar de uma região. Aparentemente, pequenas diferenças verificadas nos índices da insolação ou radiação solar a nível da superfície terrestre, em pequenas áreas, parecem insignificantes. Mas, quando se trata de grandes extensões de áreas, esta diferença pode alterar as mensurações. Para tal, o que se observou foram valores de amplitude que podem alterar as medidas das variáveis climáticas levando a possíveis erros e a comprometer as estimativas do aproveitamento da sua potencialidade. Isto significa que observações do potencial solar quando o ciclo se

encontrar na máxima potência podem levar a superestimar os valores ou subestimar as medidas se o ciclo se encontra no potencial mínimo.

Os valores máximos encontrados para as amplitudes dos principais ciclos da insolação em horas foram convertidos em $W \cdot m^{-2}$ e mostrados na Tabela. 5.11. Para obtenção destes resultados, informações adicionais no Atlas Solarimétrico Brasileiro da radiação solar global diária, média anual para o Rio grande do Sul foram utilizadas. Estes valores corresponderam entre 14 a 16 $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$.

As amplitudes em horas convertidas em $W \cdot m^{-2}$ correspondem às parcelas das médias de radiação solar global diária de 14 e 16 $MJ \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$ para estas amplitudes.

Tabela 5.11 – Amplitude, fase e frequências dos períodos mais significativos observados na variável insolação.

Amplitude(h)	Fase(graus)	Freq(1/ano)	Período (anos)	Amplitude ($W \cdot m^{-2}$)
0,0624	53,6093	0,0625	16	0,449
0,0628	185,7682	0,0833	12,00480192	0,455
0,0737	36,6274	0,1042	9,596928983	0,532
0,0586	314,6134	0,2083	4,800768123	0,424

Os valores próximos de 0,5 $W \cdot m^{-2}$ das amplitudes máximas de insolação destes ciclos podem significar grandes diferenças na precisão dos dados medidos, distorcendo o valor real do potencial solar. Para a radiação solar global os valores encontrados foram mais baixos em relação aos da insolação, Tabela 5.12, provavelmente devido às diferenças nas medidas realizadas pelas estações climatológicas ou pela falta de informações mais criteriosas. Mas mesmo assim, estas diferenças são significativas em se tratando de clima. A Figura 5.39 mostra os dois componentes, o da insolação e o da radiação solar juntas com suas respectivas amplitudes em $W \cdot m^{-2}$.

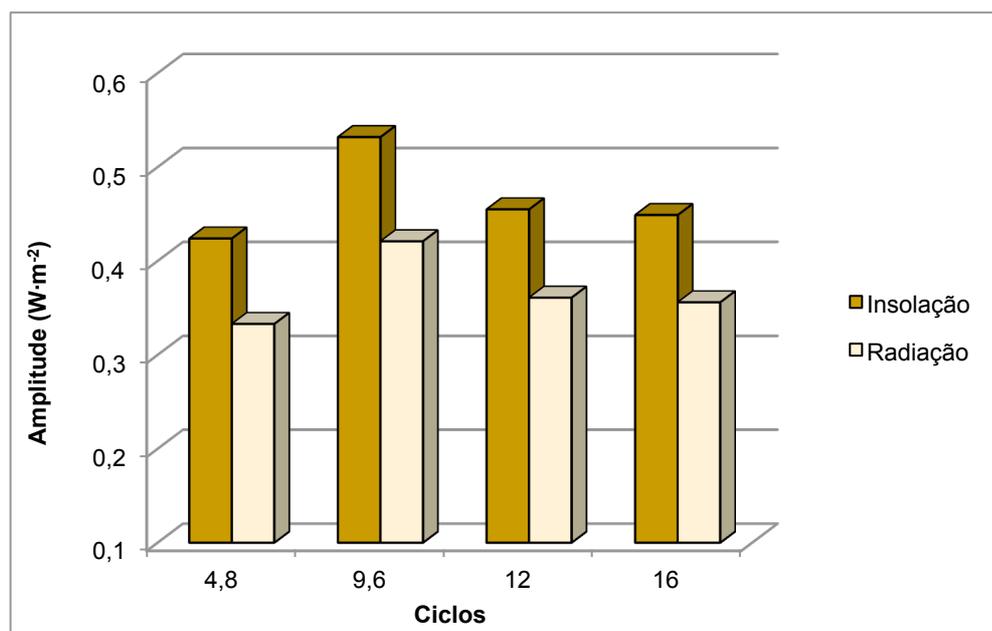


Figura 5.39 – Amplitudes em $w \cdot m^{-2}$ dos ciclos mais significativos observados no espectro da insolação

Tabela 5.12 – Amplitude dos períodos mais significativos observados nas variáveis insolação e radiação solar global

Período (anos)	Amplitude ($W \cdot m^{-2}$) Insolação	Amplitude ($W \cdot m^{-2}$) Radiação solar
16	0,449	0,356
12,00480192	0,455	0,361
9,596928983	0,532	0,421
4,800768123	0,424	0,333

A solução mais coerente para se estabelecer o potencial energético solar ou eólico seria considerar o valor médio do ciclo climático. Para isto, necessita-se saber em que ponto do ciclo se encontra o valor a ser medido. Ao identificar a fase de um determinado período, pode-se inferir quando ocorrerá o próximo pico, ou pelo menos, em que máxima deve-se encontrar o ciclo na data em que foram feitas as medições. Neste capítulo, não se procurou demonstrar qual o início de cada ciclo e a possibilidade do próximo pico ocorrer ou em que ponto da periodicidade se encontra

no momento das medições. Fica como sugestão para continuidade deste trabalho prever a possível data em que ocorrerão estes máximos e mínimos e indicar qual o ponto mais provável para melhores estimativas destas medidas.

É importante salientar ainda que a potência de pico máximo depende do ciclo considerado e da intensidade da atividade solar. No caso da geração eólica, o potencial energético varia com o cubo da velocidade dos ventos e isto deve ser levado em conta para estabelecimento do início do ciclo climático. Considerar também as diferenças entre máximos e mínimos do potencial que fazem a diferença na precisão dos resultados.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nas análises dos dados usados nesta tese mostraram o efeito de fenômenos solares no potencial energético solar eólico no intuito de estabelecer ciclos de intensidades solares capazes de influenciarem nas mudanças do clima com consequências para a qualidade de geração de energia elétrica. Da mesma forma objetivou auxiliar em projetos de novas fontes geradoras de potência dependentes da influência do Sol e de alerta quanto à qualidade das previsões do potencial estimado de energia elétrica sob a ingerência climática.

O tipo de análise proposto pretende ser universal quanto à influência das mudanças climáticas na geração de potência baseadas nos ventos e na radiação solar. Para tal, tomou-se como estudo de caso o estado do Rio Grande do Sul, Brasil, observando-se dados medidos em Estações Climatológicas deste Estado de forma a possibilitar uma generalização da metodologia proposta para embasamento das tomadas de decisão para localização de centrais energéticas dependentes das variações do clima. Constatou-se, portanto, a existência de tendências cíclicas significativas nas reduções de insolação e, conseqüentemente, de radiação solar, na maioria dos meses na região estudada.

Para o estudo de caso desta tese, o período entre 1961 e 2011 sugere que os índices de insolação e, conseqüentemente, da radiação solar observados no Rio Grande do Sul não foram suficientes para superar os valores verificados nas décadas de 1960 e 1970. Os percentuais na maioria dos meses foram da ordem de -1% abaixo da média, entre 1961 e 2011. A variável insolação, durante as estações de primavera, no período de 2008 e 2011, apresentou tendência de aumento, e a radiação solar nas estações de primavera e verão, entre 2003 e 2008 também apresentaram ganhos. Outra constatação foi o decaimento significativo do brilho solar entre os diferentes meses nas décadas de 1980 e 1990, chegando a níveis percentuais de -5,33% entre 1981 e 2000. Isto pode indicar que ocorreu um escurecimento em todo o estado do Rio Grande do Sul, como verificado em outras partes do globo terrestre associado ao fenômeno “global dimming”.

A partir da década de 2000, os índices de clareamento e radiação solar voltaram a crescer, mas com médias percentuais menores nos seus potenciais

verificados entre o período de 1961 e 1990. Entre as possíveis causas para este fenômeno, destacam-se a poluição atmosférica de origem antropogênica, principalmente devido à emissão de aerossóis na atmosfera, às explosões solares e ao aumento da nebulosidade. Esta tendência de diminuição, com ou sem o fenômeno do escurecimento global, leva a possibilidades significativas nas mudanças climáticas e conseqüentemente, de rendimento da geração usando potencial solar em suas diferentes formas.

Com relação ao potencial eólico para as duas regiões de melhor velocidade média dos ventos, no estado do Rio Grande do Sul, constatou-se uma redução em seis dos doze meses do ano no período de 2003 e 2011. Verificou-se também que a primavera, estação do ano tipicamente com maior potencial eólico, foi a que indicou maior média de redução enquanto que a estação de menor potencial eólico, a do outono, mostrou comportamento inverso para este mesmo período. Também, foi verificada em agosto de 2001 a existência de uma possível quebra estrutural na série levando a alterar a evolução da mesma e impulsionando as médias da velocidade eólica para cima tendo sido possível a superestimação das medidas efetuadas neste intervalo.

Os estudos dos ciclos dos principais picos encontrados no espectro mostraram forte relação com os ciclos já conhecidos. Houveram períodos de 12 e de 9,6 anos que podem representar o ciclo solar de 11 anos, no qual o Sol sofre uma inversão natural dos seus polos magnéticos provocando maior emissão de partículas e radiação e, conseqüentemente, uma maior atividade solar. Os ciclos de 16 anos podem estar relacionados ao ciclo solar de Halle de 22 anos e o ciclo de 4,8 é relacionado a um período de em torno 5,5 anos da atividade solar, conhecido como segundo harmônico do ciclo solar de 11 anos. Conclui-se, portanto que estes mesmos ciclos são os mais estatisticamente significativos e se pode atribuí-los à atividade solar entre os componentes espectrais. Estas atividades, juntamente com as variações de temperatura dos oceanos podem influenciar nas mudanças climáticas a nível global e ser passíveis de serem aceleradas pelas atividades antrópicas. Caso venha a acontecer uma redução da atividade solar nas próximas décadas e a possibilidade de que o Pacífico entre numa nova fase fria, segundo dados das anomalias de TSM do Pacífico, haverá um arrefecimento do clima que acobertará o real efeito do aquecimento global como foi observado nas análises de insolação e radiação solar deste trabalho de tese.

Os valores das amplitudes dos ciclos observados também são passíveis de influenciar nas medidas das variáveis climáticas levando a possíveis erros e a comprometer as estimativas de aproveitamento da sua potencialidade. Isto significa que observações do potencial solar quando o ciclo se encontrar na máxima potência podem levar a superestimar os valores, ou subestimar as medidas, se o ciclo se encontra no potencial mínimo. Estas variações no Rio Grande do Sul foram à ordem de 0,42 a 0,53 $W \cdot m^{-2}$, conforme o período analisado no pico de insolação de máxima potência e de 0,33 a 0,42 $W \cdot m^{-2}$ para a radiação solar global. Definitivamente, estas diferenças podem interferir na precisão dos resultados das mensurações climatológicas para localização das centrais solares e à superestimação ou subestimação dos potenciais eólicos e das intensidades solares.

6.1 Principais contribuições desta tese

- 1) Auxílio no prognóstico de longo prazo dos efeitos de fenômenos solares em projetos de localização de plantas de geração de potência;
- 2) Sugestões e informações para diferentes áreas que tratem sobre estudos energéticos sustentáveis e climáticos;
- 3) Metodologia para facilitar a análise da previsibilidade das intensidades climáticas no potencial solar eólico para qualquer área do Planeta;
- 4) Detecção de ciclos com amplitudes passíveis de influenciarem nas mensurações de aproveitamento solar-eólico e de sua potencialidade;
- 5) Estabelecimento de dados climatológicos com maior confiabilidade na acurácia no tratamento estatístico causado pela escassez de informações que se dispõe nos dados coletados ao longo de muitos anos.

6.2 Sugestões para a continuidade desta pesquisa.

1) Analisar o comportamento sazonal da variável eólica antes e depois da quebra estrutural e compará-las entre si objetivando inferir novas possíveis causas de imprecisões;

2) Aferir previsões através dos estudos dos ciclos de radiação solar visando conhecer em que momento de máxima ou mínima potência encontra-se cada ciclo e sua possível influência nas mensurações e variações climáticas a serem usadas na localização de plantas para geração de energia elétrica;

3) Realizar uma continuidade dos estudos sazonais e cíclicos das variáveis de radiação solar e eólica tentando interpretar as variações comportamentais em diferentes períodos conferindo com dados medidos visando maior entendimento da variação climática e suas consequências na geração de energia;

4) Verificar a possibilidade de um novo global dimming ou resfriamento do Planeta com causas diretas na geração de eletricidade a partir de novos dados de radiação solar, juntamente com estudos comportamentais das variáveis temperatura e precipitações médias relacionando-as com dados anteriores.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR R., “Estatística da Radiação Solar”. In: **IV Curso de Energia Solar**. Curso promovido pela UFPE, Recife, 1996.

AGUIRRE, A. (1995) Uma Introdução à Análise Espectral de Séries Temporais Econômicas. **Nova Economia**, BH. v.5, n.1, ago. 95.

AKAIKE, H. (1970). **Statistical predictor identification**. Ann. Inst. Statist. Math., 21: 203-217.

AKAIKE, H. (1974) **A New Look at Statistical Model Identification**, **IEEE Transaction on Automatic Control** AC 19, 716-23.

ALBERT, P. et al. Global dimming or local dimming? Effect of urbanization on sunlight availability. **Geophysical Research Letters**, v 32, Issue 17, Sep. 2005.

ALVES C. Aerossóis Atmosféricos: Perspectiva Histórica, Fontes, Processos Químicos de Formação e Composição orgânica. **Quim. Nova**, vol.28, N. 5, 859-870, 2005.

ANEEL, **Atlas Energia Solar** 3º edição, 2008. Disponível em:
[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf)

ARITA, H. H. e DIAS, M. H. A. **Análise comparativa dos métodos de ajustamento sazonal X-11 e X-11-ARIMA**: uma aplicação numa série temporal econômica brasileira. XXII EBE, Campinas, Dezembro, 2000.

ARNELL N. Climate Change and Global Water Resources: **SRES scenarios and sócio-economic scenarios**. **Global Environmental Change**, 14, 31-52, 2004.

ARTAXO P; et al. Efeitos Climáticos de Partículas de Aerossóis Biogênicos e Emitidos em Queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p.168-22, 2006.

ASSIS, F. N. de; ARRUDA, H. V. de; PEREIRA, A. R. **Aplicações de estatística à climatologia** – teoria e prática. Pelotas: UFPEL, 1996, 161 p.

AUSTRALIAN GOVERNMENT BUREAU OF METEOROLOGY. 2013. Disponível em: <http://www.bom.gov.au/climate/glossary/soi.shtml>

BALDOCCHI, D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**, v.0, p.479-492, 2003.

BERLATO e FONTANA. **El Niño e La Niña: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul**; aplicações de previsões climáticas na agricultura. Porto Alegre: Ed. Da UFRGS, 2003, 110 p.

BERLATO, M. A. Radiação Solar Global no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Agronomia Sulriograndense**, v. 7, n. 2, p. 115-131, 1971.

BERLATO, M. A; CORDEIRO, A. P.A. **Variabilidade Climática e Agricultura do Rio Grande do Sul**. In: As estiagens e as perdas na Agricultura: Fenômeno Natural ou Imprevisibilidade? Esteio: FEDERACITE, 2005. P 43 – 58.

BERS, 2011, **Balço Energético do Rio Grande do Sul ano base 2010** /Gilberto José Capeletto e Gustavo Humberto Zanchi de Moura. -Porto Alegre, Grupo CEEE / Secretaria de Infra-Estrutura e Logística do Rio Grande do Sul, 2011.192p. ; il.

BIELLO, D. Jornalista Científico. **Luz Solar pode Controlar o Clima**. Scientific 2013 American, Brasil. Disponível em: http://www2.uol.com.br/sciam/noticias/luz_solar_pode_controlar_o_clima.html

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. Time Series Analysis: **Forecasting and Control**. San Francisco: Holden Day, 1976.

BOX, G.E.P. & JENKINS, G.M. Time Series Analysis, **Forecasting and Control**, San Francisco. Holden Day, 1970.

BOX, G.E.P. and LUCEÑO, A. (1997). Discrete proportional-integral adjustment and statistical process control. **Journal of Quality Technology**, July v.29, n. 3.

BOX, G.E.P., & JENKINS, G.M. Time Series Analysis: **Forecasting and Control**. San Francisco. Holden-day (Revised Edition), 1994.

BRAMLEY, P. M. **Em Plant Biochemistry**; Dey, P. M.; Harborne, J. B., eds.; Academic Press: Bristol, 1997.

BRESSAN, A., **Tomada de Decisão em Futuros Agropecuários com Modelos de Previsão de Séries Temporais**. 2004. Disponível em: <http://www.rae.com.br>

BRUTSAERT, W. H. Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications. **Dordrecht: Kluwer Academic**, 1982. 316 p.

BUENO, R.L.S. **Econometria das Séries Temporais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

BURIOL, G. A. et al. Transmissividade a Radiação Solar do Polietileno de Baixa Densidade utilizados em estufas. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 25, n. 1, p. 1-4, 1995.

CARBONO BRASIL, 2008. Disponível em:
http://www.institutocarbonobrasil.org.br/reportagens_carbonobrasil/noticia=352750.

CHRISTY, J.; SPENCER, R. MSU **globally averaged atmospheric temperature, global warming debate continues**. Disponível em:
<http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/MSU/msusci.html>. Acesso em: 16 dez. 2004.

COLLE, PEREIRA, NETO, BEYER e ABREU. **Rastreabilidade de Radiômetros para Medição da Energia Solar no Brasil**. Metrologia-2003 – Metrologia para a Vida Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM) Setembro 01-05, 2003, Recife, Pernambuco – BRASIL.

COOLEY, J. W., TUCKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. **Mathematics of computation**, V. 19, n. 90, p. 297-301, 1965.

CORREIA, F. W. S. **Estudo do balanço de radiação em áreas de policultivo na Amazonia**. São José dos Campos: INPE, 2000. 137p. Dissertação de Mestrado.

CUSTÓDIO M. de S.; BERLATO, M. A; et al. Nebulosidade Diurna no Rio Grande do Sul, Brasil: climatologia e tendência temporal. **Pesq. Agrop. Gaúcha**, Porto Alegre, v.15, n.1, p.45-52, 2009.

CUSTÓDIO M.de S, et al. **Insolação no Rio Grande do Sul: Climatologia e Impacto do El Niño e La niña**. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/14-4c269a26b9082148cf60ebae3ce7e615.pdf>.

DAGUM, ESTELA B. - Revisions of Time Varying Seasonal Filters, "**Journal of Forecasting**", 1 (2) April-June 1982.

DAVIES, K. **Ionospheric Radio**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1990. 580 p.

DUCHON, C. E. e O'MALLEY, M. S. Estimating Cloud Type from Pyranometer Observation. **Journal of applied Meteorology**, v.38, n.1, p.132-141, 1999.

DUFFIE J.A., BECKMAN, W.A., **Solar Engineering of Thermal Process**, Wiley – Interscience Publication, 1991.

EDDY J. A. The Maunder Minimum. **Science, New Series**, Vol. 192, No. 4245. (Jun. 18, 1976), pp. 1189-1202.

ESCÁRIA V., **A utilização do método X11 ARIMA na dessazonalização de séries de conjuntura**. Prospectiva e planejamento – 1995.

ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F. M.; BERLATO, M. A.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B. Insolação e radiação solar na região de Santa Maria, RS. I - Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 20, n. 3-4, p. 203-218, 1990.

FARRET, F. A. **Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica**. 2. ed. Editora UFSM, Santa Maria RS, 2014. 244 p.

FEDOROVA, N.; CARVALHO, M. H. Processos sinóticos em anos de LaNiña e de El Niño: Nebulosidade convectiva nas regiões equatoriais e tropicais da América do Sul e oceanos adjacentes. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.1, p.1-14, 2006.

FERREIRA, H. A. 1948 **Observações e Instrumentos Meteorológicos**, Livraria Sá da Costa, Lisboa.

FERREIRA, M.; ALMEIDA, G., **Introdução a Astronomia e às Observações Astronômicas**. Plátano Editora 7.^a Edição, Lisboa, 2004.

FIGUERES, C. (2013) Disponível em: <http://exame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/noticias/concentracao-de-co2-se-aproxima-de-limite-e-preocupa-onu>.

FOGARTY, M. J. (1988). **Time Series Models of the Maine Lobster Fishery: the effect of temperature**. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 45: 1145-1153.

FONTANA, D.C.; OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 87-91, 1996.

FREITAS, S. et al. **Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul**. Estudos Avançados, 19 (53), 2005. Texto recebido em 14 de fevereiro de 2005 e aceito para publicação em 26 de fevereiro de 2005.

GARCIA NO, VARGAS WM. The Temporal Climate Variability in the Rio de la Plata basin displayed by river discharges. **Climate Change**, 102, 929-945, 1997.

GERALD, M. et al. **Amplifying the Pacific climate system response to a small 11 year solar cycle forcing** (2010). Disponível em: http://www.agci.org/library/presentations/about/presentation_details.php?recordID=17477.

GOLDEMBERG, J., VILLANUEVA, L. D., 2003. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo, EDUSP, 225 p.

HAIGH, J. J. The sun and the Earth's climate. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 4, ISSN: p.1614-4961, 2007.

HAMILTON, D.J. **Times Series Analysis**. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1994.

HANSEN, A. D. A.; KAPUSTIN, V. N.; KOPEILIN, V. M.; GILLETTE, D. A.; BODHAINE, B. A.; **Atmos. Environ.** 1993, 27A, 2527.

HILBORN, R. & WALTERS, C. J. 1992. **Quantitative fisheries stock assessment – Choice, dynamics & uncertainty**. Chapman and Hall, New York.570p.

HOUGHTON J.T., Y. DING, D.J. GRIGGS, M. NOGUER, P.J.VAN der LINDEN and D. XIAOSU. (Eds) (2001): **Climate Change 2001**. The scientific basis. Cambridge University Press, UK, 994 pp.

HOYT, D.V. e SCHATTEN, K.H. **The role of the Sun in Climate Change**, Oxford University Press, New York (1997).

HUSCHKE, R. E. **Glossary of Meteorology American Meteorological Society**, Boston. Massachusets. 1959.

IPCC (2007), **Mudança do Clima 2007**: Contribuição do grupo de trabalho I para o quarto relatório de avaliação do painel intergovernamental sobre mudanças do clima. Disponível em: <http://www.ipcc.ch>

IPCC. Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N. A., Dokken, D. J., K. S. (eds). **Cambridge University Press** 1032p. 2001.

IQBAL, M., **An Introduction to Solar Radiation**, Canadá, Academic Press, 1983.

JAENICKE, R. **An Aerosol-Cloud-Climate Interactions**; Hobbs, P. V., ed.; Academic Press Inc.: U.K., 1993, p. 1-31.

KANE, R.P (1999): "Prediction of the sunspot maximum of solar cycle 23 by extrapolation of spectral components". **Solar Physics**, 189, 217-224.

KONDRATYEV, K. Ya. **Radiation in the atmospheric**. New York, USA: Academic Press, 1969. 912p.

KRATZENBERG, M. et. al., **Rastreabilidade de Radiômetros Para Medição da Energia Solar no Brasil**. METROLOGIA-2003 – Metrologia para a Vida. Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM) Setembro 01-05, 2003, Recife, Pernambuco – BRASIL.

KREIDER, J.F., KREITH, F., **Solar Energy Handbook**, Estados Unidos da América, McGraw-Hill, 1979.

KUMARI, B. P., and B. N. GOSWAMI, 2010: **Seminal role of clouds on solar dimming over the Indian monsoon region**. **Geophys. Res. Lett.** 37, L06703, doi:10.1029/2009GL042133.

KVALEVAG, M. M., and G. MYHRE, 2007: **Human impact on direct and diffuse solar radiation during the industrial era**. **J. Climate**, 20, 4874–4883.

LADIRAY, D., and B. QUENNEVILLE, 2001: **Desestacionalizar con el método X11**. Laborat. de Méthodologie Du Traitement des Données, Université Libre de Bruxelles, Belgique, 2000-2001, n. 8-9.

LANA, X., M.D. MARTÍNEZ, C. SERRA and A. BURQUEÑO (2005): "Periodicities and irregularities of indices describing the daily pluviometric regime of the Fabra Observatory (NE Spain) for the years 1917-1999". **Theoretical and Applied Climatology**, 82, 3-4, 183-198.

LANNE. M. LUTKEPOHL H. and P. SAIKKONEN. 2002. Comparison of unit root tests for time series with level shifts. **Journal of Time Series Analysis**. v. 23. n. 6. p. 667-685.

LESTRADE J. P. The Effect of Cloud Layer Plane Albedo on Global and Diffuse Insolation Solar Energy. **Elmsford, New York**, v.44, n.22, p.115-121, 1990.

LIANG, F.; XIA X. A. Long-term in Solar Radiation and the Associated Climatic Factors over China for 1961-2000. **Annales Geophysicae**, v.23, n.7, p.2425-2432, 2005.

LIEPERT B. G.; KUKLA, G. J. Decline in Solar Radiation With Increased Horizontal Variability in Germany Between 1964-1990. **J. Climate**, v.10, n.1, p.2391-2401, 1997.

LIEPERT, B. G. Observed Reductions of Surface Solar Radiation at Sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n.10, p.1421, 2002.

LIEPERT, B. G.; TEGEM, I. Multi-decadal solar radiation trends in the United States and Germany and direct tropospheric aerosol forcing. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.D12, 2002.

LIMA, C. R; GÓIS, R. M; ULISES, C. Previsão de preços Futuros de Commodities agrícolas com diferenciações inteiras e fracionárias, e erros heteroscedasticos. **Ver. Econ. Sociol. Rural**, vol. 45, n. 3, Brasília jul./set. 2007.

LIOU K. N. **Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere**: Theory, observation and modeling. New York: Oxford, 1992. P486.

LIOU K., **An Introduction to Atmospheric Radiation**, Orlando, Flórida, Academic Press, 1980.

LLORET, J., LLEONART, J. & SOLÉ, I. (2000). **Time Series Modelling of Landings in Northwest Mediterranean Sea**. ICES. Journal of Marine Science 57: 171-184.

LOHMANN, U., and J. FEICHTER, 2005: **Global indirect aerosol effects**: A review. Atmos. Chem. Phys., 5, 715–737.

LUTGENS, F.K. e E.J. TARBUCK, **The atmosphere: an Introduction to Meteorology**. Prentice Hall, 1989.

LUTGENS, F.K., TARBUCK, E.J. E TASA D.: **Atmosphere: An Introduction to Meteorology**, 11ª edição, Editora Prentice Hall, 544 pp, 2004.

MADDALA, G.S. **Introduction to econometrics**. 2. ed. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.

MAKRIDAKIS, S; WHEELWRIGHT,S.; HYNDMAN,R J. **Forecasting method's and applications**. 3 Ed. New York; John Wiley e Sons, 1998.

MARENGO J. A., CAMARGO C. G. Surface air temperature trends in southern Brasil for 1960-2002. *Inter. J. Climatol* 28: 893-904, 2008.

MARSH, N. D.; SVENSMARK, H. Low cloud properties influenced by cosmic rays, **Physical Review Letters**, v. 85, p. 5004–5007, physics/0005072, 2000.

MARTINEZ – LOZANO, J. A.; TENA, F.; ONRUBIA, J. E.; LA RUBIA, J. The historical evolution of the Ångström formula and its modifications. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 33, p. 109 – 128, 1984.

MARTINS, F. R, **Influência do Processo de Determinação da Cobertura de Nuvens e dos Aerossóis de Queimada no Modelo Físico de Radiação BRASIL-SR**. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

MCPHADEN, M. J. **El Niño and La Niña: causes and global consequences**. Encyclopedia of Global Environmental Change, John Wiley and Sons, LTD., Chichester, UK, v. 1, p. 353-370, 2002.

MCPHADEN, M. J.; DELCROIX, T.; HANAWA, K.; KURODA, Y.; MEYERS, G.;PICAUT, J.; SWENSON, M. **Observing the ocean in the 21st century**. Australian Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia, p. 231-246, 2001.

MENDELSSOHN, R. (1981). **Using Box-Jenkins Models to Forecast Fishery Dynamics**: Identification, Estimation and Checking. *Fish. Bull.* 78: 887-896.

MICHALSKY, J. J. et al. Degradation of Solar Concentrator Performance in the Aftermath of Mount Pinatubo. **Solar Energy**, v.52, n.2, p.205-213, 1994.

MINNIS, et al. Radioactive Climate Forcing by Mount Pinatubo Eruption. **Science**, v.259, p.1411-1415, 1993.

MONAHAN, E. C.; SPIEL, D. E.; DAVIDSON, K. L. **Em Oceanic whitecaps and their role in air-sea exchange processes**; Monahan, E. C.; Niocaill, G. M., eds.; D. Reidel Publishing: Dordrecht, Holland, 1986, p. 167-174.

MONASTERSKY, R. **Nature**, 2013, 497, 13–14.

MORETTIN, P. A. & TOLOI, C. M. C., **Modelos de Função de Transferência**, Rio de Janeiro, 3ª Escola e Séries Temporais Econometria, 1989.

MORETTIN, P.A. & TOLOI, C.M.C. **Análise de Séries Temporais**. São Paulo, Edgard Blücher, 2006.

MORETTIN, P.A. & TOLOI, C.M.C. **Previsão de Séries Temporais**, São Paulo, 2ª ed. 1987.

MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola**. São Paulo. Ed: Nobel, 1975. 376p.

MOURA R. G. **Estudos das radiações solar e terrestre acima e dentro de uma floresta tropical úmida**. São Jose dos Campos: INPE, 2001. 146p. Dissertação de Mestrado.

NIALS, FRED L.; DEEDS, E. E.; MOSLEY, M. E.; POZORSKI, S. G.; POZORSKI, T. G.; FELDMAN, R. **El Niño: The catastrophic flooding of coastal Peru**. Field Museum of Natural History Bulletin, v. 50, n. 7, p. 4-14, e n. 8, p. 4-10, 1979.

NÚÑEZ ESPALLARGAS, J.M. y PÉREZ, J. (1977): Distribució del balanço de la radiació na Catalunya. **Institut D'Estudis Catalans, Arxius de la Secció de Ciències**. LVI. 122, pp.

OHMURA, A. **Global Energy Balance Archive**, GEBA: World Climate Program-Water, project A7 (Zurcher geographische Schriften) Geographisches Institut, Eidgenossische Technische Hochschule Zurich (1989).

OHMURA, A. Observed Long-Term Variations of Solar Irradiance at the Earth's Surface. **Space Sciences of ISSI**, v23, p. 111-128, 2006.

OTTBONI, J. Jornalista Científico, **Escurecimento Global**, Edição 178 em 08/5/2007. Disponível em: <http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=2541>

PETERSON, T. C., and R. S. VOSE, 1997: **An overview of the global historical climatology network temperature data base**. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78, 2837–2849.

PHILIPONA, R.; DURR, B.; MARTY, C.; OHMURA, A.; Wild, M. Radiative forcing-measured at Earth's surface – corroborate the increasing greenhouse effect. **Geophysical Research Letters**, v.31, p.L03202, 2004.

PIDWIRNY, M. **Net radiation and the planetary energy balance**. Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. Date Viewed, 2006.

PIERCE, D. A. A survey of recent developments in seasonal adjustment. **Am. Stat., Washington**, v.34, n.3, p-125-134, 1980.

Pinker, R. T., B. Zhang, and E. G. Dutton, 2005: Do satellites detect trends in surface solar radiation? **Science**, 308, 850–854.

QUINN, P. K.; COFFMAN, V. N.; KAPUSTIN, T. S.; COVERT, D. S.; J. **Geophys. Res.** 1998, 103, 16547.

RAMANATHAN, V., P. J. CRUTZEN, J. T. KIEHL, and D. ROSENFELD, 2001: Atmosphere—Aerosols, climate, and the hydrological cycle. **Science**, 294, 2119–2124.

RAMOS, F.G.; SEIDLER, N. Estudo da energia eólica para aproveitamento em pequenos empreendimentos. Vivências: **Revista Eletrônica de Extensão da URI**. Vol.7, N.13: p.108-127, Outubro/2011.

RAUPACH, M. **Growth in the global carbon budget**. (2008). Disponível em: www.globalcarbonproject.org

ROMANOU, A., B. Liepert, G. A. Schmidt, W. B. Rossow, R. A. Ruedy, and Y. Zhang, 2007: **20th century changes in surface solar irradiance in simulations and observations**. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L05713, doi:10.1029/2006GL028356.

RUSSELL, P. B.; REDEMANN, J.; SCHMID, B; BERGSTROM, R. W.; LIVINGSTON, J. M.; McINTOSH, D. M.; RAMIREZ, S. A.; HARTLEY, S.; HOBBS, P. V.; QUINN, P. K.; CARRICO, C. M.; ROOD, M. J.; OSTROM, E.; NOONE, K. J.; von Hoyningen-Huene, W.; Remer, L.; *J. Atmos. Sci.* 2002, 59, 609.

SALSTEIN, D. **Composition, Chemistry, and Climate of the Atmosphere**; Singh, H. B., ed.; Van Nostrand Reinhold: U.S.A., 1995, p. 19-170.

SCHWARZ, G. **Estimating the Dimension of a Model**. *Annals of Statistics*. Volume 6, Number 2 (1978), 461-464.

SEM, Z.; TAN, E. Simple Models of Solar Radiation data for Northwestern of Turkey. **Energy Conversion and management**, v.42, n.5, p.587-598, 2001.

SHINDELL, D. T.; SCHMIDT, G. A.; MANN, M. E.; FALUVEGI, G. Dynamical winter climate response to large tropical volcanic eruptions since 1600. *J. Geophys. Res.*, v. 109, n.D05104, doi:10.1029/2003JD004151, 2004.

SNEYERS, R. *et al.* **Climatic changes in Belgium as appearing from the homogenized series of observations made in Brussels**. In: SCHIETECAT, G. D. (Ed.). **Contributions à l'étude des changements de climat**. Bruxelles: Institut Royal Meteorologique de Belgique, Publications Série 124, 1990. p. 17-20.

SOKOLIK, I. N.; ANDRONOVA, A. V.; JOHNSON, T. C.; *Atmos. Environ.* 1993, 27A, 2495.

SOUZA, A.M. **Aplicação e Performance da Análise de Intervenção em Séries Macroeconômicas Brasileiras**. Monografia de Especialização, UFSM, 1991.

STANHILL, G. (1995) **Global irradiance, air pollution and temperature changes in the Arctic**. Phil. Trans. R. Soc., A, 352, pp. 247–258.

STANHILL, G. Global Dimming: A new Aspect of Climate Change. **Weather** – January 2005, vol 60, n1.

STANHILL, G., and S. MORESHET, 1992: Global radiation climate changes: The world network. *Climatic Change*, 21, 57 a 75, and S. Cohen, 2001: Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. **Agric. For. Meteor.**, 107, 255–278.

STANHILL, G.; COHEN, S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.107, n.1, p.255-278, 2001.

STANHILL, G.; KALMA, J. D. Secular variation of global irradiance in Australia. **Australian Meteorological Magazine**, v.43, p.81-86, 1994.

STERGIOU, K. I. & CHRISTOU, E. D. (1996). **Modelling and forecasting annual fisheries catches: comparison of regression, univariate and multivariate time series methods**. *Fish. Res.* 25: 105-138.

STERGIOU, K. I. (1989). **Modelling and forecasting the fishery for pilchard (*Sardina pilchardus*) in Greekwaters Using ARIMA Time-Series Models**. *J. Cons. Int. Explor. Mer.* 46: 16-23.

STRECK, N. A. et al. O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a variabilidade interanual da evaporação do tanque Classe A e da umidade relativa do ar em Santa Maria, RS. **Ciência Rural, Santa Maria**, v.38 n.5, p.1452-1455, ago, 2008.

STREET, and COAUTHORS, 2009: **Anthropogenic and natural contributions to regional trends in aerosol optical depth, 1980–2006**. J. Geophys. Res., 114, D00D18, doi: 10.1029/2008JD011624.

STRETEN, N. A. **Southern Hemisphere circulation contests in the winters of 1972 and 1973**. Preprints first International conference on Southern Hemisphere Meteorology, Sao José dos Campos-SP: INPE, p.108-111, 1983.

TEGEN, I.; LACIS, A.; FUNG, I.; **Nature** 1996, 380, 419.

TEIXEIRA, J. A. J. FOGLIATTO, S. F. Modelos de Box-Jenkins: procedimento para identificação do melhor modelo segundo sua complexibilidade crescente. **Revista pesquisa naval**, Brasília, n.17 p. 17-23 novembro 2004.

TINTASBARATAS, 2013. **Revista Ciência**. Disponível em: <http://es.paperblog.com/la-foto-mas-nitida-de-una-mancha-solar-jamas-tomada-2027783/>

TUBELIS, A.; NASCIMENTO J. L. **Meteorologia Descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. 1. ed., São Paulo: Livraria Nobel, 1992. 374p.

U.S. Energy Information Administration (EIA). Para o Brasil, **dados do Balanço Energético Nacional (BEN) 2013**; Elaboração: EPE. Disponível em: http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf

VAREJÃO – SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**, Recife, 2006. Versão digital 2. Disponível em: http://www.agritempo.gov.br/tmp/Meteorologia_Climatologia.pdf

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia-Ministério da Agricultura. 2001. 515 p.

VIANELLO, R. L.; A. R. ALVES. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 449p.

VIANELLO, R. L.; A. R. ALVES. **Meteorologia Básica e Aplicações**. 3 ed. Viçosa: Editora UFV, 2004. 449p.

VIDE, J. M, et.al. **Tendencias Recientes de la Insolación em la España peninsular y Baleares (1971-2000)**. 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Sevilla, 2006.

VILLA NOVA, N. A.; SALATI, E. **Radiação Solar no Brasil**. Simpósio Anual da Academia de Ciências do Estado de São Paulo. SP, 1978. P 27-33.

WILD, M. **Enlightening Global Dimming and Brightening**. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 27–37. 2012 doi. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00074.1>

WILD, M. et al. From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. **Science**, 6 May 2005: Vol. 308 no. 5723 pp. 847-850.

WILD, M. et al. Impact of Global Dimming and Brightening on Global Warming. **Geophysical, Research Letter**, vol. 34, L04702, 2007.

WILD, M., 2009: **Global dimming and brightening**: A review. J. Geophys. Res., 114, D00D16, 10.1029/2008JD011470.

WILLSON, R. C., and A. V. MORDVINOV, 2003: Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21–23. Geophys. **Res. Lett.**, 30, 1199, doi:10.1029/2002GL016038.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **International Meteorological Vocabulary ed Tetralingue**, Genebra. 1966.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Measurement of radiation. Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 5 ed 1983, Genebra.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Impelmentation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC, 2004**. 29p. (WMO/TDn.1244). Disponível em: http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/publications/gcos-92_GIP_ES.pdf Acesso em 14 maio 2014.

WYRTKI, K.; STROUP, E.; PATZERT, W.; WILLIAMS, R.; QUINN, W. Predicting and observing El Niño. **Science**, v. 191, p. 343-346, 1976.

XAVIER, B. P. **Análise e Comparação de Modelos de Previsão de Vazões para o Planejamento Energético Utilizando Séries Temporais**. Dissert. Programa de PG da Escola da Eng. Elétrica e de Computação-UFG-2009. Disponível em: http://bdtd.ufg.br/tesesimplificado/tde_arquivos/18/TDE-2010-04-14T125000Z-696/publico/dissertacaoPricila.pdf

YAMASOE M. A. **Apostila da Disciplina Meteorologia Física II**. São Paulo: USP/IAG, 2006, 88p.

ZUÑIGA, A. C. **Agroclimatología**. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia. 1985. 520 p.

APÊNDICES

Apêndice A – Escurecimento Global

Como tratado no cap. 2.6, o escurecimento global ou “global dimming” descoberto a mais de três décadas, não teve muita repercussão na comunidade científica até alguns anos atrás, pois se tratava de um paradoxo. A hipótese de haver um fenômeno de resfriamento global derivado das emissões de origem antrópica não correspondia aos resultados de pesquisas, que indicavam para um aquecimento global na baixa troposfera. A comunidade científica inicialmente se recusou a aceitar esses dados, pois acreditava que se havia redução da irradiação solar sobre a superfície da Terra, isso deveria deixar o nosso planeta mais frio. Mas, o que estava acontecendo era o inverso, o aquecimento global. Dados medidos e observados mostraram que nos últimos 50 anos a quantidade média de radiação solar que atingiu o solo caiu em 3% a cada década. Outros estudos mostraram ainda que a radiação solar caiu 10% nos Estados Unidos da América, cerca de 30% em partes da Antiga União Soviética e 16% em partes das Ilhas Britânicas (Fonte. Carbono Brasil, 2008). Também foram encontradas reduções significativas de radiação solar global nos círculos polares de $0,36 \text{ Wm}^{-2}$ por ano no Ártico e de $0,28 \text{ Wm}^{-2}$ por ano na Antártica sendo estas reduções baseadas em uma análise de dados de todas as estações de medições nestas regiões frias e isoladas utilizando dados de piranômetros, (Stanhill, 2005).

Por outro lado, existem evidências de que houve um significativo escurecimento sobre a Terra até cerca de 1990, quando os dados sugerem um processo gradual de inversão para o “clareamento” (Wild et al, 2005), atribuído possivelmente ao sucedido esforço no controle da poluição.

Apesar da inversão de tendência generalizada do escurecimento para o clareamento, a quantidade de radiação solar na superfície não atingiu o nível de 1960 (Wild et al, 2007). Constatou-se que a insolação, na virada do milênio é um pouco menor do que na década de 1960, e as temperaturas na superfície terrestre aumentaram $0,8^{\circ}\text{C}$ ao longo deste período, (Figura A.1). A evidência de que o efeito do aumento de energia solar na superfície terrestre ao longo das últimas décadas,

não pode ter sido a principal causa do aumento global da temperatura, uma vez que ao longo dos últimos 40 anos, a partir do resfriamento solar, o escurecimento ainda supera o aquecimento com relação ao aumento do brilho solar.

Segundo Wild et al, (2007), o aumento global da temperatura desde 1960 pode ser atribuído ao efeito estufa. Desta forma, parecem infundadas as especulações de que o clareamento solar em vez do efeito estufa ser a principal causa do aquecimento global ao longo das décadas passadas. Isto sugere que o escurecimento solar global, possivelmente favorecido pelo aumento da poluição do ar, foi eficaz em mascarar o aquecimento pelo efeito estufa até 1980, mas não depois disso, quando o escurecimento foi substituído pelo clareamento com um aumento rápido da temperatura de + 0,38°C por década sobre a Terra, desde meados de 1980.

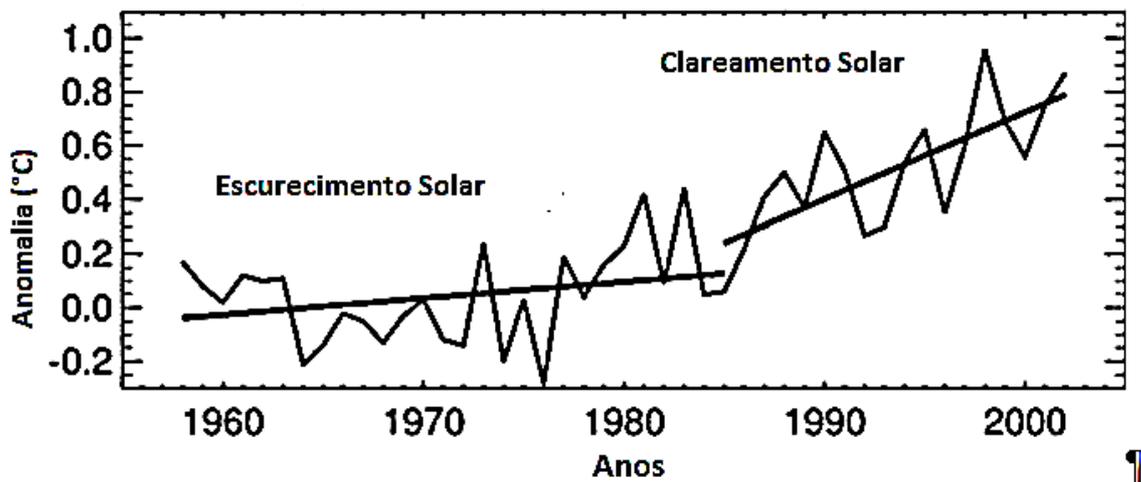


Figura A.1 – Variações de temperatura globais na superfície terrestre entre 1958 e 2002 em relação a 1960

Fonte: Wild et al, 2007.

Pela Figura A.1 nota-se, que enquanto o aumento da temperatura durante o período do escurecimento solar a partir da década de 1960 é moderado, o aumento da temperatura é mais rápido nas últimas duas décadas em que o escurecimento não se fazia mais presente. Em todo caso, o aquecimento global e escurecimento

global podem coexistirem juntos. O escurecimento global parece desempenhar um papel importante nas tendências de calor latente, enquanto que o aquecimento global domina a tendência de estoque de energia de superfície (Romanou et al, 2007).

Também foi observado que o aumento do brilho solar na superfície terrestre é menos coerente em relação ao escurecimento anterior, com a inversão das tendências em diferentes locais. O fato a ser notado é que o clareamento solar compensou em parte o escurecimento solar global de modo que a insolação observada após a virada do milênio, ainda eram tipicamente inferiores aos de 1950, (Wild, 2012) e em algumas regiões continuaram apresentando redução contínua de insolação como por exemplo na Índia, (Kumari e Goswami, 2010).

Pelas Figuras A.2 e A.3 observa-se a representação esquemática dos períodos de escurecimento e clareamento solar.

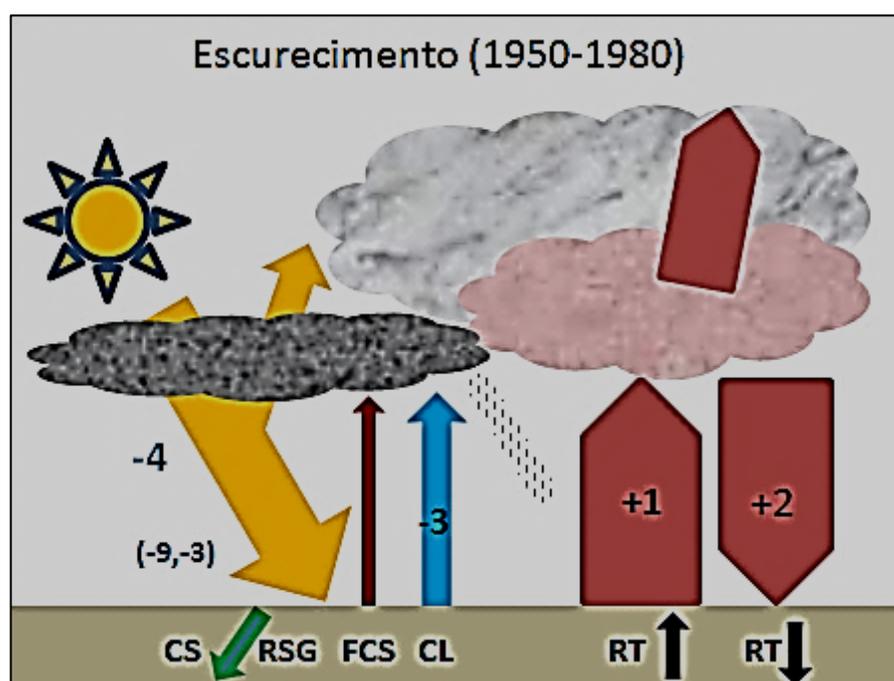


Figura A.2 – Representação esquemática do declínio da radiação solar entre 1950-1980 e as possíveis consequências no ciclo da água e no aquecimento global

Fonte: figura reconstruída a partir de Wild. M, 2012

Na figura A.2 acima, durante a fase de escurecimento global (1950 a 1980), a diminuição da radiação solar global (RSG) sobre a superfície terrestre pode ter compensado substancialmente o aumento da radiação térmica atmosférica (RT_{\downarrow}) dos gases de efeito estufa e efetivamente neutralizado o aquecimento global, causando um pequeno aumento na emissão térmica de superfície (RT_{\uparrow}). A redução da energia radiativa na superfície da Terra pode ter atenuado a evaporação e seu equivalente de energia, o fluxo de calor latente (FCL), levando a uma desaceleração do ciclo da água.

Na Figura A.3 abaixo, o efeito estufa deixou de ser mascarado, causando um aquecimento mais rápido, evaporação mais forte/(RT), e uma intensificação do ciclo da água. Os valores entre parênteses, indicam os intervalos da melhor estimativas das mudanças globais do RSG encontrados na literatura do fluxo de energia superficial em Wm^{-2} para ambos os períodos de escurecimento e clareamento. Os números positivos/negativos, mostrados em vermelho e preto, denotam as magnitudes de aumento/diminuição dos fluxos de energia na direção indicada pelas setas. As alterações no fluxo de calor do solo (CS) e do fluxo de calor sensível (FCS) são consideradas pequenas em comparação com as variações do fluxo acima referidos (Wild M. 2012).

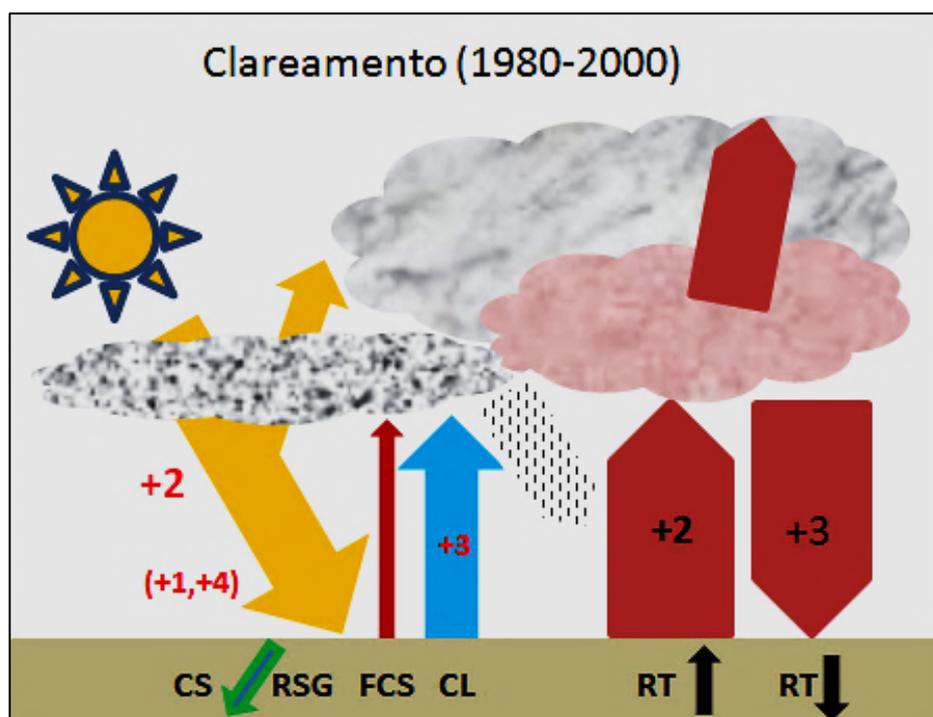


Figura A.3 – Representação esquemática do incremento de radiação solar entre 1980-2000 e as possíveis consequências no ciclo da água e no aquecimento global

Fonte: figura reconstruída a partir de Wild. M, 2012

Estimativas encontradas na literatura para o declínio global RSG durante o período de escurecimento de 3 a $9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, e de 1 a $4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ para a recuperação parcial durante o subsequente período de clareamento foram relatados por inúmeros autores, entre eles Stanhill et al, (1992 e 2001); Albert et al, (2005); Kvalevag et al, (2007); Wild, (2009) e dentre outros.

Os valores citados mostram prováveis declínio para mais perto do limite inferior devido aos possíveis efeitos inerentes da urbanização, (Albert et al, 2005; Kvalevag Myhre, 2007). A evolução depois do ano 2000 para o clareamento, mostraram tendências distintas em diferentes lugares sendo que o clareamento no geral, foi distintamente menos observado depois de 2000 em comparação com a década de 1990 em diferentes centros de medições. O iluminamento ou clareamento na Europa e nos Estados Unidos continuou após 2000 entretanto, na China o indicativo é de um renovado escurecimento após uma fase de estabilização na década de 1990, enquanto na Índia persiste o escurecimento (Wild et al 2009).

O fato é que muitas questões relacionadas ao escurecimento/clareamento ainda não estão bem estabelecidas e compreendidas e continuam em aberto e em debates, tais como a qualidade e representatividade dos dados observacionais após o escurecimento bem como o significado em grande escala deste fenômeno.

Apêndice AB – Possíveis Causas do Escurecimento e Clareamento Solar Global

As variações decadais no que se refere a radiação global solar sobre a Terra não parece ser explicada pela mudança na luminosidade do sol, uma vez que estas são menores pelo menos em ordem de grandeza (Wilson et al, 2003). Estas variações observadas da radiação global devem ter a sua origem a partir de alterações na transparência da atmosfera, o que depende da presença de nuvens, aerossóis e dos gases radioativamente ativos (Kvalevag et al, 2007). Essas mudanças poderiam ser o resultado direto ou indireto de maiores concentrações de aerossóis na atmosfera (Stanhill, 2005).

O escurecimento e clareamento também têm sido observados sob a atmosfera sem a presença de nuvens em diferentes locais, apontando para uma relação em destaque dos aerossóis atmosféricos (Wild et al, 2005). Os aerossóis podem atenuar diretamente a energia da radiação solar por espalhamento e absorção por efeito direto ou, atenuar indiretamente a radiação global através de sua capacidade de agir no núcleo de condensação das nuvens (NCN), aumentando desta forma o tempo de permanência da refletividade das nuvens (primeiro e segundo efeitos indiretos), (Lohmann et al, 2005). A questão é que todos estes efeitos agem na redução da radiação global quando houverem maiores níveis de aerossóis.

Nas últimas décadas o esforço para a redução nos níveis de poluição do ar levou a uma alteração significativa na carga de aerossóis na atmosfera. Estas emissões de origem antropogênicas, tais como enxofre e carbono negro tiveram um significativo aumento nas décadas de 1950 a 1980. Após este período, tiveram redução nas suas emissões para a atmosfera no Hemisfério Norte contribuindo para a melhoria na qualidade do ar. As tendências observadas no clareamento solar sugerem que a poluição atmosférica de origem antropogênica pode sim

desempenhar um significativo papel para se entender as variações da radiação solar global, (Street et al, 2009).

Interações entre aerossóis e nuvens, mesmo em ambientes longe da poluição, podem estar sujeitos a fortes tendências de escurecimento e clareamento induzidas por pequenos aumentos ou reduções na emissão de aerossóis. Isto implica que o escurecimento/clareamento pode ser substancial, mesmo em áreas longínquas das fontes de poluição, onde pequenas mudanças nos níveis de aerossóis transportados para estas regiões distantes pode efetivamente alterar a radiação solar global através de modificações do estado físico das nuvens.

Já em regiões poluídas, os efeitos microfísicos nas nuvens, tendem a se saturar devido a sensibilidade logarítmica do núcleo de condensação de nuvens (NCN), enquanto a extinção direta da radiação solar global pelos aerossóis torna-se ainda mais relevante, aumentando proporcionalmente com o acúmulo da carga de aerossóis. As camadas de poluição absorvem ainda mais calor e estabilizam a atmosfera atenuando a radiação solar global e conseqüentemente a evaporação relacionada à superfície. Este fato, segundo Ramanathan et al, (2001) conduz a uma redução na formação das nuvens convectivas e dissolvem nuvens nas camadas aquecidas pela absorção de aerossóis (conhecido como efeito aerossól semi-direto). Assim, em áreas densamente poluídas, a associação de sombreamento e redução de nuvens podem contrariar em parte a redução provocada pelos aerossóis na radiação solar global e em contraste, com lugares onde a poluição é mínima, as interações aerossóis-nuvens tendem a atenuar as tendências do escurecimento/clareamento induzidos pelos efeitos diretos dos aerossóis (Wild et al, 2012).

Segundo Wild et al (2012), a aplicabilidade deste conceito geral necessita uma avaliação mais aprofundada. Podendo servir como guia para se investigar especificamente o escurecimento/clareamento global e as contribuições nas interações entre aerossóis-nuvens em diversos lugares da Terra sob diferentes características de poluição e regimes climáticos.

Além disso, não se pode excluir que fatores não antropogênicos, tais como variações na nebulosidade provocada pela variabilidade decadal natural no sistema atmosfera/oceano, que pode ter contribuído para alterar a radiação solar global em diferentes lugares da Terra (Romanou et al, 2007).

Apêndice AC – Aerossóis Atmosféricos

Como as evidências apontam como uma das possíveis causas do escurecimento global a emissão de aerossóis na atmosfera, pretende-se mostrar neste ítem, algumas características sobre os aerossóis, sua origem e seus efeitos na atmosfera.

O termo aerossol foi criado por Schumauss em 1920, que se refere as suspensões relativamente estáveis de partículas sólidas ou gotículas dispersas em um gás com dimensões inferiores a 100 μm , mas tamanhos superiores aos das moléculas individualizadas. Estas suspensões são frequentemente designadas como aercolóides, matéria particulada ou simplesmente partículas e incluem poeiras, fumos, cinzas, nevoeiros e “sprays” (Alves C, 2005). As principais propriedades que caracterizam um sistema aerocoloidal são: (1) deposição gravitacional negligenciável; (2) efeitos inerciais desprezíveis; (3) movimentos Brownianos significativos, devidos à agitação térmica das moléculas do gás e (4) elevada área superficial específica.

Os meteorologistas reconhecem as múltiplas influências que os aerossóis exercem na formação da precipitação, na visibilidade atmosférica e no balanço térmico e radiativo. Os aerossóis estão presentes em diversos fenômenos naturais que abrangem a formação de nuvens e de precipitação, no balanço radiativo da atmosfera, na visibilidade, permutas entre o oceano e a troposfera e as eventuais modificações na camada de ozônio e são incluídos entre os principais vetores da poluição e da radioatividade atmosférica (Alves. C, 2005).

Apêndice AD – Origem dos aerossóis fontes primárias e secundárias

As partículas primárias são emitidas por várias fontes naturais ou antropogênicas que vão desde processos de combustão, as erupções vulcânicas, as queimadas florestais, as emanações derivadas de certas atividades industriais e viárias, o “spray” marinho e alguns materiais biológicos (ver cap 2.4.1, figura 2.13 - representação esquemática dos mecanismos de formação do aerossol atmosférico).

O carbono presente nos aerossóis, (carbono orgânico e carbono negro) representa uma mistura de compostos inorgânicos (CI), carbono orgânico (CO) e

carbono negro (CN) também conhecido como carbono elementar (CE). Os compostos de CN e CO constituem, em parte, produtos primários de origem antropogênica. Os CI são compostos primários de origem natural, mas é possível que uma pequena parte seja formada por reações atmosféricas. Já as partículas de CN são formadas por cadeias de átomos de carbono apresentando uma estrutura microcristalina semelhante à do grafite. Uma das definições mais usadas considera CN como todo o carbono que apresenta cor negra, sendo o restante, carbono orgânico, à exceção dos carbonatos (Alves, 2005). À presença destes aerossóis na atmosfera associa-se também a redução da visibilidade como consequência das propriedades de absorção da radiação luminosa.

Tem-se como principal fonte de aerossóis carbonosos as queimadas de biomassa e de combustíveis fósseis bem como a oxidação atmosférica de compostos orgânicos voláteis (COV) biogênica ou antropogenicamente produzidos.

As poeiras do solo também participam como material particulado. Tem-se demonstrado que o revolvimento dos solos nas atividades agrícolas podem constituir 50% das emissões globais, principalmente em anos ventosos e de estiagens (Tegen et al, 1996). As propriedades óticas das poeiras constituem uma área crescente de estudo, dado que a dispersão ou a absorção da radiação solar pelos constituintes silicatados podem contribuir para as alterações climáticas globais (Hansen et al, 1993 e Sokolik et al, 1993).

Outra fonte importante de emissão de aerossóis são os vulcões. Estima-se que a atividade vulcânica seja responsável pela emissão na atmosfera de 15 a 90 Tg ano⁻¹ de partículas (Jaenicke, 1993). Uma fração importante das partículas produzidas por estas fontes apresenta dimensões na ordem de 1 µm, permanecendo por longos períodos suspensas na atmosfera. Os aerossóis formados por esta atividade constituem uma camada duradoura que se espalha por toda a Terra funcionando como um filtro energético. Calcula-se que as erupções vulcânicas das últimas décadas tenham provocado um arrefecimento global na ordem de 0,1 a 0,5 °C (Salstein et al, 1995).

As partículas de sal marinho como consequência do rebatamento de bolhas de ar nas cristas espumosas das ondas também contribuem para a formação dos aerossóis (Monahan et. al, 1986). O sal marinho contribui positivamente para a dispersão da luz e para o aumento dos núcleos de condensação de nuvens (NCN)

em atmosfera de regiões remotas marinhas onde são desprezáveis outras fontes de matéria particulada (Quinn, et. al, 1998 e Russell et al, 2002).

As atividades tecnológicas e industriais também são responsáveis pela produção de aerossóis primários. A combustão de carvão, o processamento de cimentos, a metalurgia e a incineração de resíduos todos colaboram para a emissão de partículas na atmosfera. Também as atividades humanas do cotidiano como a utilização dos veículos de locomoção, a queima de resíduos domésticos e o processamento de alimentos entre outros, (Alves. C, 2005). Observa-se que nas grandes cidades com população superior a 100 mil habitantes, em contraste com locais de baixa densidade populacional, estão em constante atividades com várias fontes de poluentes antropogênicos, como combustíveis fósseis, sulfatos, nitratos e carbono negro (fuligem). Esses poluentes são liberados na atmosfera juntamente com as emissões de gases de efeito estufa. Isto sugere que as mudanças de radiação, verificadas nas grandes cidades, podem indicar um declínio mais significativo daquele indicado por medições de radiação solar em locais de baixa densidade populacional (Stanhill et al, 1995). Nota-se que o desenvolvimento urbano também está associado a outros fatores como ilha de calor, mudanças do albedo na superfície, modificações nas florestas através do desmatamento e queimadas. Assim, pode-se destacar, que o fenômeno do escurecimento solar é significativamente dominado por contribuições das grandes cidades na poluição atmosférica (Pinker et al, 2005).

As fontes secundárias como resultado dos mecanismos de nucleação e condensação de produtos gasosos dos aerossóis, pode resultar em aerossóis de sulfato, aerossóis de nitrato e aerossóis orgânicos secundários.

Os aerossóis de sulfato são formados pela oxidação SO_2 e posteriormente a ácido sulfúrico de H_2S emitido pelos processos biológicos, por vulcões ou pela transformação destes e de outros compostos sulfurados resultantes das atividades antropogênicas. Os aerossóis de nitrato derivam da oxidação e neutralização de compostos naturalmente emitidos ou resultantes das atividades humanas. Já os aerossóis orgânicos são formados por processos de condensação de compostos voláteis emitidos pela plantas, transportes e indústrias, (Bramley, 1997). A queima de carvão, petróleo e madeira, carros e usinas energéticas não produzem apenas gases invisíveis pelo efeito estufa, mas também estas minúsculas partículas de poeira e outros poluentes.

No estudo do clima e como indicadores da poluição natural ou induzida pelas atividades antrópicas os aerossóis atmosféricos são de grande importância. Estudos indicam que uma parte significativa da massa dos aerossóis atmosféricos pode ser atribuída a constituintes orgânicos. A fração carbonácea das partículas atmosféricas é composta por carbono negro e por carbono orgânico sendo que o primeiro é emitido diretamente para a atmosfera durante os processos de combustão e o segundo pode constituir as emissões primárias ou ser formado por condensação de produtos de baixa volatilidade da foto-oxidação de hidrocarbonetos (Alves, 2005).

A poluição atmosférica visível reflete a luz solar de volta para o espaço não a deixando chegar ao solo além de mudar as propriedades óticas das nuvens. Sabe-se que nuvens poluídas contém um maior número de gotas do que as não poluídas tornando-as um espelho que refletirá mais os raios solares.

Apêndice B – Rotina em Matlab

Rotina em Matlab:

```

%close all;

Clear all;

% horas de sol

c1=[8.0183746063...]

%radia,,o

c2=[505.35...]

c=c2;

N1=length(c1);
numero_de_amostras_ano=12;
Fs1=1/N1;
tt1=0:Fs1:(1 -Fs1);

%plota a serie original no tempo - Serie original
figure(1)
%t=tt+1961; %ano inicial 1961
t1=1/12:1/12:48;
t1=t1 + 1961;
plot(t1,c1);
title('Serie Original - InsolaÃ„o')
grid on

%NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
C_k1 = (1/N1)*fft(c1,N1);%/N;% FFT normalizada por N;
C1 = (1/N1)*fft(c1);
C_k1 = fftshift(C_k1);
C1 = fftshift(C1);
figure(2)
k1 = Fs1*(-N1/2:1:N1/2-1);

%for i=1:length(k)
%k(i) = 1/k(i);%linspace(0,1,N/2+1);
%end
%Filtro
%filtro=ones(N,1);

%8600 %576
%for i=1:1:25
% filtro(i)=0;
% filtro(N-i)=0;
%end
%grafico do Filtro na frequencia
%figure(3)
%plot(tt,filtro);
%
%R_k=C_k.*filtro;
semilogy(k1,abs(C_k1))
title('FFT - InsolaÃ„o')
grid on
figure(3)
k1 = numero_de_amostras_ano*Fs1*(-N1/2:1:N1/2-1);

```

```

semilogy(k1,abs(C1))
title('FFT ajustada (eixo - freq) - InsolaÃ„o')
grid on

figure()
faseC1=zeros(length(C1));
for i=1:length(C1)
if real(C1(i))>0 && imag(C1(i))>0
    faseC1(i)=atan( imag(C1(i)) / real(C1(i)) )*180/pi;
elseif real(C1(i))<0 && imag(C1(i))>0
    faseC1(i)=180-atan( abs(imag(C1(i)) / real(C1(i))) )*180/pi;
elseif real(C1(i))<0 && imag(C1(i))<0
    faseC1(i)=180+atan( abs(imag(C1(i)) / real(C1(i))) )*180/pi;
elseif real(C1(i))>0 && imag(C1(i))<0
    faseC1(i)=360-atan( abs(imag(C1(i)) / real(C1(i))) )*180/pi;
elseif real(C1(i))==0 && imag(C1(i))>0
    faseC1(i)=90;
elseif real(C1(i))==0 && imag(C1(i))<0
    faseC1(i)=270;
elseif real(C1(i))>0 && imag(C1(i))==0
    faseC1(i)=0;
elseif real(C1(i))<0 && imag(C1(i))==0
    faseC1(i)=180;
elseif real(C1(i))==0 && imag(C1(i))==0
    faseC1(i)=0;
end
end
plot(k1,faseC1)

% ReconstruÃ„o:
%
abs(C1(i))*cos((faseC1(i)/180)*pi)+j*abs(C1(i))*sin((faseC1(i)/180)*pi)
title('FASE - InsolaÃ„o')
grid on

figure()
bargraph1=zeros(1,288);
bargraph2=zeros(1,288);
bargraph1=k1(289:336);
for i=1:length(bargraph1)
    bargraph1(i)=1/bargraph1(i);
end
bargraph2=abs(C1(289:336))';
stem(bargraph1(4:48),bargraph2(4:48),'b+');
title('Periodos - InsolaÃ„o')

N2=length(c2);
numero_de_amstras_ano=12;
Fs2=1/N2;
tt2=0:Fs2:(1 -Fs2);

%plota a serie original no tempo - Serie original RadiaÃ„o
figure()
%t=tt+1961; %ano inicial 1961
t2=1/12:1/12:48;
t2=t2 + 1961;
plot(t2,c2,'k');

```

```

title('Serie Original - Radiaã,o')
grid on
%NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
C_k2 = (1/N2)*fft(c2,N2);%/N;% FFT normalizada por N;
C2 = (1/N2)*fft(c2);
C_k2 = fftshift(C_k2);
C2 = fftshift(C2);
figure()
k2 = Fs2*(-N2/2:1:N2/2-1);
%for i=1:length(k)
%k(i) = 1/k(i);%linspace(0,1,N/2+1);
%end
%Filtro
%filtro=ones(N,1);

%8600 %576
%for i=1:1:25
%    filtro(i)=0;
%    filtro(N-i)=0;
%end
%grafico do Filtro na frecuencia
%figure(3)
%plot(tt,filtro);
%
%R_k=C_k.*filtro;
semilogy(k2,abs(C_k2),'k')
grid on
title('FFT - Radiaã,o')

figure()
k2 = numero_de_amostras_ano*Fs2*(-N2/2:1:N2/2-1);
semilogy(k2,abs(C2),'k')
grid on
title('FFT - Radiaã,o - Ajustada')

figure()
faseC2=zeros(length(C2));
for i=1:length(C2)
if real(C2(i))>0 && imag(C2(i))>0
    faseC2(i)=atan( imag(C2(i)) / real(C2(i)) )*180/pi;
elseif real(C2(i))<0 && imag(C2(i))>0
    faseC2(i)=180-atan( abs(imag(C2(i)) / real(C2(i))) )*180/pi;
elseif real(C2(i))<0 && imag(C2(i))<0
    faseC2(i)=180+atan( abs(imag(C2(i)) / real(C2(i))) )*180/pi;
elseif real(C2(i))>0 && imag(C2(i))<0
    faseC2(i)=360-atan( abs(imag(C2(i)) / real(C2(i))) )*180/pi;
elseif real(C2(i))==0 && imag(C2(i))>0
    faseC2(i)=90;
elseif real(C2(i))==0 && imag(C2(i))<0
    faseC2(i)=270;
elseif real(C2(i))>0 && imag(C2(i))==0
    faseC2(i)=0;
elseif real(C2(i))<0 && imag(C2(i))==0
    faseC2(i)=180;
elseif real(C2(i))==0 && imag(C2(i))==0
    faseC2(i)=0;
end
end

```

```

plot(k2,faseC2,'k')

% ReconstruÃ„o:
%
abs(C1(i))*cos((faseC1(i)/180)*pi)+j*abs(C1(i))*sin((faseC1(i)/180)*pi)
title('FASE - RadiaÃ„o')
grid on

figure()
bargraph12=zeros(1,288);
bargraph22=zeros(1,288);
bargraph12=k2(289:336);
for i=1:length(bargraph12)
    bargraph12(i)=1/bargraph12(i);
end
bargraph22=abs(C2(289:336))';
stem(bargraph12(4:48),bargraph22(4:48),'k+');
title('Periodos - RadiaÃ„o')
grid on

figure()
bargraph12=zeros(1,288);
bargraph22=zeros(1,288);
bargraph12=k2(289:336);
for i=1:length(bargraph12)
    bargraph12(i)=1/bargraph12(i);
end
bargraph22=abs(C2(289:336))'*(1/sum(C2(289:336)));
stem(bargraph12(4:48),bargraph22(4:48),'k+');

hold on
bargraph11=zeros(1,288);
bargraph21=zeros(1,288);
bargraph11=k1(289:336);
for i=1:length(bargraph11)
    bargraph11(i)=1/bargraph11(i);
end
bargraph21=abs(C1(289:336))'*(1/sum(C1(289:336)));

stem(bargraph11(4:48),bargraph21(4:48),'r+');

title('Periodos - InsolaÃ„o (em vermelho) - RadiaÃ„o')
grid on

```

Apêndice BA – Tabela com as fases de todas as componentes da série

Fórmula para a reconstrução:

$$c_n(t) = Amplitude_n * \cos(Freq_n * t + fase_n) + j * Amplitude_n * \cos(Freq_n * t + fase_n)$$

Amplitude	fase(graus)	Freq(1/ano)	Periodo
6.2789	0	0	0
0.1124	271.9351	0.0208	48.07692308
0.0365	348.9674	0.0417	23.98081535
0.0624	53.6093	0.0625	16
0.0628	185.7682	0.0833	12.00480192
0.0737	36.6274	0.1042	9.596928983
0.042	197.5897	0.125	8
0.0358	324.2945	0.1458	6.858710562
0.0359	181.3734	0.1667	5.99880024
0.0266	148.6445	0.1875	5.333333333
0.0586	314.6134	0.2083	4.800768123
0.0311	3.9807	0.2292	4.363001745
0.0289	300.1421	0.25	4
0.0587	120.9293	0.2708	3.692762186
0.06	283.5242	0.2917	3.428179637
0.0501	221.661	0.3125	3.2
0.0098	253.1561	0.3333	3.00030003
0.0207	140.9109	0.3542	2.823263693
0.0244	293.1007	0.375	2.666666667
0.0311	275.6922	0.3958	2.52652855
0.0604	120.9394	0.4167	2.399808015
0.0589	75.0125	0.4375	2.285714286
0.0538	107.7373	0.4583	2.181976871
0.0182	191.0613	0.4792	2.086811352
0.0434	86.4909	0.5	2
0.0574	57.3206	0.5208	1.920122888
0.0076	184.5575	0.5417	1.846040244
0.0402	356.0541	0.5625	1.777777778
0.0427	284.0534	0.5833	1.714383679
0.0425	217.7583	0.6042	1.655081099
0.0349	128.9849	0.625	1.6
0.0047	151.5292	0.6458	1.548467018
0.0366	283.917	0.6667	1.499925004
0.0154	125.8715	0.6875	1.454545455
0.0104	41.8271	0.7083	1.411831145
0.0053	161.0015	0.7292	1.37136588
0.0183	219.93	0.75	1.333333333

Amplitude	fase(graus)	Freq(1/ano)	Periodo
0.0067	228.6897	0.7708	1.297353399
0.0042	75.1629	0.7917	1.263104711
0.0304	87.6904	0.8125	1.230769231
0.0301	333.1658	0.8333	1.200048002
0.0197	206.2471	0.8542	1.170686022
0.0341	29.7972	0.875	1.142857143
0.0368	202.2179	0.8958	1.116320607
0.0161	8.5003	0.9167	1.090869423
0.0596	338.8035	0.9375	1.066666667
0.0537	326.575	0.9583	1.043514557
0.013	26.0845	0.9792	1.02124183
0.7125	9.8397	1	1
0.0641	244.4202	1.0208	0.979623824
0.0393	352.8181	1.0417	0.959969281
0.041	189.5305	1.0625	0.941176471
0.0313	57.6875	1.0833	0.923105326
0.0099	59.3621	1.1042	0.905633037
0.0175	166.7023	1.125	0.888888889
0.019	237.3206	1.1458	0.872752662
0.0245	174.2597	1.1667	0.857118368
0.0389	290.8836	1.1875	0.842105263
0.0259	93.4933	1.2083	0.827609037
0.0306	53.6187	1.2292	0.81353726
0.0526	81.328	1.25	0.8
0.0261	2.6126	1.2708	0.786905886
0.036	324.0168	1.2917	0.77417357
0.0278	124.5143	1.3125	0.761904762
0.053	296.67	1.3333	0.75001875
0.0251	221.0086	1.3542	0.738443361
0.0326	203.9237	1.375	0.727272727
0.0119	67.7508	1.3958	0.716435019
0.0158	180.5469	1.4167	0.705865744
0.0272	142.7359	1.4375	0.695652174
0.0026	142.7995	1.4583	0.68572996
0.0264	209.2157	1.4792	0.676041103
0.0319	193.5059	1.5	0.666666667
0.023	83.7366	1.5208	0.657548659
0.0388	132.5878	1.5417	0.648634624
0.0228	82.38	1.5625	0.64
0.0139	225.2299	1.5833	0.631592244
0.0309	107.4007	1.6042	0.62336367
0.0206	110.8871	1.625	0.615384615
0.0061	275.2186	1.6458	0.607607243
0.0288	21.7	1.6667	0.599988

Amplitude	fase(graus)	Freq(1/ano)	Periodo
0.0324	351.7176	1.6875	0.592592593
0.0267	119.7119	1.7083	0.585377276
0.0545	12.0417	1.7292	0.578302105
0.0121	265.3341	1.75	0.571428571
0.0224	263.8081	1.7708	0.564716512
0.018	337.4867	1.7917	0.558129151
0.0645	237.4947	1.8125	0.551724138
0.0246	81.1154	1.8333	0.545464463
0.0106	267.6056	1.8542	0.539316147
0.0179	64.5131	1.875	0.533333333
0.0202	344.4572	1.8958	0.527481802
0.0639	147.5254	1.9167	0.521730057
0.0289	132.9159	1.9375	0.516129032
0.0104	197.0901	1.9583	0.51064699
0.008	268.4811	1.9792	0.505254648
0.0747	80.1709	2	0.5
0.051	38.608	2.0208	0.494853523
0.0631	355.9107	2.0417	0.489787922
0.0317	54.0043	2.0625	0.484848485
0.0179	67.6251	2.0833	0.48000768
0.0135	339.3251	2.1042	0.475239996
0.0126	335.5566	2.125	0.470588235
0.0208	163.0506	2.1458	0.466026657
0.0326	265.4704	2.1667	0.461531361
0.0307	156.2809	2.1875	0.457142857
0.0324	1.1724	2.2083	0.452837024
0.0213	283.3966	2.2292	0.448591423
0.0256	13.5193	2.25	0.444444444
0.0314	15.6523	2.2708	0.440373437
0.0356	43.6331	2.2917	0.436357289
0.0121	132.7366	2.3125	0.432432432
0.0211	337.0742	2.3333	0.428577551
0.0162	263.7855	2.3542	0.424772747
0.0147	215.5273	2.375	0.421052632
0.0024	200.1562	2.3958	0.417397112
0.023	223.7829	2.4167	0.413787396
0.0278	313.7968	2.4375	0.41025641
0.0285	262.7739	2.4583	0.406785177
0.0058	162.6058	2.4792	0.403355921
0.021	347.9669	2.5	0.4
0.0257	247.3112	2.5208	0.39669946
0.0155	48.2458	2.5417	0.393437463
0.007	66.965	2.5625	0.390243902
0.0183	18.0644	2.5833	0.387101769

Amplitude	fase(graus)	Freq(1/ano)	Periodo
0.0261	167.3062	2.6042	0.383995085
0.0332	5.6756	2.625	0.380952381
0.0266	49.749	2.6458	0.377957518
0.0177	45.8804	2.6667	0.374995313
0.0201	109.861	2.6875	0.372093023
0.0171	40.8688	2.7083	0.369235314
0.0242	326.7209	2.7292	0.366407739
0.0438	144.4005	2.75	0.363636364
0.0285	283.2643	2.7708	0.360906597
0.0353	249.1538	2.7917	0.358204678
0.0098	198.735	2.8125	0.355555556
0.0606	1.3095	2.8333	0.352945329
0.01	148.5274	2.8542	0.350360872
0.0327	60.7177	2.875	0.347826087
0.0337	106.2918	2.8958	0.345327716
0.0281	358.4997	2.9167	0.342853225
0.0265	93.2573	2.9375	0.340425532
0.0327	268.2363	2.9583	0.338031978
0.0343	100.3957	2.9792	0.33566058
0.0839	119.2155	3	0.333333333
0.0112	38.9035	3.0208	0.331038136
0.016	257.2506	3.0417	0.32876352
0.0273	267.8455	3.0625	0.326530612
0.0784	160.2421	3.0833	0.324327831
0.0229	24.7821	3.1042	0.322144192
0.0172	21.1545	3.125	0.32
0.0262	101.3477	3.1458	0.317884163
0.0202	39.9873	3.1667	0.31578615
0.0194	32.4655	3.1875	0.31372549
0.0147	356.4604	3.2083	0.31169155
0.0113	258.8235	3.2292	0.309674223
0.0097	219.1712	3.25	0.307692308
0.0072	255.4773	3.2708	0.3057356
0.0265	227.9588	3.2917	0.303794392
0.0265	304.8299	3.3125	0.301886792
0.0345	70.2681	3.3333	0.300003
0.0024	101.7302	3.3542	0.298133683
0.023	181.3735	3.375	0.296296296
0.021	218.7206	3.3958	0.294481418
0.0171	354.0229	3.4167	0.292680071
0.0254	223.9978	3.4375	0.290909091
0.019	337.1737	3.4583	0.289159414
0.0111	264.2253	3.4792	0.287422396
0.019	135.8445	3.5	0.285714286

Amplitude	fase(graus)	Freq(1/ano)	Periodo
0.0576	47.5236	3.5208	0.284026358
0.0174	96.4019	3.5417	0.282350284
0.0322	37.8612	3.5625	0.280701754
0.0073	354.6214	3.5833	0.279072363
0.0118	148.6575	3.6042	0.277454081
0.0128	23.4786	3.625	0.275862069
0.0182	274.334	3.6458	0.274288222
0.0174	40.0974	3.6667	0.272724793
0.0136	277.4985	3.6875	0.271186441
0.0479	334.9783	3.7083	0.269665345
0.025	193.6263	3.7292	0.268154028
0.0127	259.87	3.75	0.266666667
0.0195	13.8478	3.7708	0.265195714
0.0439	302.5377	3.7917	0.263733945
0.0229	251.4842	3.8125	0.262295082
0.0134	161.3212	3.8333	0.260871834
0.0034	248.9894	3.8542	0.259457216
0.0253	162.0105	3.875	0.258064516
0.0288	242.6572	3.8958	0.256686688
0.0042	115.2212	3.9167	0.255316976
0.0421	207.6649	3.9375	0.253968254
0.0147	355.631	3.9583	0.252633706
0.007	235.6356	3.9792	0.251306795
0.0519	287.9747	4	0.25
0.0555	267.7868	4.0208	0.248706725
0.0168	156.8704	4.0417	0.24742064
0.0109	320.6814	4.0625	0.246153846
0.0382	143.759	4.0833	0.244899958
0.0383	229.7767	4.1042	0.243652843
0.0156	154.7424	4.125	0.242424242
0.0227	195.5683	4.1458	0.24120797
0.0185	184.9963	4.1667	0.23999808
0.0138	31.7411	4.1875	0.23880597
0.0168	307.2092	4.2083	0.237625645
0.0186	20.3602	4.2292	0.236451338
0.0237	270.9565	4.25	0.235294118
0.047	84.5447	4.2708	0.234148169
0.0235	231.6865	4.2917	0.233007899
0.0348	161.1137	4.3125	0.231884058
0.0191	322.145	4.3333	0.230771006
0.0132	178.3168	4.3542	0.229663314
0.0323	285.3025	4.375	0.228571429
0.0391	233.4688	4.3958	0.227489877
0.028	110.6864	4.4167	0.226413386

Amplitude	fase(graus)	Freq(1/ano)	Periodo
0.012	243.7468	4.4375	0.225352113
0.0225	5.691	4.4583	0.224300742
0.031	218.757	4.4792	0.223254153
0.0226	109.616	4.5	0.222222222
0.0343	304.1421	4.5208	0.221199788
0.0307	183.217	4.5417	0.22018187
0.0476	211.301	4.5625	0.219178082
0.0254	136.3226	4.5833	0.218183405
0.0416	115.3026	4.6042	0.217192998
0.0064	64.924	4.625	0.216216216
0.0382	206.6453	4.6458	0.215248181
0.0219	35.2452	4.6667	0.214284184
0.0217	38.3766	4.6875	0.213333333
0.0205	232.8962	4.7083	0.212390884
0.0091	76.9493	4.7292	0.211452254
0.0672	121.4498	4.75	0.210526316
0.052	22.4405	4.7708	0.209608451
0.0244	295.6677	4.7917	0.2086942
0.0258	107.905	4.8125	0.207792208
0.0063	59.4946	4.8333	0.206897979
0.0099	262.9746	4.8542	0.206007169
0.022	251.834	4.875	0.205128205
0.0348	163.1926	4.8958	0.20425671
0.011	155.1731	4.9167	0.203388452
0.0058	113.7656	4.9375	0.202531646
0.0324	127.7285	4.9583	0.201682028
0.0305	308.1467	4.9792	0.200835476
0.0359	116.4919	5	0.2
0.0154	121.5138	5.0208	0.199171447
0.0479	54.1873	5.0417	0.198345796
0.0541	284.8082	5.0625	0.197530864
0.0123	153.7998	5.0833	0.196722601
0.0321	289.7284	5.1042	0.195917088
0.0376	233.7326	5.125	0.195121951
0.0273	27.0154	5.1458	0.194333243
0.0347	298.8129	5.1667	0.193547138
0.0206	29.9352	5.1875	0.192771084
0.0256	15.8417	5.2083	0.192001229
0.0148	78.8958	5.2292	0.191233841
0.0215	294.4407	5.25	0.19047619
0.027	139.1866	5.2708	0.18972452
0.024	102.1189	5.2917	0.188975188
0.0229	291.4359	5.3125	0.188235294
0.0084	56.9478	5.3333	0.187501172

Amplitude	fase(graus)	Freq(1/ano)	Periodo
0.013	113.3621	5.3542	0.186769265
0.014	43.0326	5.375	0.186046512
0.0346	327.5461	5.3958	0.18532933
0.0193	224.984	5.4167	0.184614249
0.0266	121.2179	5.4375	0.183908046
0.0064	174.8024	5.4583	0.183207226
0.021	69.2371	5.4792	0.182508395
0.0167	25.3069	5.5	0.181818182
0.0155	311.2543	5.5208	0.181133169
0.0376	176.0478	5.5417	0.180450042
0.0561	151.6216	5.5625	0.179775281
0.0103	117.3953	5.5833	0.179105547
0.0117	129.0337	5.6042	0.1784376
0.0099	227.9193	5.625	0.177777778
0.0413	301.5731	5.6458	0.177122817
0.0423	336.5131	5.6667	0.17646955
0.0024	76.0888	5.6875	0.175824176
0.0269	33.0316	5.7083	0.175183505
0.0123	249.0069	5.7292	0.174544439
0.0253	63.9331	5.75	0.173913043
0.0292	288.0803	5.7708	0.173286199
0.0205	295.5989	5.7917	0.172660877
0.0245	269.8527	5.8125	0.172043011
0.0363	5.6418	5.8333	0.171429551
0.0611	256.4749	5.8542	0.170817533
0.0269	174.5578	5.875	0.170212766
0.023	343.0718	5.8958	0.169612266
0.0137	244.4312	5.9167	0.169013132
0.0266	138.3593	5.9375	0.168421053
0.0231	274.6975	5.9583	0.167833107
0.0442	252.3317	5.9792	0.167246454

Apêndice BB – A análise com transformadas

Para as análises de séries temporais no domínio do tempo e no domínio da frequência têm-se dois enfoques alternativos, mas complementares. A necessidade de conhecer conceitos de variáveis complexas e conhecer a técnica analítica das Transformadas de Fourier são alguns entraves que dificultam a utilização da análise no domínio da frequência, (Aguirre, 1995).

A motivação física para o trabalho de Fourier foi o estudo do fenômeno da propagação e difusão do calor. Ele mostrou que séries de senoides harmonicamente relacionadas podem representar a distribuição da temperatura através de um corpo. Também propôs que uma função periódica poderia ser representada por estas séries.

No caso a série que está sendo representada é perfeitamente periódica, sua expansão é chamada Série de Fourier, e os respectivos coeficientes são os Coeficientes de Fourier ou Constantes de Fourier. Qualquer função periódica pode ser representada exatamente por uma série infinita de termos com senoides, isto é, sua série de Fourier. Se a soma possui um número finito de termos, a representação é aproximada e conhecida como análise harmônica. No caso de uma função ser aperiódica, pode ser representada por uma integral envolvendo senoides. Assim, essa expansão é chamada de Transformada de Fourier ou Integral de Fourier. Também existem Transformadas de Fourier de tempo contínuo e de tempo discreto. As distinções entre estas funções de tempo permitem fazer o mesmo tipo de diferenciação nas transformadas.

Cooley e Tuckey, (1965) desenvolveram um algoritmo para determinar de forma eficiente as Transformadas de Fourier, chamado *Fast Fourier Transform* (FFT), com um enorme ganho computacional possibilitando obter a Transformada de Fourier de uma série com N observações.

A Transformada de Fourier identifica as senoides de diferentes frequências com suas respectivas amplitudes que, uma vez somadas, representam uma curva periódica qualquer. Portanto, o principal objetivo da Transformada de Fourier de uma função cíclica é a decomposição ou separação dessas funções numa soma de senoides de diferentes frequências e, possivelmente, diferentes amplitudes. Se essas senoides, quando somadas, reproduzem a função cíclica original, tem-se a Transformada de Fourier desta função. A representação gráfica da Transformada de

Fourier da função cíclica é um diagrama que representa a amplitude e a frequência de cada uma das senoides identificadas.

A relação matemática que permite passar do domínio do tempo ao domínio da frequência é chamada de Equação de Análise ou Integral de Fourier, (Aguirre, 1995) e escreve-se:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

onde: $i = \sqrt{-1}$

A relação que permite recalculer a função cíclica no domínio do tempo, a partir da função no domínio da frequência, denomina-se Equação de Síntese ou Transformada Inversa é a seguinte:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \quad (2)$$

A expressão (2) mostra que, para cada valor da variável “ f ”, o correspondente valor da função $X(f)$ é calculado fazendo a soma ponderada dos diferentes pontos da função cíclica original, $x(t)$, onde as ponderações são exponenciais complexas que variam com “ t ” e com “ f ”. No caso da Transformada de Fourier em tempo discreto, a integral é substituída por um somatório

Caso a integral da equação (2) exista para cada valor do parâmetro “ f ”, então a mesma define $X(f)$, ou seja, a Transformada de Fourier de $x(t)$. Nesta transformada, $x(t)$ é chamada função da variável tempo e $X(f)$ função da variável frequência. Assim, $X(f)$ é a representação de $x(t)$ no domínio da frequência. Esta representação contém a mesma informação que aquela contida na função original diferenciando apenas na forma como é apresentada essa informação. A análise de Fourier permite examinar uma função de outra forma, ou seja, no domínio da frequência (Aguirre, 1995).

De forma geral, a Transformada de Fourier é uma quantidade complexa isto é:

$$X(f) = R(f) + iF(f) = |X(f)| e^{i\theta(f)}$$

onde:

$R(f)$ é a parte real da Transformada de Fourier, $X(f)$;

$F(f)$ é a parte imaginária da Transformada de Fourier, $X(f)$;

$|X(f)|$ é amplitude de $X(f)$ ou o espectro de Fourier de $x(t)$, e é dado por $\sqrt{R^2(f) + F^2(f)}$;

$\theta(f)$ é o ângulo de fase da transformada de Fourier, dado por $\text{arc tg} \left[\frac{F(f)}{R(f)} \right]$.

Para ilustrar os vários termos definidos, considere-se a seguinte função da variável "t":

$$x(t) = \begin{cases} \beta e^{-\alpha t}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

Substituindo $x(t)$ na integral de Fourier (1), e integrando, tem-se a Transformada:

$$X(f) = \frac{\alpha\beta}{\alpha^2 + (2\pi f)^2} - i \frac{2\pi f\beta}{\alpha^2 + (2\pi f)^2}$$

Para cada valor de "f" tem-se um número complexo diferente.

Pode-se escrever a mesma transformada de outra maneira:

$$X(f) = \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + (2\pi f)^2}} e^{i(\text{arc tg} \left[\frac{-2\pi f}{\alpha} \right])}$$

onde:

$$R\{X(f)\} = \frac{\alpha\beta}{\alpha^2 + (2\pi f)^2}$$

é a parte real

$$F\{X(f)\} = \frac{-2\pi f\beta}{\alpha^2 + (2\pi f)^2}$$

é a parte imaginária;

$$|X(f)| = \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + (2\pi f)^2}}$$

é o módulo ou amplitude e:

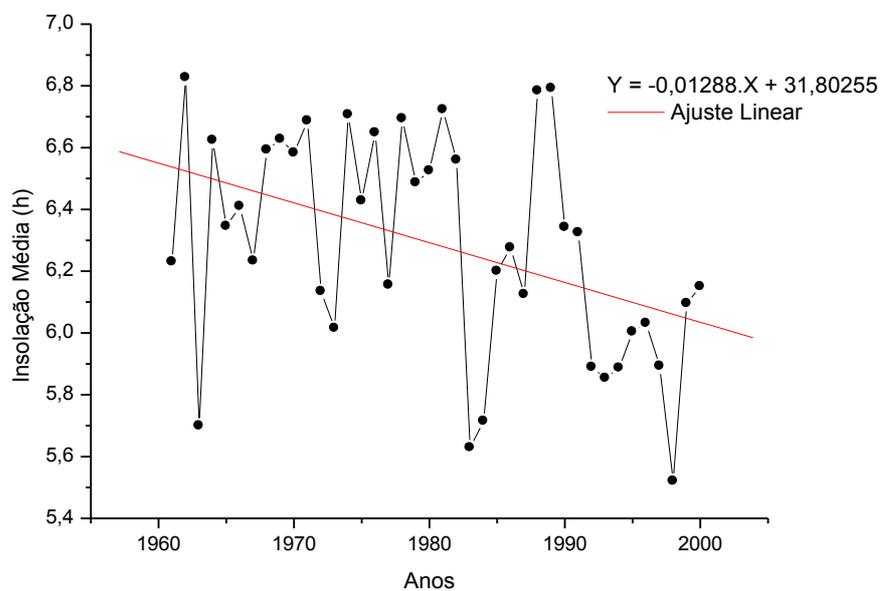
$$\theta(f) = \text{arc tg} \left[\frac{-2\pi f}{\alpha} \right]$$

é o ângulo de fase.

Em uma série totalmente aleatória (ruído branco) o espectro de potência é teoricamente constante, isto é, não mostra estrutura espectral. Desta forma, ao analisarmos o espectro de uma série qualquer o que se deseja é detectar e interpretar os picos que possam existir, e as frequências às quais estão associados.

Apêndice C – Tendência linear da insolação em diferentes períodos

Período (1961-2000)



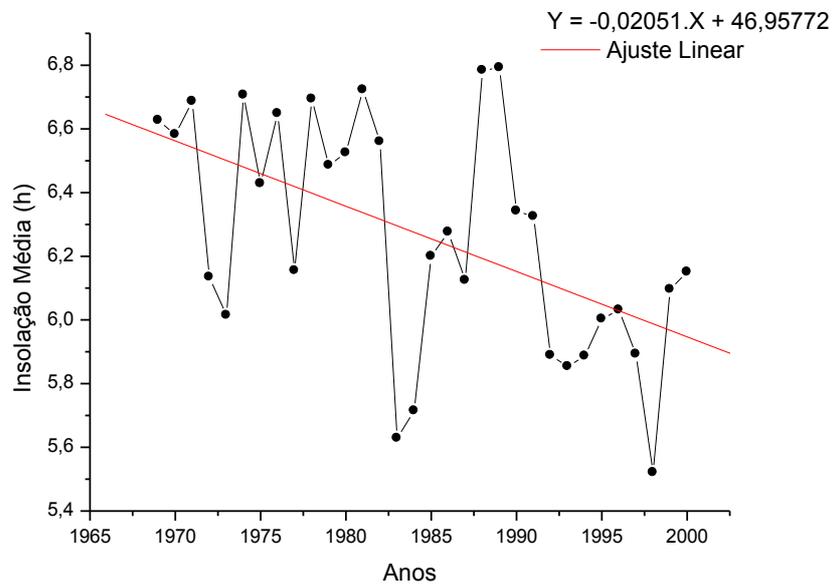
Linear Regression for Data1_B:

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error		
A	31,80255	8,87331		
B	-0,01288	0,00448		
R	SD	N	P	
-0,42276	0,32709	40	0,00657	

Apêndice CA – Tendência linear da insolação da série histórica média anual do Estado do Rio Grande do Sul, período (1961 -2000)

Período (1969-2000)



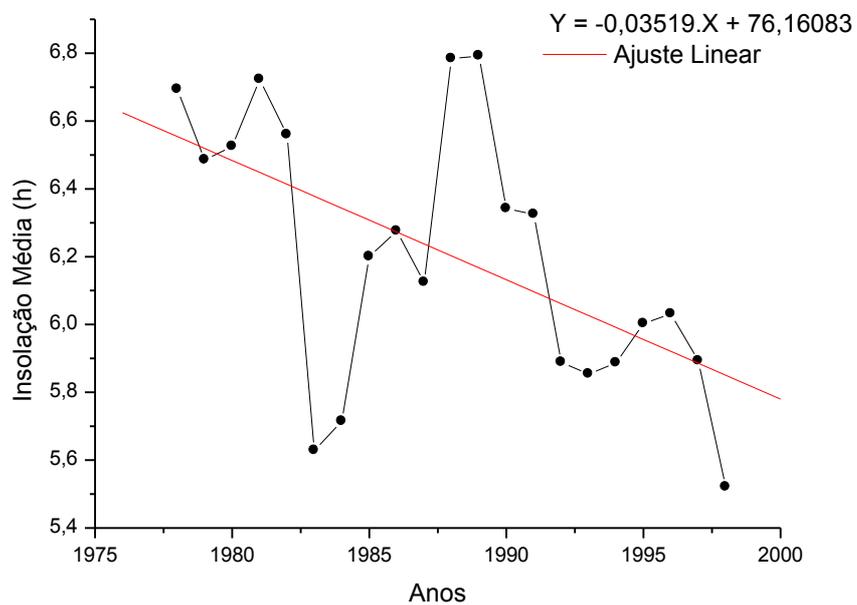
Linear Regression for Data1_B:

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
A	46,95772	11,85216	
B	-0,02051	0,00597	
R	P	SD	N
-0,53113	0,31193	32	0,00176

Apêndice CB – Tendência linear da insolação da série histórica média anual do Estado do Rio Grande do Sul, período (1969 -2000)

Período (1978-1998)



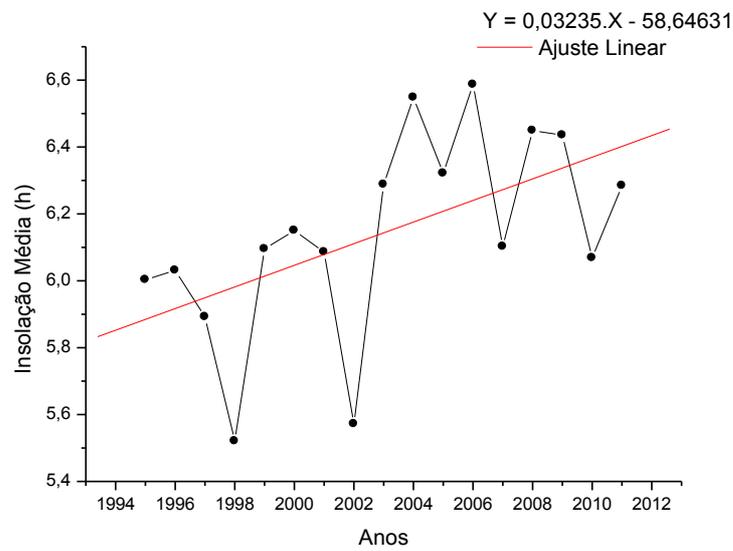
Linear Regression for Data1_B:

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error	
A	76,16083	23,92638	
B	-0,03519	0,01204	
R	SD	N	P
-0,55707	0,33397	21	0,00871

Apêndice CC – Tendência linear da insolação da série histórica média anual do Estado do Rio Grande do Sul, período (1978 -1998)

Período (1995-2011)



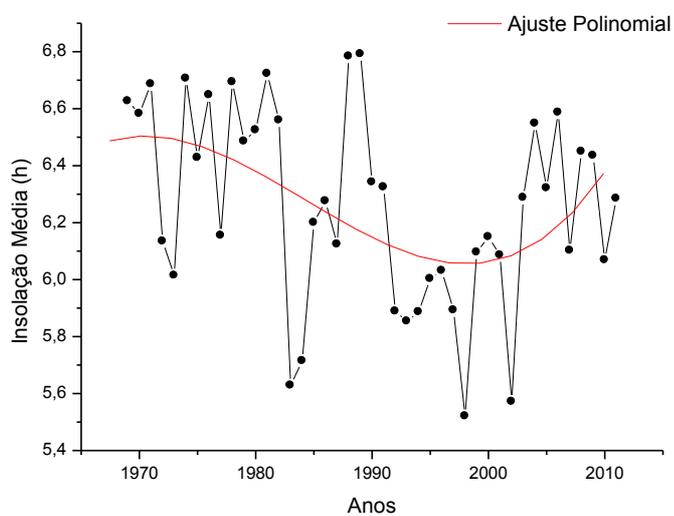
Linear Regression for Data1_B:

$$Y = A + B * X$$

Parameter	Value	Error
A	-58,64631	25,70508
B	0,03235	0,01283
R	0,54545	
SD	0,25922	
N	17	
P	0,02353	

Apêndice CD – Tendência linear da insolação da série histórica média anual do Estado do Rio Grande do Sul, período (1995 -2011)

Período (1975-2011)



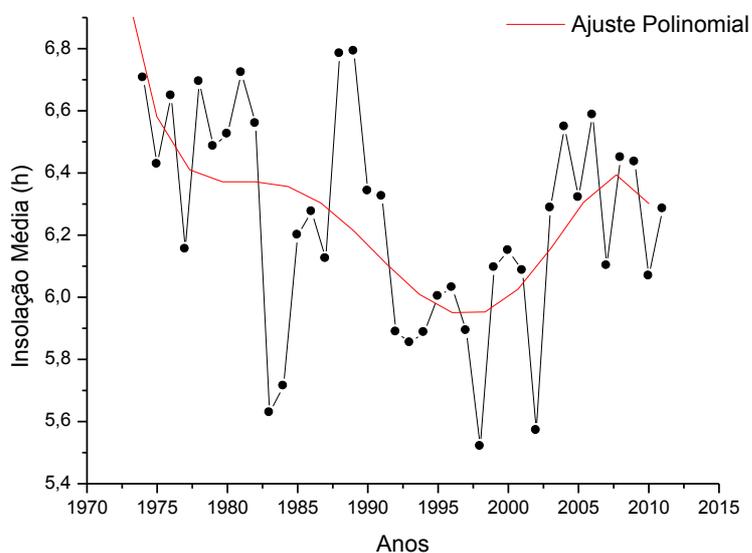
$$Y = A + B1*X + B2*X^2 + B3*X^3$$

Parameter	Value	Error
A	-333734,7784	251036,60698
B1	504,62479	378,46165
B2	-0,25432	0,19019
B3	4,27228E-5	3,18568E-5

R-Square(COD)	SD	N	P
0,22085	0,31269	43	0,01985

Apêndice CE – Ajuste polinomial da série histórica média anual do Estado do Rio Grande do Sul, período (1975 -2011)

Período (1975-2011)



Polynomial Regression for DATA1_B:

$$Y = A + B1*X + B2*X^2 + B3*X^3 + B4*X^4 + B5*X^5$$

Parameter	Value	Error
A	2,84273	1,68806E10
B1	-7,13643E	4,23618E7
B2	71660,8891	42522,41357
B3	-35,97895	21,34162
B4	0,0090	0,00536
B5	-9,06916E-7	5,37569E-7

R-Square(COD)	SD	N	P
0,3068	0,30819	38	0,03153

Apêndice CF – Ajuste polinomial da série histórica média anual do Estado do Rio Grande do Sul, período (1975 -2011)

ANEXOS

Anexo A – Anomalia de TSM. Episódios quentes (El Niño – em vermelho), frios (La Niña – em azul) do fenômeno ENOS. Episódios neutros (em preto) por trimestres entre 1950 a 2014.

Anos	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1950	-1.4	-1.3	-1.2	-1.2	-1.1	-0.9	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7
1951	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.0	0.4	0.6	1.0	1.1	1.2	1.1	0.9
1952	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1	-0.1	0.0	0.2	0.2	0.2	0.3
1953	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
1954	0.7	0.5	0.1	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7
1955	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-1.1	-1.4	-1.7	-1.6
1956	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
1957	-0.3	0.1	0.4	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.5	1.8
1958	1.8	1.6	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6
1959	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	0.0	0.1	0.0
1960	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
1961	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1962	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5
1963	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.3	0.5	0.8	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3
1964	1.1	0.6	0.1	-0.4	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
1965	-0.6	-0.3	0.0	0.2	0.5	0.8	1.2	1.5	1.7	1.9	1.9	1.7
1966	1.4	1.1	0.9	0.6	0.4	0.3	0.3	0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.2
1967	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.2	0.1	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4
1968	-0.6	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.1	0.4	0.5	0.5	0.6	0.8	1.0
1969	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.6	0.5	0.5	0.8	0.9	0.9	0.8
1970	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2	-0.5	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-1.0
1971	-1.2	-1.3	-1.1	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.9	-0.8
1972	-0.6	-0.3	0.1	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6	1.9	2.1	2.1
1973	1.8	1.2	0.6	-0.1	-0.5	-0.8	-1.0	-1.2	-1.3	-1.6	-1.9	-2.0
1974	-1.9	-1.6	-1.2	-1.0	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8	-0.7
1975	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-1.0	-1.1	-1.2	-1.4	-1.5	-1.6	-1.7
1976	-1.5	-1.1	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8
1977	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	0.8
1978	0.7	0.5	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	-0.1
1979	-0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
1980	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1
1981	-0.4	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1
1982	-0.1	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	1.0	1.5	1.9	2.1	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.2	0.9	0.6	0.2	-0.2	-0.5	-0.8	-0.9	-0.8
1984	-0.5	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.3	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1.0	-0.9	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4
1986	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.3	1.2	1.1	1.0	1.2	1.4	1.6	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.2	-0.8	-1.2	-1.3	-1.2	-1.3	-1.6	-1.9	-1.9
1989	-1.7	-1.5	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	1.2	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.7	0.3	0.0	-0.2	-0.3	-0.2	0.0
1993	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	1.0	1.2
1995	1.0	0.8	0.6	0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.2	0.7	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.4	2.3

1998	2.2	1.8	1.4	0.9	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5
1999	-1.5	-1.3	-1.0	-0.9	-0.9	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.5	-1.2	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
2002	-0.2	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3
2003	1.1	0.8	0.4	0.0	-0.2	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
2004	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	-0.2	-0.5	-0.8
2006	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.0
2007	0.7	0.3	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.8	-1.1	-1.2	-1.4
2008	-1.5	-1.5	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.5	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6
2010	1.6	1.3	1.0	0.6	0.1	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.6	-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1.0	-1.0
2012	-0.9	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	0.0	0.1	0.4	0.5	0.6	0.2	-0.3
2013	-0.6	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.4
2014	-0.6	-0.6	-0.5	-0.1	0.2							

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. Climate Prediction Center.

Disponível em: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Acesso em: jul. 2014.