

DARLISSON BENTES DOS SANTOS

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DAS FONTES SOLAR E EÓLICA
DISPONÍVEL EM CASCAVEL, PARANÁ

CASCAVEL

PARANÁ – BRASIL

FEVEREIRO – 2014

DARLISSON BENTES DOS SANTOS

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ENERGÉTICO DAS FONTES SOLAR E EÓLICA
DISPONÍVEL EM CASCAVEL, PARANÁ

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Lessa Azevedo

CASCAVEL

PARANÁ – BRASIL

FEVEREIRO – 2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

S234a Santos, Darlison Bentes dos
Análise do comportamento energético das fontes solar e eólica disponível em Cascavel, Paraná. / Darlison Bentes dos Santos — Cascavel, PR: UNIOESTE, 2014.
72 p.

Orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Lessa Azevedo
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
Bibliografia.

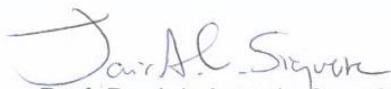
1. Disponibilidade energética. 2. Fontes renováveis. 3. Coeficientes de correlação. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 631.371

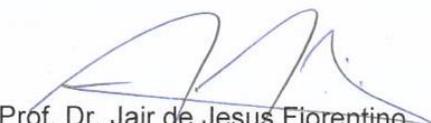
DARLISSON BENTES DOS SANTOS

**“Análise do comportamento energético das fontes solar e eólica
disponível em Cascavel, Paraná”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:


Orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Jair de Jesus Fiorentino
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/Campo Grande

Cascavel, 20 de fevereiro de 2014.

"Escolhes um trabalho de que gostes, e não terás que trabalhar nem um dia na tua vida". (Confúcio)

À minha família, em nome dos meus pais Dalci Coelho e Rosete Bentes pelo início da vida e pela aventura de vivê-la com dignidade;

À Rafaela F. Nicolau, pela fiel e incondicional cumplicidade, inerentes a minha formação pessoal e profissional.

Dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura – PPGEA, promovido pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel, pela oportunidade ímpar;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio à pesquisa;

Ao meu orientador Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira pela confiança incentivadora e pela clássica epígrafe: *“Fica tranquilo, vai dá tudo certo velho!”*, da mesma forma que meu coorientador Prof. Dr. Ricardo Lessa Azevedo, pela atenção demonstrada e meu “coorientador agregado” Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira, pelo apoio técnico indispensável;

Aos demais Profs. Doutores, integrantes do corpo docente do PPGEA, pelo conhecimento interdisciplinar indiscutivelmente qualitativo;

Aos amigos da UNIOESTE e PPGEA, pela oportunidade de agregarmos, juntos, o conhecimento tanto almejado, em especial Magno Vidotto e Gilson Debastiani;

À nossa maestrina Vanderléia Luzia Stockmann Schmidt e suas fieis assistentes Tatiane Alves Pidorodeski e Isis B. Hasegawa, pela competência demonstrada para “fazer” funcionar nosso PPGEA e;

Aos demais funcionários da UNIOESTE, obrigado a todos!

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Configuração de um sistema fotovoltaico isolado (esquerda) e um sistema eólico isolado (direita). Fonte: www.cresesb.cepel.br	5
Figura 02: Configuração de um sistema híbrido utilizando um motor de ciclo diesel, arranjos de painéis fotovoltaicos e aerogerador. Fonte: Adaptado de www.cresesb.cepel.br	5
Figura 03: Configuração de um sistema de geração eólica conectada á rede elétrica convencional. Fonte: Adaptado de www.hetronix.eu	6
Figura 04: Composição da matriz energética brasileira em 2011 e 2012. Fonte: (BRASIL, 2013).	7
Figura 05: Empreendimentos em operação subsidiados pelo PROINFA em diversas regiões do Brasil, com suas respectivas potências instaladas. Fonte: (DUTRA,2007).	8
Figura 06: Rede de estações meteorológicas utilizadas para o mapeamento de variáveis meteorológicas no território brasileiro. Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2006).	10
Figura 07: Vista explodida das regiões brasileiras, com valores do potencial interanual médio disponível pela energia solar em cada região. Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2006).	10
Figura 08: Atlas solarimétrico do território Brasileiro com dados de radiação solar global diária média anual. Fonte: Adaptado de (TIBA, 2000).	11
Figura 09: Constante solar variando no período de 11 anos. Fonte: (FILHO, 2014).	12
Figura 10: Balanço energético na Terra, onde cada fração de energia é representada em cada processo radiativo na atmosfera. Fonte: (PEREIRA, 2006).	13
Figura 11: Disposição de células fotovoltaicas em módulo e arranjo. Fonte: (KNIER, 2012).	16
Figura 12: Tecnologia fotovoltaica tipo policristalina, monocristalina e amorfo, respectivamente.	16
Figura 13: Sistema de aquecimento de água simplificado, utilizando coletores solares planos. Fonte: www.soletrol.com.br	18
Figura 14: Tipos de coletores solares: coletor solar plano, coletor parabólico composto – CPC e coletores de vácuo, respectivamente. Fonte: www.thermosolar.sk e www.centrometal.hr	19
Figura 15: Mapa com as direções predominantes anuais (%) para todo o território brasileiro. Fonte: Adaptado de (AMARANTE, 2001).	20
Figura 16: Vista explodida das regiões brasileiras, com valores do potencial eólicoelétrico estimado. Fonte: Adaptado de (AMARANTE, 2001).	21
Figura 17: Evolução da geração eólica de 2006 a 2012. Fonte: (BRASIL, 2013).	21
Figura 18: Rugosidade esquematizando escalas climáticas e camadas verticais encontradas em áreas urbanas e arredores, tais como, Camada Limite Planetária –	

CLP; Camada Limite Urbana – CLU e; Camada Limite Rural – CLR. Fonte: Adaptado de (OKE, 2004).	23
Figura 19: Perfil vertical da velocidade do vento na superfície, passando pela camada limite até a altura do vento geostrófico (trajetória retilínea). Fonte: (MARTINS, 2008).....	24
Figura 20: Fluxo de ar em movimento, dada uma velocidade v em um cilindro, passando por um equipamento eólico com rotor de área A . Fonte: Adaptado de (AMARANTE, 2001).	25
Figura 21: Energia eólica extraída de uma turbina sendo que apenas uma parte da energia provida do vento é, de fato, absorvida pelo sistema. Fonte: Adaptado de (PINTO, 2013).	27
Figura 22: Modelos de turbinas com eixo de rotação vertical, onde (a) Darrieus; (b) Savonius; (c) Solarwind; (d) Helicoidal; (e) Noguchi; (f) Maglev e; (g) Cochrane. Fonte: Adaptado de (PINTO, 2013).....	28
Figura 23: Aerogeradores horizontais, desenhados por Engenheiros da National Aeronautics and Space Administration - NASA, entre 1973 e 1988. Fonte: Adaptado de www.windsofchange.dk	29
Figura 24: Complementaridade entre as vazões afluentes de Sobradinho com a média mensal estimada da geração eólica. Fonte: (MARINHO, 2009).	30
Figura 25: Precipitação média mensal e insolação média mensal, em Taquari - RS, utilizando uma estação meteorológica. Fonte: (BELUCO, 2001).	31
Figura 26: Disponibilidade solar e eólica com médias mensais em <i>Ersa</i> e <i>Ajaccio</i> , no Mar Mediterrâneo e coeficientes de correlação (CC) entre os dois locais. Fonte: (NOTTON, 2011).	33
Figura 27: Mapa de localização da estação meteorológica utilizada. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	35
Figura 28: Índices de precipitação pluviométrica e temperatura ambiente.....	36
Figura 29: Rosa dos ventos com intensidade horária das precipitações pluviométricas para os anos 1 e 2.....	37
Figura 30: Estação meteorológica <i>Hobo U30 Station Wi-Fi</i> e localização do equipamento acima do prédio. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	38
Figura 31: <i>Data logger Hobo U30</i> . Fonte: Adaptado de (www.hobolink.com).	38
Figura 32: Piranômetro <i>S-LIB-M003</i> . Fonte: www.hobolink.com	39
Figura 33: Anemômetro <i>S-WCA-M003</i> . Fonte: Autor.	40
Figura 34: Sensor de pressão barométrica <i>S-PB-CM50</i> . Fonte: Autor.....	41
Figura 35: Carcaça protetora em um corte transversal e sensor de temperatura <i>S-THB-M00x</i> . Fonte: Adaptado de www.hobolink.com	42
Figura 36: Sensor pluviométrico <i>MAN-S-RGX</i> . Fonte: Autor.....	43
Figura 37: Irradiância solar média entre os anos 1 e 2, e as médias históricas de 5 anos.....	49
Figura 38: Irradiância solar média horária entre os anos 1 e 2 e a média.....	50
Figura 39: Irradiância solar média de 2 anos e as médias históricas de 5 anos.	51
Figura 40: Irradiância solar média horária sazonal de 2 anos.	52

Figura 41: Velocidade média mensal do vento entre os anos 1 e 2 e as médias históricas de 5 anos.	53
Figura 42: Velocidade média horária do vento entre os anos 1 e 2.	54
Figura 43: Rosa dos ventos das velocidade médias interanuais e direção predominante, para uma altura de 18 metros.....	55
Figura 44: Velocidades médias mensais do vento entre as estações no intervalo de 2 anos e as médias históricas de 5 anos.....	56
Figura 45: Velocidade média horária do vento entre as estações a uma altura de 18 metros.	57
Figura 46: Rosa dos ventos das médias intersazonais e direção predominante, para uma altura de 18 metros.....	58
Figura 47: Disponibilidades médias horárias das energias solar e eólica entre os anos 1 e 2.....	59
Figura 48: Disponibilidades médias diárias das energias solar e eólica entre os anos 1 e 2.	61
Figura 49: Rosa dos ventos das médias interanuais da energia eólica disponível e direção predominante, para uma altura de 18 metros.	62
Figura 50: Disponibilidades médias horárias das energias solar e eólica entre as estações.....	63
Figura 51: Disponibilidades médias diárias das energias solar e eólica entre as estações.....	64
Figura 52: Rosa dos ventos das médias intersazonais de energia eólica disponível e direção predominante, para uma altura de 18 metros.....	65
Figura 53: Disponibilidades média das energias solar e eólica e coeficiente de correlação entre os meses.	67
Figura 54: Disponibilidade das energias solar e eólica e coeficientes de correlação entre os anos 1 e 2.....	69
Figura 55: Disponibilidade das energias solar e eólica e coeficientes de correlação entre as estações.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Especificações técnicas do piranômetro S-LIB-M003	39
Tabela 02: Especificações técnicas do anemômetro S-WCA-M003	40
Tabela 03: Especificações técnicas do sensor de pressão barométrica S-BPB-CM50	41
Tabela 04: Especificações técnicas do sensor de temperatura S-THB-M00x	42
Tabela 05: Especificações técnicas do sensor pluviométrico MAN-S-RGX	43
Tabela 06: Níveis do coeficiente de <i>Spearman</i>	47
Tabela 07: Coeficientes de correlação entre as disponibilidades das energias solar e eólica entre meses	68
Tabela 08: Coeficientes de correlação entre as disponibilidades das energias solar e eólica interanuais	69
Tabela 09: Coeficientes de correlação entre as disponibilidades das energias solar e eólica estacionárias	71

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
ÍNDICE	x
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 ENERGIA E SUAS FORMAS.....	3
2.1.1 Fontes convencionais de energia.....	3
2.1.2 Fontes renováveis de energia.....	4
2.2 FONTES RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	6
2.3 ENERGIA SOLAR.....	9
2.3.1 Potencial solar no Brasil.....	9
2.3.2 Radiação solar.....	11
2.4 ENERGIA EÓLICA.....	19
2.4.1 Potencial eólico no Brasil.....	20
2.4.2 Velocidade do vento e potência eólica.....	22
2.4.3 Turbinas eólicas.....	28
2.5 COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA.....	29
2.6 DISPONIBILIDADE SOLAR E EÓLICA.....	31
2.7 ANÁLISES DE CORRELAÇÕES.....	33
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 MATERIAL.....	35
3.1.1 Caracterização da área experimental.....	35
3.1.2 Medições meteorológicas.....	37
3.1.3 Rosa dos ventos.....	43
3.2 MÉTODOS.....	44
3.2.1 Series temporais.....	44
3.2.2 Análise dos dados de disponibilidade energética.....	45

3.2.3	Análise de correlação das energias disponíveis	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	COMPORTAMENTO DA IRRADIÂNCIA SOLAR E VELOCIDADE DO VENTO.....	48
4.1.1	Irradiância solar	48
4.1.2	Velocidade de vento	52
4.2	DISPONIBILIDADES DAS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA	58
4.2.1	Disponibilidades energéticas interanuais.....	59
4.2.2	Disponibilidades energéticas intersazonais	62
4.3	ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO	66
4.3.1	Correlações mensais	66
4.3.2	Correlações interanuais	68
4.3.3	Correlações intersazonais	70
5	CONCLUSÕES	72
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

RESUMO

Com base no conceito da sustentabilidade que abrange o tema energia, bem como, o aproveitamento racional a partir das fontes naturais, as fontes convencionais não imprimem a real necessidade dos meios atuais de produção. Neste contexto, a região oeste do Paraná possui vocação para o desenvolvimento de projetos que circundam a produção energética procedente das fontes alternativas, seja pela solar, eólica, biomassa ou hídrica. Mediante estas premissas, o objetivo desta pesquisa consistiu em verificar o comportamento das fontes solar e eólica em Cascavel (PR) para distintas séries temporais, submetendo-as a uma análise qualitativa e quantitativa de suas disponibilidades energéticas utilizando uma abordagem estatística com o Coeficiente de Correlação (CC) de *Spearman*. A maior energia acumulada disponível entre as fontes solar e eólica, ocorreu no primeiro ano, com $165,24 \text{ kWh.m}^{-2}$ e no verão com $98,33 \text{ kWh.m}^{-2}$. Os CC descreveram os parâmetros estudados com níveis “fracos” em 73,00% das interações mensais, 40,00% das interanuais e 69,44% das intersazonais.

PALAVRAS-CHAVE: Disponibilidade energética, fontes renováveis, coeficientes de correlação .

ABSTRACT

Based on the concept of sustainability that encompasses the subject of energy, as well as the rational use from natural sources, conventional sources will not print the real needs of today's means of production. In this context, the western region of Paraná owns the vocation to development projects that surround the coming energy production from alternative sources, either by solar, wind, biomass or hydropower. Under these assumptions, the objective of this research consisted of verify the behavior of solar and wind sources in Cascavel (PR) for different time series, subjecting them to a qualitative and quantitative analysis of their available energy using a statistical approach with Correlation Coefficient (CC) of Spearman. The highest cumulative energy available between solar and wind sources, occurred in the first year, with $165.24 \text{ kWh.m}^{-2}$ and summer with 98.33 kWh.m^{-2} . The CC have described parameters studied as "weak" levels in 73.00% of monthly interactions, 40.00% the interannual and 69.44% the interseasonal.

KEYWORDS: Energy availability, renewable sources, correlation coefficients.

1 INTRODUÇÃO

Embora os custos atuais ainda sejam dentre outros fatores, um empecilho para a utilização de energias alternativas em maior escala, estas fontes primárias denotam ser um forte argumento para o desenvolvimento no setor produtivo e uma opção ideal para o meio ambiente dito como sustentável, ao passo que as energias de origem fóssil não condizem com a nova ordem impostas pelas fontes energéticas renováveis.

O Brasil possui a maior área agricultável do mundo. A utilização de tecnologias que subsidiem essa potencialidade diversifica a maneira de produzir, ainda que seja em pequena escala, onde o formato energético seja de uma forma característica, parcialmente deficiente. Por outro lado, os recursos naturais disponíveis, bem como as características climáticas do território brasileiro possibilitam, mesmo nestas áreas, a utilização de formas energéticas “rústicas” que compõem um cenário ideal para desenvolver projetos alternativos de geração de energia, como em pequenas propriedades agrícolas e áreas isoladas.

O Paraná possui um potencial energético oriundo de fontes alternativas capazes de suprir a necessidade de alguma parte de sua demanda produtiva. Neste potencial estão inseridas a energia eólica, solar, biomassa e hídrica, que podem ser utilizadas em períodos distintos, configurando um maior aproveitamento sazonal de suas características peculiares.

A região de Cascavel está enquadrada em um cenário agrícola muito estratégico para o estado, caracterizada também pelo seu potencial energético já descrito por alguns autores Kim (2002), por exemplo, avaliou o potencial eólico em dezessete estações meteorológicas, a dez metros de altura, localizadas em diferentes pontos do estado do Paraná, confirmando a vocação para a região de Cascavel que descreveu uma média anual de ventos máximos, a partir do total diário acumulado, de $10,84 \text{ m.s}^{-1}$, seguida de Ponta Grossa e Clevelândia, com $10,75$ e $10,70 \text{ m.s}^{-1}$, respectivamente.

A temperatura máxima média para a cidade de Cascavel (janeiro) é de 28,6° C e mínima média (julho) de 11,2° C (CASCAVEL, 2012). A média mensal dos valores de irradiação solar total, segundo Valiati e Ricieri (2005), é de 3,71 kWh.m⁻², variando entre mínima de 2,49 kWh.m⁻², em junho e máxima de 4,84 kWh.m⁻² em dezembro. Neste sentido, a região pode utilizar esta disponibilidade potencial de forma eficiente, visto as altas temperaturas ocorridas, principalmente no período de verão, denotadas nos dados meteorológicos.

A opção do uso de energias alternativas oriundas de fontes naturais descreve um posicionamento tecnicamente viável para a geração de energia elétrica, dentre outras finalidades. O objetivo deste trabalho consistiu em analisar o comportamento das fontes alternativas provenientes da irradiância solar e da velocidade e direção do vento, transformando os dados horários inerentes a estas variáveis em distintas séries temporais de modo a descrever de maneira mais detalhada a disponibilidade energética provida pelas fontes solar e eólica em Cascavel, PR.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ENERGIA E SUAS FORMAS

A energia está relacionada a tudo que pode ser transformado em trabalho, seja ela, na forma de calor, movimento ou luz. Pelo Sistema Internacional (SI), o trabalho recebe a unidade de medida em *Joule* (J). A capacidade de produzir trabalho, admite diversas formas de energia, seja mecânica, térmica, elétrica, eletromagnética, gravitacional, química, geotérmica, eólica ou nuclear. Deste modo, nenhuma destas energias pode ser criada, menos ainda destruída, o que pelo senso comum atende pela lei de *Lavoisier* (1743-94), onde "*Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma*" como o ponto fundamental para a transformação de uma forma de energia para outra.

2.1.1 Fontes convencionais de energia

Os combustíveis nucleares e combustíveis fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural, compõem as chamadas fontes convencionais de energia. Elas são obtidas em depósitos estáticos acumulados no subsolo. Portanto, tais reservas são caracterizadas inicialmente como fontes energéticas potenciais isoladas, até que ocorra sua liberação pela ação humana, para iniciar o fornecimento desta energia para fins práticos e usuais. As fontes convencionais de energia, portanto, são finitas (TWIDELL, 2012).

2.1.2 Fontes renováveis de energia

A fonte renovável mais abundante disponível na natureza provém do Sol, fonte primária com quase a totalidade de toda a energia disponível no planeta Terra. As outras fontes renováveis são produtos parciais mediante sua capacidade de absorver direta ou indiretamente esta energia na forma de energia térmica, eólica, hidráulica, maremotriz, eletromagnética, química, biomassa, dentre outras. Por meio de dispositivos próprios são convertidas e aproveitadas alterando suas características físicas elementares. Ainda que o homem utilize novos meios de transformação energética, não foi capaz de desenvolver na prática nenhuma fonte “perpétua” de energia.

Segundo Twidell (2012), as fontes renováveis de energia são obtidas por meio de fluxos naturais ocorrentes na natureza, independentemente de dispositivos que possam ou não aproveitar esta energia, essas fontes sempre estarão presentes no meio, sendo consideradas renováveis em seu ciclo. Também são mencionadas como energias verdes ou sustentáveis.

2.1.2.1 Configurações dos sistemas energéticos alternativos

Os sistemas energéticos podem ser classificados em três distintas categorias, sendo usuais tanto para a energia solar quanto para a energia eólica, da mesma forma que para outras formas e fontes energéticas encontradas no local em questão, conforme suas características peculiares e tecnologias disponíveis.

Os sistemas isolados, de acordo com a figura 01, normalmente utilizam os acumuladores (baterias) de energia, assim como os controladores de cargas e os inversores de frequência. Os controladores tem a função de evitar danos, principalmente às baterias por sobrecargas ou descargas profundas, os inversores por sua vez, interagem na alimentação dos equipamentos (cargas) de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC) (BRITO, 2003).

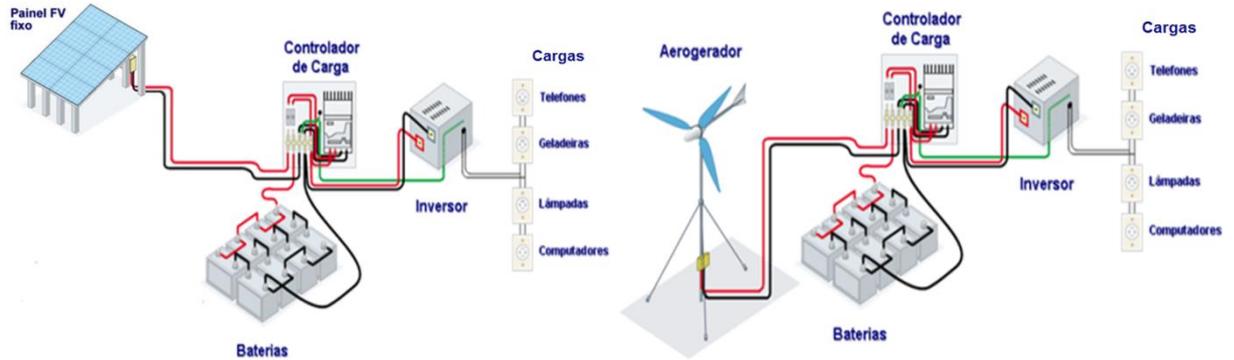


Figura 01: Configuração de um sistema fotovoltaico isolado (esquerda) e um sistema eólico isolado (direita). Fonte: www.cresesb.cepel.br.

Os sistemas híbridos, conforme a figura 02, são assim definidos quando outras fontes geradoras de energias são consorciadas entre si, tais como, turbinas eólicas, motores diesel, módulos fotovoltaicos, dentre outras possíveis combinações. Esta configuração representa mais complexidade ao sistema, sendo necessária uma maior otimização no uso de todas as fontes envolvidas para o controle da eficiência na entrega da energia das cargas ao usuário (BRITO, 2003). Geralmente os sistemas híbridos são empregados em iniciativas de pequeno e médio porte quando relativo a sistemas envolvendo fontes renováveis, dependendo das tecnologias aplicadas na conversão (BARBOSA, 2004).

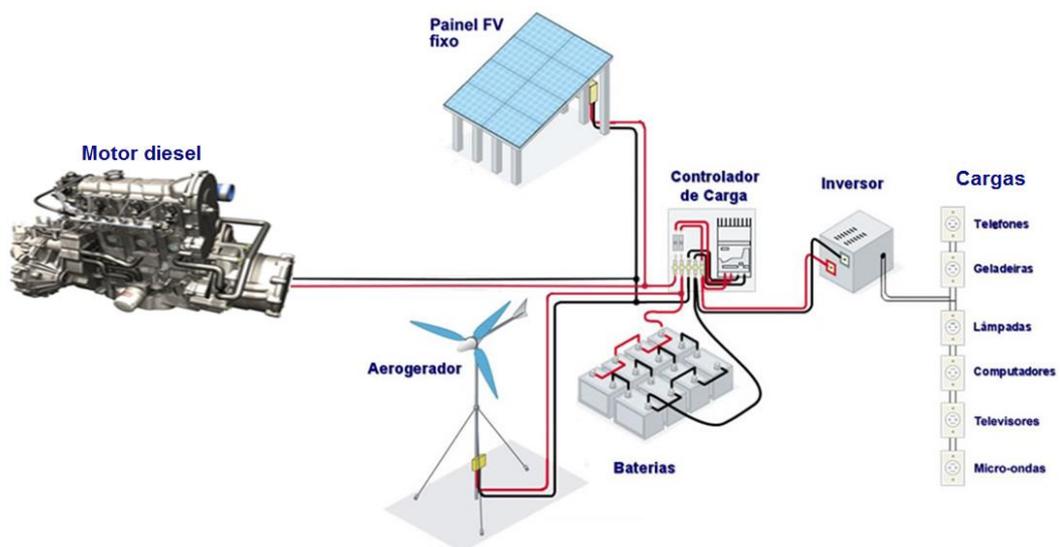


Figura 02: Configuração de um sistema híbrido utilizando um motor de ciclo diesel, arranjos de painéis fotovoltaicos e aerogerador. Fonte: Adaptado de www.cresesb.cepel.br.

Os sistemas interligados à rede, conforme a figura 03, são assim denominados quando a geração é produzida e entregue diretamente na rede convencional, não sendo necessária a utilização de armazenamento de energia por meio de acumuladores. Estes sistemas são projetados geralmente para comportarem sistemas de médio e grande porte, sendo que os arranjos são conectados aos inversores de frequência e, em seguida, guiados diretamente na rede elétrica convencional (BRITO, 2003). Este modelo, na verdade complementa a geração de outra fonte e tem como principais objetivos, garantir a qualidade da energia elétrica em operação normal ou em situações de contingência (falta na rede, perdas de geração, entre outras) (PINHO, 2008).

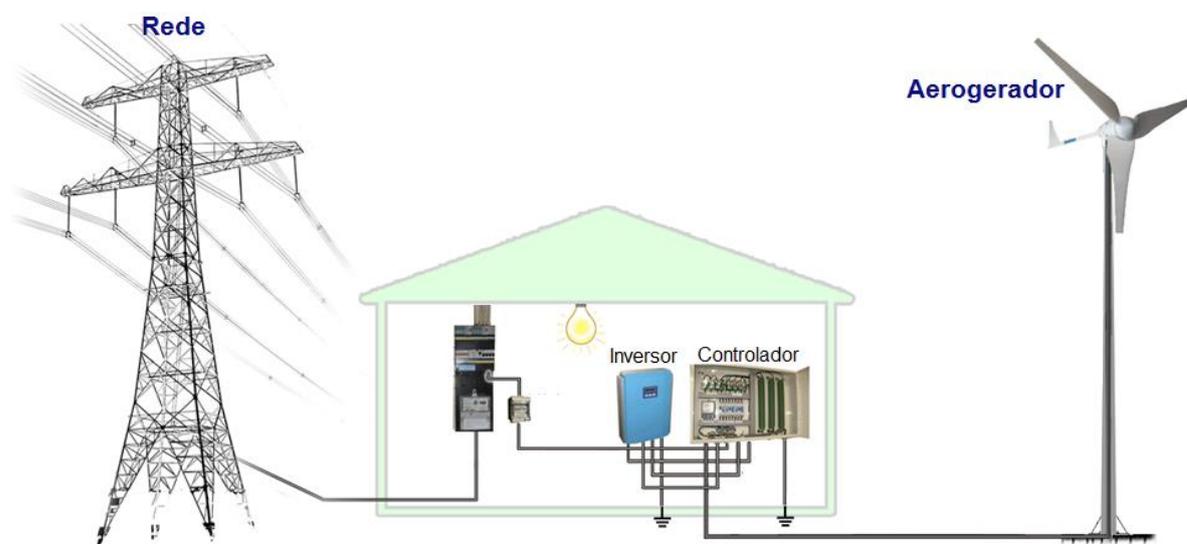


Figura 03: Configuração de um sistema de geração eólica conectada à rede elétrica convencional.
Fonte: Adaptado de www.hetronix.eu.

2.2 FONTES RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

O Brasil possui uma significativa média de fontes renováveis em sua matriz energética, chegando em 42,40% em 2012, e mesmo com uma redução relativa ao ano anterior - em função da menor oferta de energia hidráulica e de etanol - ainda desponta acima da média mundial de 13,20%, calculada pela *International Energy*

Agency – IEA. Em 2012, o total de emissões de gases do efeito estufa associados à matriz energética atingiu 429 milhões de toneladas de dióxido de carbono. Em média, a economia brasileira é 2 vezes menos poluente que a americana, 1,3 vezes menos que a europeia e 4 vezes menos que a chinesa (BRASIL, 2013).

Na matriz energética nacional, de acordo com Brasil (2013), a energia hidráulica é a principal fonte produtora de energia, com 76,90%, na frente do gás natural (7,90%) e da biomassa (6,80%), conforme a figura 04. As hidrelétricas são grandes geradoras de energia, porém em termos globais são limitantes por uma série de condições inerentes às questões socioambientais, logísticas e financeiras, tendo que recorrer a outras formas de energias renováveis para suprir a necessidade mundial com os mesmos efeitos de eficiência e sustentabilidade. Por outro lado, a aptidão brasileira para as opções energéticas renováveis é potencialmente favorável, principalmente a hídrica, solar, eólica e biomassa.

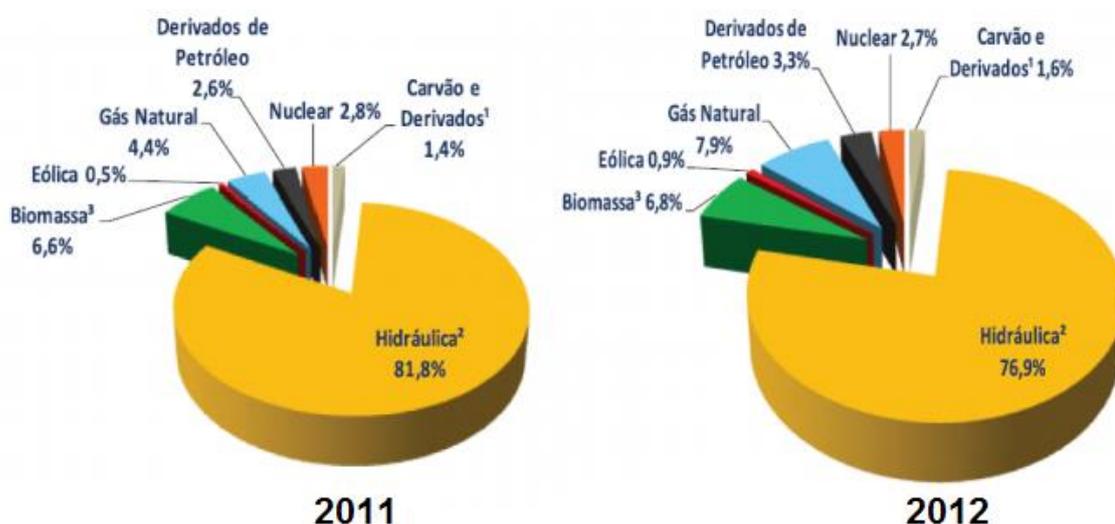


Figura 04: Composição da matriz energética brasileira em 2011 e 2012. Fonte: (BRASIL, 2013).

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA, conforme o Decreto nº 5.025, de 2004, tem por objetivos estratégicos aumentar a segurança no abastecimento, diversificando a matriz energética brasileira e valorizando as aptidões regionais e locais. Essa política foi instituída para promover o aumento da participação das fontes alternativas por

empreendimentos no Sistema Elétrico Interligado Nacional – SIN, incluindo as fontes de origem eólica, de biomassa e hidráulica (PCH). Além dos empreendimentos em operação, conforme a figura 05, ainda existem os em construção e os empreendimentos com obras não iniciadas (DUTRA, 2007).

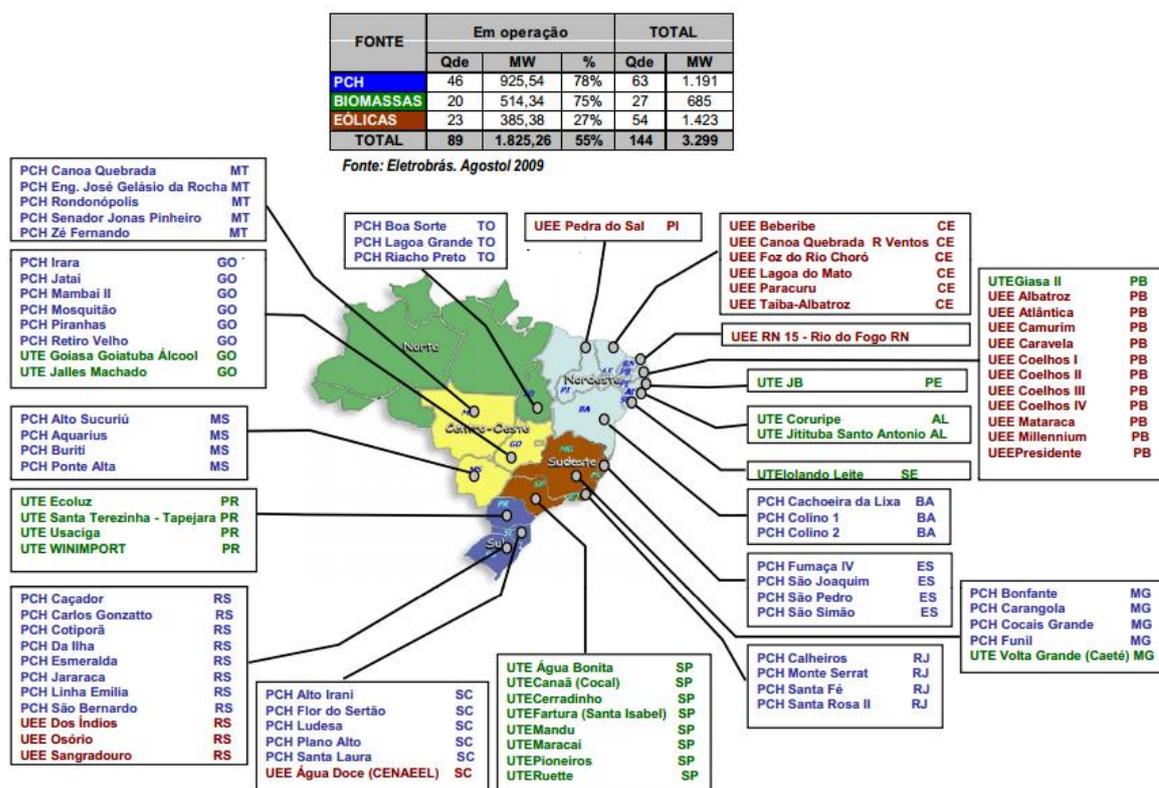


Figura 05: Empreendimentos em operação subsidiados pelo PROINFA em diversas regiões do Brasil, com suas respectivas potências instaladas. Fonte: (DUTRA,2007).

Uma das principais ferramentas competitivas de uma empresa, seja ela privada ou estatal é a Pesquisa e Desenvolvimento (P & D). Esta política tecnológica agrega valores no processo e garante o reconhecimento em termos globais das questões ambientais (mitigação do efeito das emissões de gases nocivos) adotando os conceitos positivos das energias renováveis. O Brasil investe mais de 1,4% de seu Produto Interno Bruto – PIB em P & D, da mesma forma que os EUA com 2,7% e Japão com 3,4% (SILVA, 2012).

2.3 ENERGIA SOLAR

O sol possui temperatura de pelo menos 6.000 °C em sua camada externa, no seu núcleo a temperatura aumenta em 15.000.000 °C, com pressão de 340 bilhões de vezes a do ar na Terra ao nível do mar. Toda a radiação originada do Sol que chega à atmosfera terrestre, apenas uma parte alcança a superfície terrestre, resultando da reflexão e absorção de seus raios. Este recurso é variável conforme a combinação da alternância entre dia e noite, estações do ano e diferentes índices pluviométricos (FILHO, 2007).

2.3.1 Potencial solar no Brasil

O potencial solar brasileiro está diretamente ligado com sua localização geográfica, fator determinante na disponibilidade energética durante todo o ano. Esta forma de energia alternativa potencializa a possibilidade do emprego desde pequenos sistemas fotovoltaicos autônomos até grandes centrais concentradoras de energia solar. Na literatura, o “Atlas brasileiro de energia solar” descreve este potencial com estudos desenvolvidos em uma série temporal de 10 anos divulgando o levantamento dessa disponibilidade de todo o território brasileiro com dados obtidos de estações de superfície, como ilustra a figura 06 (PEREIRA, 2006).

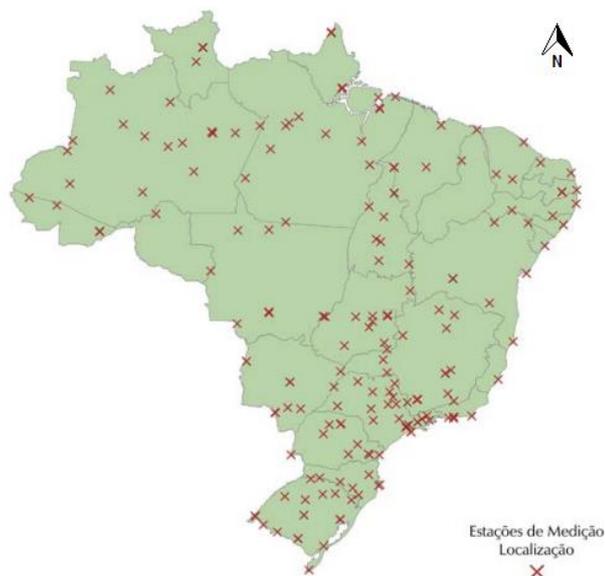


Figura 06: Rede de estações meteorológicas utilizadas para o mapeamento de variáveis meteorológicas no território brasileiro. Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2006).

A figura 07 apresenta a região nordeste como a maior em disponibilidade da energia solar, seguida pelas regiões Centro-oeste e Sudeste, por outro lado, as características climáticas da região Norte possuem valores médios de disponibilidade próximos da região Sul. Pouca ou nenhuma variabilidade interanual pode ser denotada na região Sudeste e Centro-oeste (PEREIRA, 2006).



Figura 07: Vista explodida das regiões brasileiras, com valores do potencial interanual médio disponível pela energia solar em cada região. Fonte: Adaptado de (PEREIRA, 2006).

Estudos realizados por Tiba (2000), em um intervalo de tempo de 40 anos, revelam que a radiação solar global diária média mensal, no Brasil, conforme figura

08, varia entre 8 e 22 MJ.m⁻²/dia com mínima semestral (maio, junho e julho) na faixa de 8 a 18 MJ.m⁻²/dia. Em um período de 10 anos, estudos avaliados por Pereira (2006), verificaram para a região sul do Brasil, uma média interanual entre 17 e 22 MJ.m⁻²/dia. No Paraná a média anual da radiação solar global diária é de 16 MJ.m⁻²/dia (TIBA, 2000).

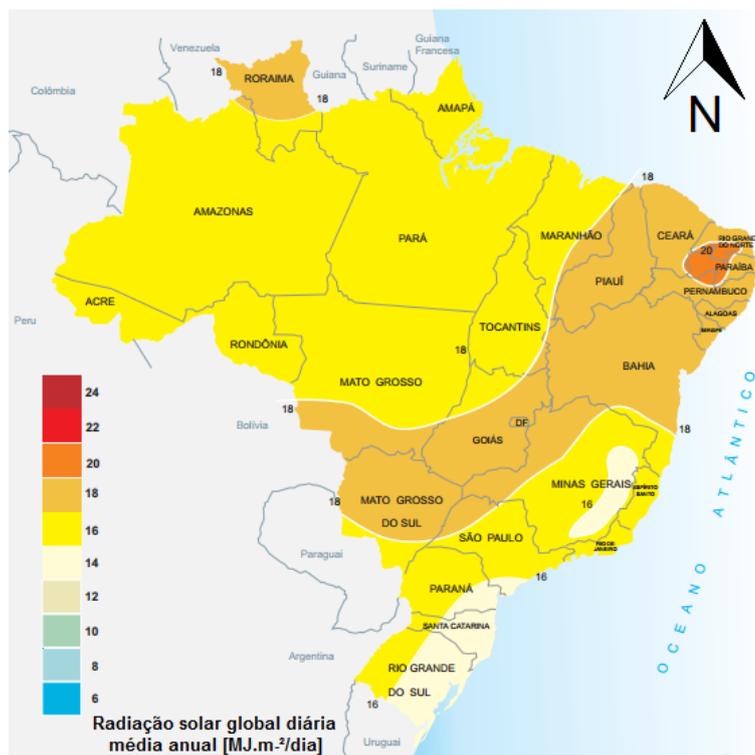


Figura 08: Atlas solarimétrico do território Brasileiro com dados de radiação solar global diária média anual. Fonte: Adaptado de (TIBA, 2000).

2.3.2 Radiação solar

A luz Solar, percorrendo cerca de 150.000.000 km, demora em torno de 8 minutos para alcançar a Terra. Para medir essa potência incidente em um determinado ponto, utiliza-se a unidade de medida kW.m⁻² (Potência x Área). Caso seja necessário medir ao longo do tempo, utiliza-se kW.m⁻²/dia (Energia x Área/tempo) (FILHO, 2007). Segundo Pinto (2013), o total de radiação solar que chega a Terra é cerca de 1,58 bilhão de TWh.ano⁻¹.

A distribuição da radiação solar depende da distância entre o Sol e a Terra, sendo variável durante o ano, por isso, a constante solar possui um valor médio de 1.367 W.m^{-2} , valor este adotado como padrão pela Organização Meteorológica Mundial - OMM (IST, 2004 e PINTO, 2013). A radiação emitida pelo sol e sua relação espacial com a Terra resulta em uma intensidade quase fixa de radiação solar fora da atmosfera terrestre. Esta constante solar, de acordo com Filho (2005), é variável relativamente pela época no ciclo de 11 anos, podendo ficar entre o intervalo de $1.365,55$ a $1.367,86 \text{ W.m}^{-2}$, conforme figura 09, a seguir.

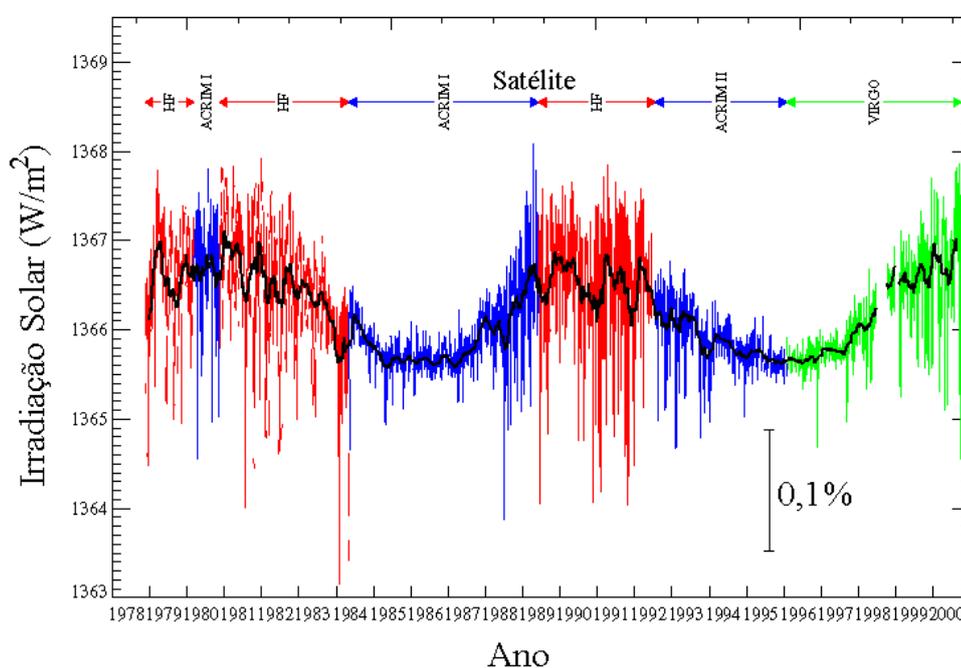


Figura 09: Constante solar variando no período de 11 anos. Fonte: (FILHO, 2014).

Conforme Brito (2003), Tiba (2000) e Ist (2004), a radiação global é composta por duas componentes: a radiação solar direta e a radiação solar difusa. A direta consiste em uma fração da radiação solar que atinge diretamente o solo, a componente difusa consiste na radiação solar que alcança a superfície terrestre, após ultrapassar diversos obstáculos, como exemplo, os materiais em suspensão dispersos na atmosfera. A radiação solar global é a quantidade de energia gratuita e renovável e o conhecimento desta energia no tempo e espaço é indispensável ao sucesso na implantação de processos que visem seu aproveitamento (TUBELIS, 1986). Uma das equações que expõem a relação entre as componentes direta, indireta e global, está descrita na equação 01.

$$I_h = I_{bn} \cos z + I_d \quad (01)$$

Onde,

I_h = Radiação global, em $[W.m^{-2}]$;

I_{bn} = Fluxo de radiação direta, em $[W.m^{-2}]$;

$\cos z$ = Ângulo formado pelos raios solares, em $[^\circ]$ e;

I_d = Radiação difusa, em $[W.m^{-2}]$.

O balanço radioativo, apresentado na figura 10, está diretamente correlacionado com a nebulosidade, sendo que estas cobrem o planeta Terra praticamente todo o tempo, considerada energia perdida sob o ponto de vista da superfície terrestre e ainda refletida parte na superfície inferior das massas de ar (nuvens) mais elevadas (PEREIRA, 2006).

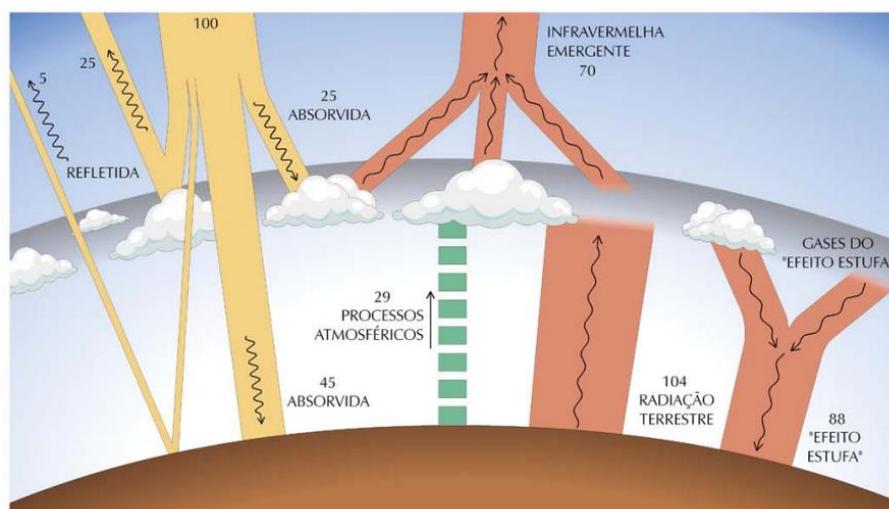


Figura 10: Balanço energético na Terra, onde cada fração de energia é representada em cada processo radiativo na atmosfera. Fonte: (PEREIRA, 2006).

A superfície do solo, com ou sem cobertura vegetal é o principal meio receptor e emissor da radiação solar e atmosférica. Este balanço varia ao longo do dia e do ano, promovendo variações diárias e anuais de temperatura do solo e do ar. Estas variações na superfície ocorrem em função da trajetória diária do sol acima do

horizonte e estacionária em função da declinação do sol ao longo do ano (TUBELIS, 1986).

A relação de *Angstrom* é a relação existente entre a insolação e a radiação solar global diária, médias mensais. Estabelecida em 1924, este método sofreu modificações e usualmente é expressa como na equação 02, também considerando outras variáveis para maior precisão tem-se a umidade relativa do ar, quantidade de água precipitável, latitude, altura solar, dentre outras (TIBA, 2000).

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{n}{N}\right) \quad (02)$$

Onde,

H = Radiação solar global diária, em [MJ. m⁻²];

H₀ = Radiação global diária no topo da atmosfera, em [MJ. m⁻²];

a e b = Coeficientes da equação de regressão linear [adimensional];

n = Insolação diária, em [hora] e;

N = Duração do período diurno, em [hora].

A disponibilidade de radiação solar, além de depender das condições atmosféricas, também está intimamente relacionada à latitude local, da posição temporal, e dos movimentos de rotação e translação da Terra, sendo que a cada dia, um diferente grau de intensidade de radiação é recebido (DUFFIE, 2013).

Para este trabalho foi adotado o tempo de insolação médio de 12 horas por dia para uniformização dos cálculos.

Diversos equipamentos são utilizados para a medição da radiação solar e de suas componentes, o *heliógrafo* tipo *Campbell-Stokes* mede o número de horas de brilho do Sol ou insolação; o *actinógrafo* mede a radiação solar total ou apenas a

difusa; o *piroheliômetro* mede o fluxo de radiação solar direta e; o *piranômetro* quantifica a radiação global (TIBA, 2000). Estes equipamentos de medição, segundo Martinazzo (2004), seguem as recomendações técnicas da OMM quanto sua instalação e calibração tornando-os confiáveis e precisos, uma vez que, cada equipamento sugere cuidados específicos conforme sua finalidade e limitações.

As cartas com maior distribuição espacial, descrevem valores aproximados e, ainda assim, analisam previamente o potencial disponível no campo da energia solar. Para situações pontuais devem-se recorrer a médias de respectivas estações solarimétricas (TIBA, 2000). Os dois modos de aproveitamento mais aplicados utilizando os efeitos da radiação solar, são o aproveitamento fotovoltaico e térmico, que serão apresentados nos tópicos seguintes, definindo suas principais características técnicas.

2.3.2.1 *Efeito fotovoltaico e células fotovoltaicas*

Empresas do setor de telecomunicações que buscavam utilizar novas fontes de energia em localidades isoladas, bem como, a própria “corrida espacial” promoveram significativamente a tecnologia da “fotoconversão”, sendo estimulada ainda mais no início da década de 1970, em função da crise energética, desencadeada pela grande dependência mundial quanto ao uso do petróleo e outros combustíveis fósseis (GUIMARÃES, 2004). Os trabalhos desenvolvidos com o efeito fotovoltaico avançaram por meio dos programas espaciais fizeram com que a tecnologia somasse estímulos para outras aplicações e, com a confiabilidade estabelecida, os custos também ficaram mais atrativos (KNIER, 2002).

A conversão de energia solar em energia elétrica ou simplesmente efeito fotovoltaico, segundo Guimarães (2004) e Brito (2003), foi verificada pela primeira vez por *Edmond Becquerel*, em 1839 quando foi constatada uma diferença de potencial nos extremos da estrutura de um material semicondutor quando exposto a luz. A célula fotovoltaica é a unidade fundamental para que ocorra este processo de conversão.

Estas placas ou módulos são agrupadas em arranjos, haja vista a baixa tensão e corrente de saída, arquitetando desta forma, os chamados módulos fotovoltaicos, conforme a figura 11, e quanto sua configuração, podem ser dispostos em série ou em paralelo, dependendo da opção desejada ao melhor atendimento prático das cargas (BRITO, 2003) e (RAMAKUMAR, 1983).

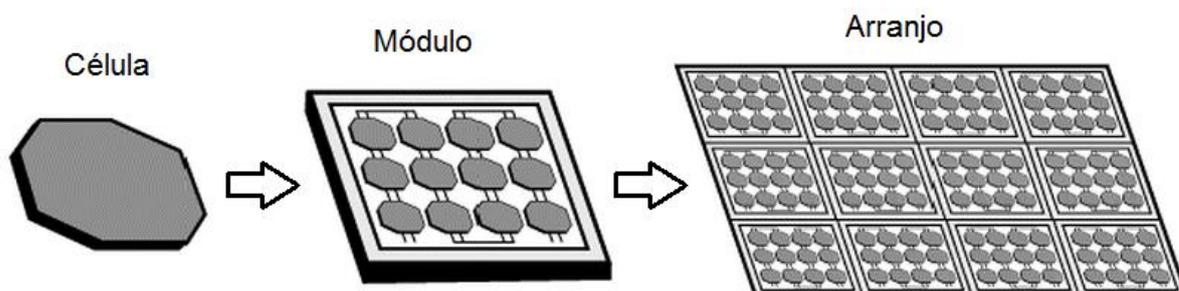


Figura 11: Disposição de células fotovoltaicas em módulo e arranjo. Fonte: (KNIER, 2012).

As células fotovoltaicas, conforme Brito (2003), normalmente são fabricadas empregando o silício (Si), na forma de cristais policristalinos, monocristalinos ou silício amorfo (Figura 12). Estas células atingem uma eficiência, segundo Brito (2003), de até 15%, para equipamentos comerciais, em laboratório esse valor pode chegar a 18% e conforme Bett (2009), até 41,1% com a utilização de um composto de *Arsenieto de Gálio Índio* (InGaAs) para aplicações terrestres e espaciais.



Figura 12: Tecnologia fotovoltaica tipo policristalina, monocristalina e amorfo, respectivamente.

Brito (2003), descreve que as principais características dos módulos fotovoltaicos são a tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, potência máxima, tensão de potência máxima e corrente de potência máxima. Estas características são definidas para uma condição padrão de radiação solar equivalente a $1.000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a uma temperatura prevista de 25°C .

2.3.2.2 *Efeito térmico*

O princípio do efeito térmico consiste na transferência de calor gerada pela radiação solar e absorvida pelos componentes metálicos, por meio de um corpo negro chamado de placa absorvedora. Os coletores solares são responsáveis pela interação entre a energia provida do Sol e os mecanismos físicos empregados neste processo. Na placa, segundo Ist (2004), um sistema de tubos transfere o calor gerado para o fluido, e imediatamente para o um reservatório térmico hermeticamente isolado. Este ciclo ocorre até que exista energia térmica suficiente para o andamento do processo.

Segundo Hepbasli (2009), o desempenho térmico do coletor solar é inerente às condições de transmissão, absorção e condução da energia solar, da condutividade do fluido e ainda da eficiência óptica de cobertura de vidro, desenho e das propriedades térmicas da placa absorvedora. Os principais componentes do sistema de aquecimento de água utilizando coletores solares são o reservatório de água, o reservatório térmico, as tubulações, as conexões, dentre outros possíveis acessórios de acordo com a necessidade do sistema, conforme a figura 13 (CAVALCANTI, 2001 e; AISANKAR, 2011).

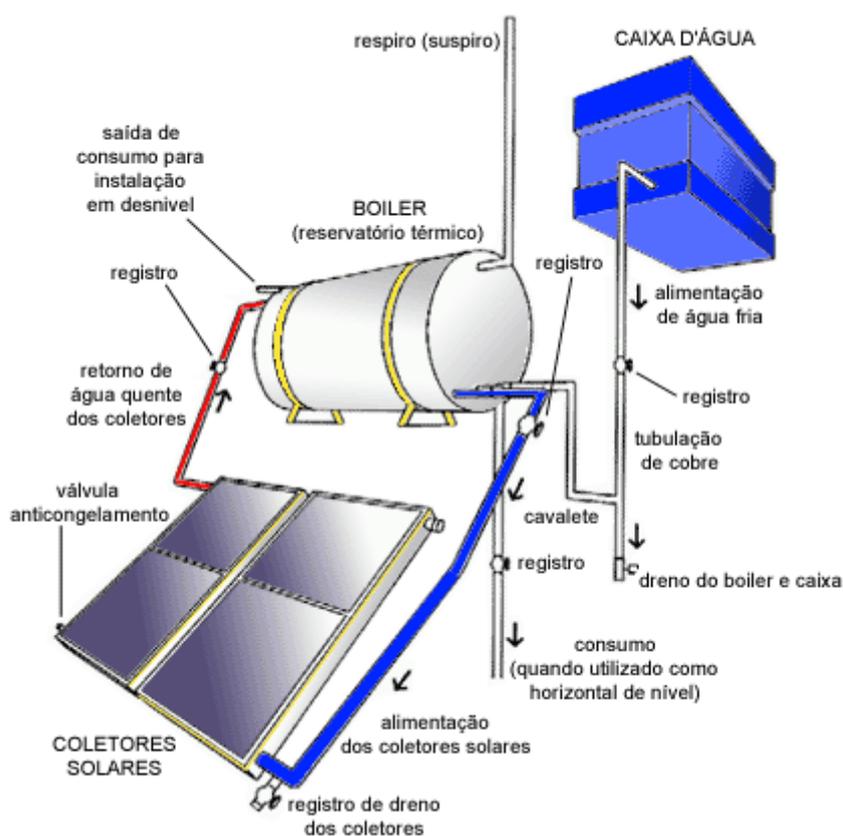


Figura 13: Sistema de aquecimento de água simplificado, utilizando coletores solares planos. Fonte: www.soletrol.com.br.

O funcionamento ocorrido dentro do coletor é simples, visto que a água sofre basicamente um processo físico. Segundo Nogueira (2004), existem dois tipos de aquecimentos, que são classificados mediante a forma com que a água aquecida é transportada. O primeiro tipo chamado de termossifão ou circulação natural, é determinado pela diferença de densidade entre a água fria e a água quente contida no coletor. O segundo é classificado como bombeamento ou circulação forçada, onde uma motobomba hidráulica promove a circulação da água, sendo acionada por um controlador eletrônico. Segundo Altener (2004), a maioria dos sistemas comercializados utiliza fluidos anti-congelantes que protegem os coletores das baixas temperaturas, normalmente utiliza-se um composto de água e glicol que circula em circuito fechado, mantendo a segurança térmica do processo.

Entre os variados modelos de coletores existentes no mercado, conforme a figura 14 a seguir, podem-se destacar os coletores planos, os coletores parabólicos compostos (CPCs) e os coletores de vácuo, e com suas variações existentes são

compreendidos com inúmeras opções adicionais entre arranjos e componentes (ALTENER, 2004). Estes conceitos tecnológicos já estão difundidos, porém com custos ainda variados dependendo dos respectivos rendimentos.



Figura 14: Tipos de coletores solares: coletor solar plano, coletor parabólico composto – CPC e coletores de vácuo, respectivamente. Fonte: www.thermosolar.sk e www.centrometal.hr.

2.4 ENERGIA EÓLICA

Dutra (2008) afirma que a energia eólica provém da radiação solar, partindo do princípio que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme das massas de ar da superfície terrestre, assim como, da orientação dos raios solares e os movimentos do planeta, dentre outros fatores fundamentais.

De toda a energia solar que o planeta Terra absorve, entre 3 e 5% pode ser convertida em energia formadora da base dos ventos. Deste potencial, apenas uma fração, de fato, pode ser aproveitada como energia eólica útil, e mesmo assim a cerca de algumas dezenas de metros de altura, de maneira mais eficiente (PINTO, 2013). Esta estimativa representa a potência anual instalada em centenas de vezes todas as centrais elétricas do mundo (DUTRA, 2008).

2.4.1 Potencial eólico no Brasil

O potencial eólico brasileiro para fins energéticos tem sido inventariado a partir dos anos 1970, desde o período crítico associado à mundialmente conhecida “crise do petróleo”, lendária pelo aumento em pelo menos 400% dos custos do combustível fóssil. Este progressivo estudo conta hoje com dispositivos mais modernos de coleta de dados, principalmente pelo apelo da tendência mundial quanto ao aproveitamento eólicoelétrico. Como produto e popularização destes estudos já existem diversos bancos de dados e estudos de referência, incluindo o “Atlas do potencial eólico brasileiro” que, segundo Amarante (2001), conta com diversos parâmetros inerentes a esta potencialidade, caracterizando todas as regiões do país, conforme o mapa da figura 15.

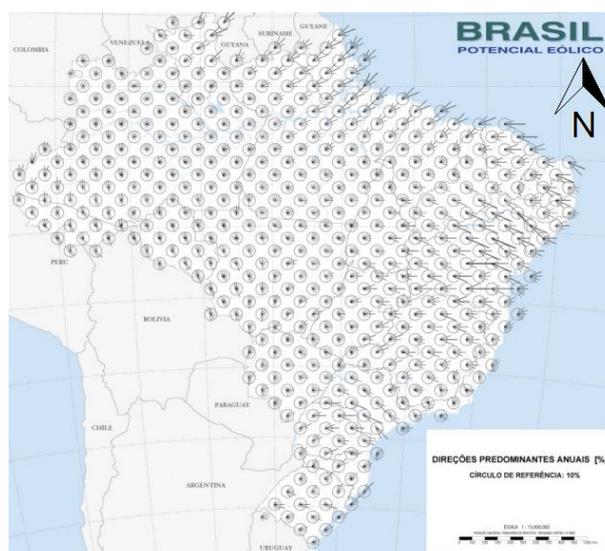


Figura 15: Mapa com as direções predominantes anuais (%) para todo o território brasileiro. Fonte: Adaptado de (AMARANTE, 2001).

A figura 16 a seguir, apresenta os valores do potencial eólico estimado para ventos médios anuais iguais ou superiores a $7,0 \text{ m.s}^{-1}$ representando os regimes de vento e fluxos de potência eólica na altura de 50 metros. A partir desses dados verificou-se que este potencial possui a disponibilidade de 143 GW de potência instalável e 272 TWh.ano^{-1} de energia anual disponível para todo o território

brasileiro, tendo a região Nordeste a maior potência instalável e energia anual dentre as demais regiões, com 75,0 GW e 144,3 TWh.ano⁻¹, respectivamente (AMARANTE, 2001).

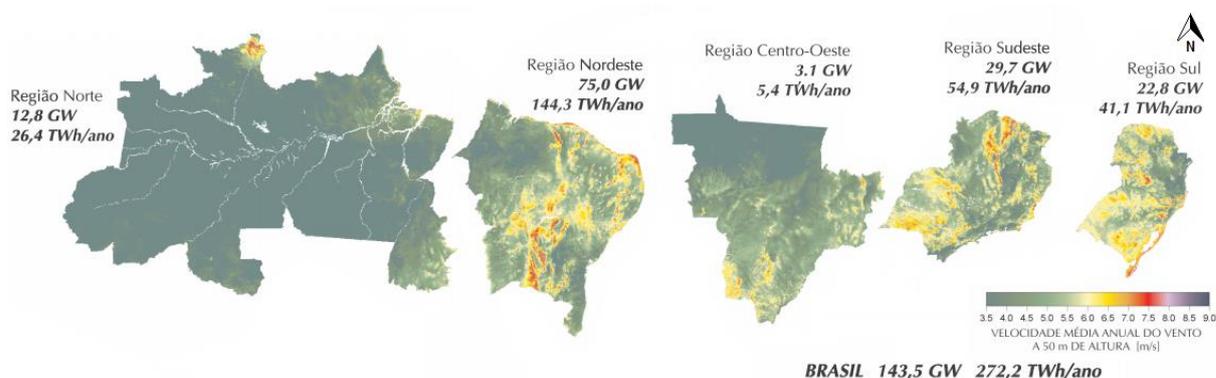


Figura 16: Vista explodida das regiões brasileiras, com valores do potencial eólicoelétrico estimado.
Fonte: Adaptado de (AMARANTE, 2001).

O estudo do potencial eólico consiste em uma importante ferramenta para projetos de parques eólicos ou mesmo para preceder estudos de pequenos projetos energéticos de microescala, levando em consideração que este último, necessita de uma avaliação pontual mais precisa referente a uma maior quantidade de tempo, quando possível. O avanço da geração eólica é promissor, segundo a evolução exposta na figura 17, a geração eólica passou de 237 GWh em 2006 para 5.050 GWh em 2012 e um aumento significativo de 86,70% entre os anos de 2011 e 2012 (BRASIL, 2013).

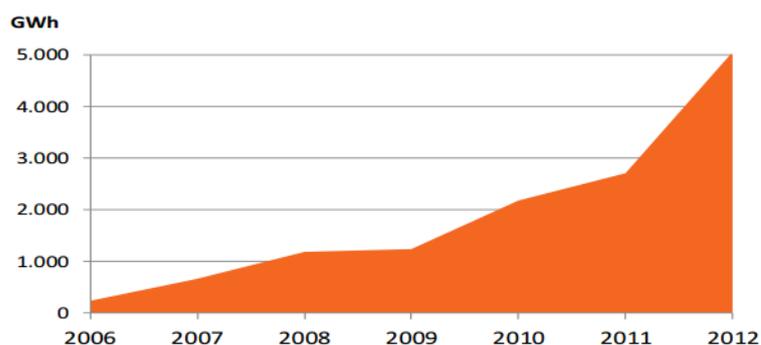


Figura 17: Evolução da geração eólica de 2006 a 2012. Fonte: (BRASIL, 2013).

2.4.2 Velocidade do vento e potência eólica

A escolha do local a ser alocada uma “máquina eólica”, seja para geração de energia elétrica, bombeamento hidráulico, ou qualquer outra forma de aproveitamento é determinante para a qualidade do sistema operacional. A rugosidade, refere-se a uma série de elementos, naturais ou não, sendo este, um relevante fator que pode modificar a disponibilidade local do vento.

Segundo Oke (2004), o comportamento do vento em diversas escalas horizontais são diferenciados em microescalas onde cada superfícies e objetos, tais como, edifícios, árvores, estradas, ruas, pátios e jardins, possuem seu próprio microclima, podendo variar as temperaturas da superfície e do ar; a escala local é caracterizada pela paisagem e topografia, traduzidos nas áreas urbanas pelos espaçamentos entre prédios dos bairros, possuindo uma combinação dos efeitos do microclima, compreendendo dimensões quilométricas, uma estação meteorológica apenas seria suficiente para caracterizá-la e; a mesoescala, que seria comparada a uma cidade, tendo geralmente algumas dezenas de quilômetros de extensão, sendo que apenas uma estação meteorológica não seria suficiente para caracterizá-la. A figura 18, esquematiza as três escalas próximas à superfície.

Os ventos de superfície, estão correlacionados com o balanço de radiação, ou seja, a temperatura do ar ascendente, cria uma diferença térmica e um gradiente de pressão ocasionando o deslocamento das massas de ar no sentido de uma zona de maior pressão para uma de menor pressão. Portanto, no período da manhã e da noite, este gradiente de pressão é menor, reduzindo o poder da velocidade do vento (TUBELIS, 1986).

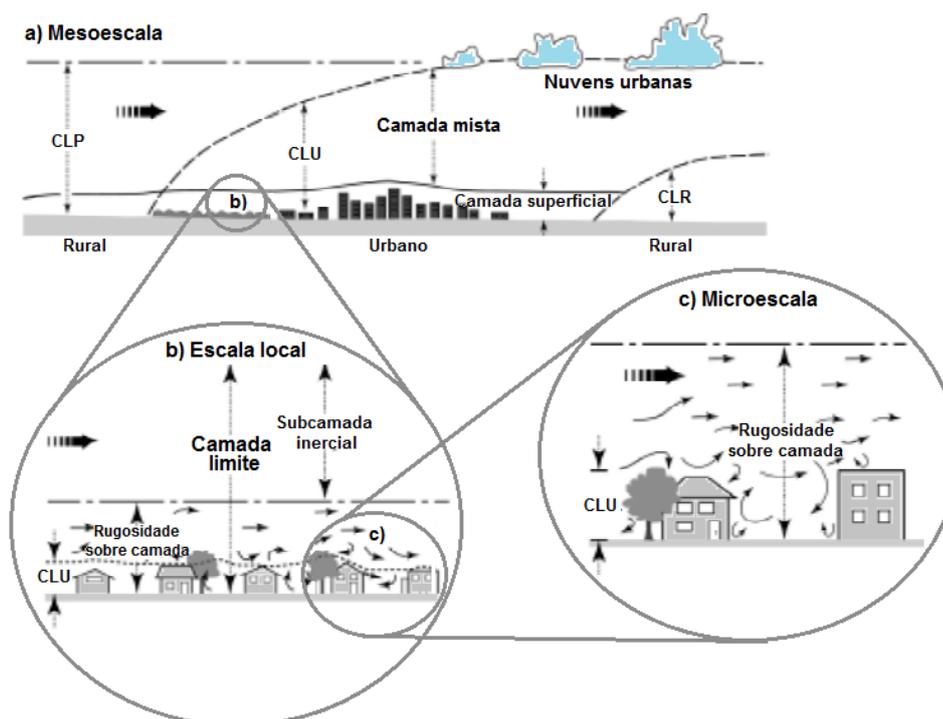


Figura 18: Rugosidade esquematizando escalas climáticas e camadas verticais encontradas em áreas urbanas e arredores, tais como, Camada Limite Planetária – CLP; Camada Limite Urbana – CLU e; Camada Limite Rural – CLR. Fonte: Adaptado de (OKE, 2004).

Para avaliar a velocidade do vento no perfil vertical em uma camada limite (Figura 14), segundo Gasch (2002), *Prandtl* desenvolveu uma expressão empírica, descrita na equação 03, cuja variação da velocidade é dada em função da fricção do vento sob uma determinada altura vertical, próxima à superfície, da constante de rugosidade e do comprimento da rugosidade aerodinâmica (ROBALLO, 2009).

$$v(z) = \frac{v^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (03)$$

Onde,

$v(z)$ = Variação da velocidade com a altura z , em $[m \cdot s^{-1}]$;

v^* = Velocidade de fricção, obtida por medição direta, em $[m \cdot s^{-1}]$;

k = Constante de rugosidade, [adimensional];

z = Altura vertical, em [m] e;

z_0 = Comprimento de rugosidade, em [m].

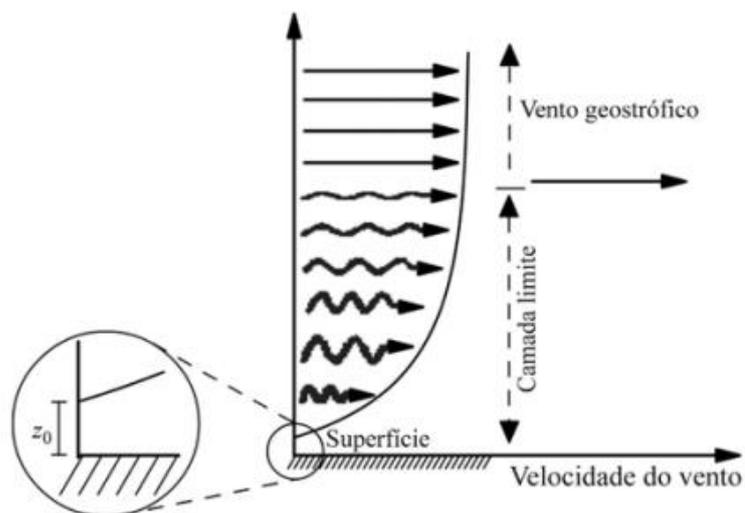


Figura 19: Perfil vertical da velocidade do vento na superfície, passando pela camada limite até a altura do vento geostrófico (trajetória retilínea). Fonte: (MARTINS, 2008).

O ar em movimento produz a energia cinética. O vento possui natureza estocástica e complexa, por isso, observam-se constantes variações na sua direção e velocidade. A quantidade de massa de ar que é deslocada, a uma determinada velocidade, perpendicularmente a uma secção transversal de formato cilíndrico, descreve a passagem da energia cinética, conforme a figura 20. Neste caso, a energia cinética E_c , aumenta com o quadrado da velocidade, de acordo com a equação 04 (PINTO, 2013).

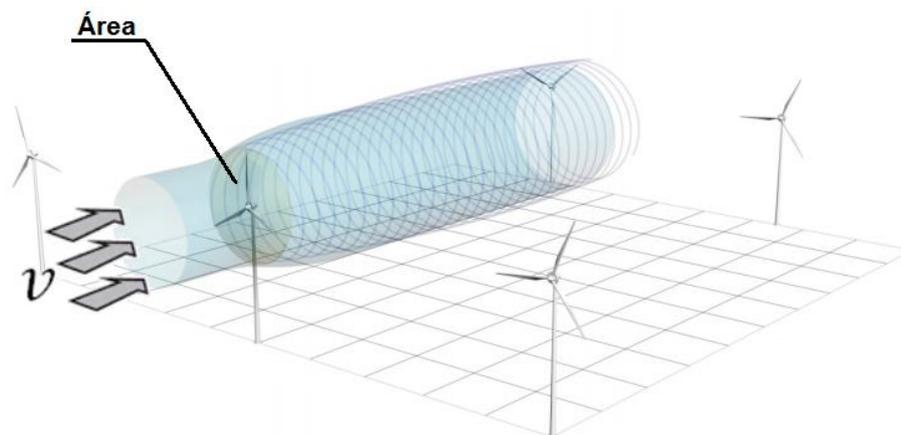


Figura 20: Fluxo de ar em movimento, dada uma velocidade v em um cilindro, passando por um equipamento eólico com rotor de área A . Fonte: Adaptado de (AMARANTE, 2001).

$$E_c = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot m \cdot v^2 \quad (04)$$

Onde,

E_c = Energia cinética, em [Joule];

m = Massa, em [Kg] e;

v = Velocidade do vento, em [$m \cdot s^{-1}$].

Segundo Pinto (2013), quando essa energia é variável com o passar do tempo, ela se torna energia eólica potencial P , como descrita na equação 05, sendo inserida de maneira a descrever melhor o fluxo de potência eólica disponível no vento, que nesta situação, é diretamente proporcional ao cubo da velocidade.

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (05)$$

Onde,

P = Energia eólica potencial, em $[W. m^{-2}]$;

ρ = Densidade do ar, em $[kg. m^{-3}]$;

A = Área, em $[m^2]$.

A densidade do ar é estabelecida em função da pressão atmosférica e da temperatura, associados com a altitude do local. A densidade do ar está representada na equação 06, a seguir.

$$\rho (z) = \frac{P_0}{RT} e^{-\frac{gz}{RT}} \quad (06)$$

Onde,

ρ = Densidade do ar, em $[kg. m^{-3}]$;

z = Altitude, em $[m]$;

P_0 = Pressão atmosférica ao nível do mar, em $[kg. m^{-3}]$;

R = Constante específica do ar, em $[\frac{J}{K} mol]$ e;

T = Temperatura do ar, em $[Kelvin]$.

A parte mais importante de uma turbina eólica é o rotor, que recebe o vento perpendicularmente. Segundo Pinto (2013), estudos desenvolvidos pelo físico alemão *Albert Betz*, fundamentada pelos princípios das leis da continuidade aplicada aos fluidos incompressíveis, criada por *Bernoulli*, apenas 59,3% da energia disponibilizada a uma turbina eólica é realmente utilizável, conforme a equação 07, onde é descrito o valor do coeficiente de potência máxima $C_{P_{m\acute{a}x}}$. Nas melhores das

condições operacionais, as turbinas mais modernas podem chegar a 80% desse limite, colocando-as numa faixa entre 45 a 50% de eficiência, transformando a potência do vento em potência no eixo.

$$C_{P_{\text{máx}}} = \frac{P_{\text{máx}}}{\frac{1}{2}\rho AV^3_0} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (07)$$

Onde,

$C_{P_{\text{máx}}}$ = Coeficiente de potência máxima, em [%];

$P_{\text{máx}}$ = Potência máxima, em $[W \cdot m^{-2}]$ e;

$P = \frac{1}{2}\rho AV^3_0$ = Energia eólica potencial, em $[W \cdot m^{-2}]$.

Considerando um conjunto de pás em um sistema tubular onde a velocidade v_1 do vento na região anterior às pás (montante), v_2 a velocidade do vento no nível das pás e v_3 a velocidade do vento após deixar as pás (jusante), conforme ilustra a figura 21.

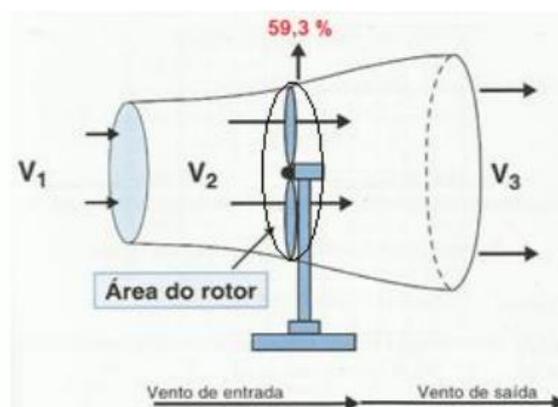


Figura 21: Energia eólica extraída de uma turbina sendo que apenas uma parte da energia provida do vento é, de fato, absorvida pelo sistema. Fonte: Adaptado de (PINTO, 2013).

2.4.3 Turbinas eólicas

As turbinas eólicas são equipamentos aerodinâmicos que absorvem parte da energia cinética oferecida pelos ventos, em condições ideais, convertendo-a em energia mecânica. Para tanto, esta energia potencial pode ser utilizada para diversas finalidades, dentre as mais comuns estão a geração de energia elétrica, utilizando um aerogerador e o bombeamento hidráulico, utilizando um cata-vento.

As turbinas podem ser classificadas conforme a orientação do seu eixo, (Figura 22 e 23), com modelos de turbinas tipo eixos verticais e eixos horizontais, as quais giram as pás ou hélices uniformemente espaçadas entre si. As mais comumente utilizadas são as de eixo horizontal ou *Horizontal Axis Wind Turbine* - HAWT, como também outro tipo denominado de eixo vertical ou *Vertical Axis Wind Turbine* - VAWT (PINTO, 2013).

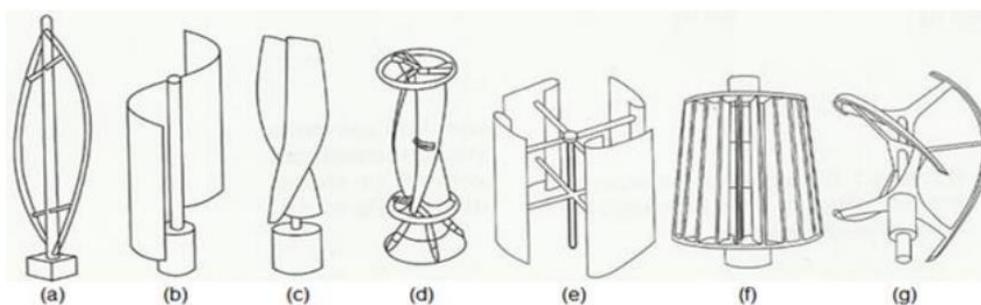


Figura 22: Modelos de turbinas com eixo de rotação vertical, onde (a) Darrieus; (b) Savonius; (c) Solarwind; (d) Helicoidal; (e) Noguchi; (f) Maglev e; (g) Cochrane. Fonte: Adaptado de (PINTO, 2013).

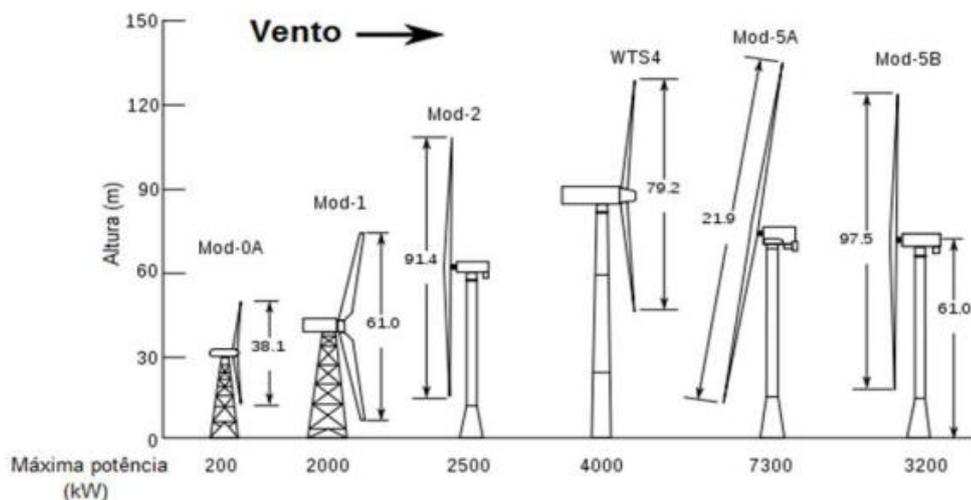


Figura 23: Aerogeradores horizontais, desenhados por Engenheiros da *National Aeronautics and Space Administration* - NASA, entre 1973 e 1988. Fonte: Adaptado de www.windsofchange.dk.

2.5 COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA

A região compreendida entre 30° norte e 30° sul da linha do Equador, compreendendo a maioria dos países da Ásia, África e América Latina possui abundância de uma ou mais fontes renováveis de energia, destacando a solar, eólica, hídrica, biomassa, geotérmica e maremotriz. Para tanto, a questão a ser respondida seria como proceder na combinação destes recursos com as necessidades humanas (RAMAKUMAR, 1993). Cada uma com suas peculiaridades, mais ainda podem ser aproveitáveis entre si. A versatilidade é uma característica das fontes alternativas.

Marinho (2009) simulou a complementaridade entre os regimes eólico e hidrológico para a produção de energia elétrica, utilizando a instalação hipotética de fazendas eólicas, contribuindo com o aproveitamento hidrelétrico de Sobradinho no rio São Francisco, abrangendo 15 municípios em 7 estados da região do nordeste brasileiro, conforme figura 24, sugerindo que a complementaridade sazonal entre as fontes alternativas constitui-se em uma vantagem sistemática a ser explorada, ainda em termos nacionais, pela necessidade de reposição de demanda elétrica em períodos de pouca vazão hídrica.

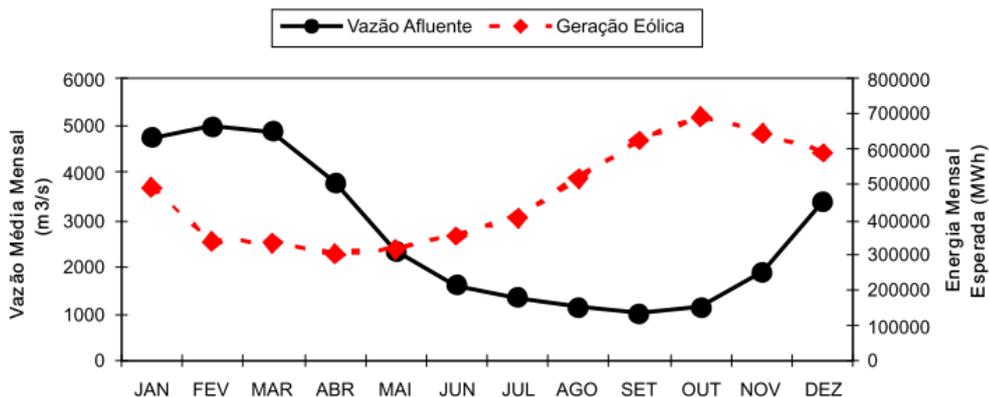


Figura 24: Complementaridade entre as vazões afluentes de Sobradinho com a média mensal estimada da geração eólica. Fonte: (MARINHO, 2009).

Outros autores também admitem a complementaridade entre a energia eólica e a hídrica, em estudos desenvolvidos por Ancona (2003) nos EUA, Canadá e Rússia concluíram que o potencial eólico pode suprir as necessidades complementares de usinas hidrelétricas e vice-versa. Em outra situação, em estudos realizados em Oaxaca no México, Jaramillo (2004) revela que em duas situações, também hipotéticas, a energia eólica pode ser complementada pela hidráulica, essa combinação poderia fornecer aproximadamente 20 MW de energia no sistema elétrico daquela região.

Beluco (2001 e 2003), desenvolveu vários estudos no que diz respeito à complementaridade energética e definiu alguns índices fundamentais para o entendimento desta questão, no caso, uma abordagem entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica, conforme figura 25. Ele descreveu a complementaridade energética como sendo à capacidade de uma ou mais fontes energéticas apresentarem disponibilidades energéticas complementares no tempo, no espaço ou mesmo em ambas as situações. Quando as disponibilidades apresentam características complementares ao longo de uma região define-se então a complementaridade no espaço e quando estas disponibilidades energéticas complementam-se ao longo do tempo em uma determinada região define-se então a complementaridade no tempo (BELUCO, 2001).

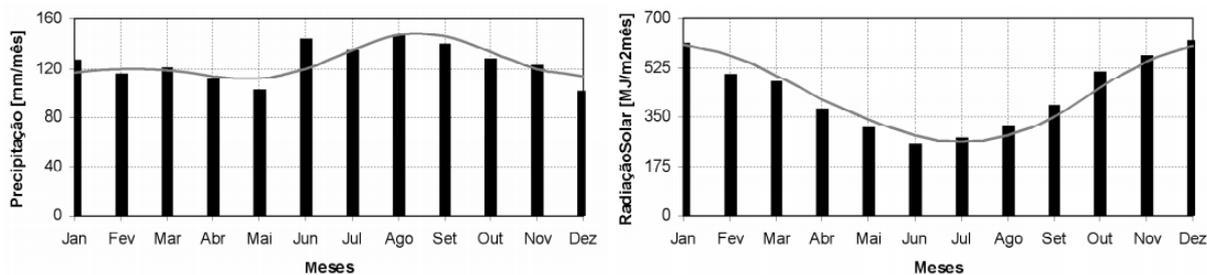


Figura 25: Precipitação média mensal e insolação média mensal, em Taquari - RS, utilizando uma estação meteorológica. Fonte: (BELUCO, 2001).

Diversos trabalhos já foram realizados no sentido de otimizar os aproveitamentos energéticos relativos a fontes alternativas de energias, inclusive com um grau maior de complexidade. Nogueira (2004) definiu em sua tese, que o principal problema associado aos recursos naturais renováveis, diferente dos combustíveis fósseis, confere a sua natureza diluída em períodos sazonais distintos, portanto, são necessários em algumas situações, equipamentos adicionais para convertê-los em formas utilizáveis, por outro lado, as tendências tecnológicas atuais minimizam os empecilhos para as tecnologias renováveis.

2.6 DISPONIBILIDADE SOLAR E EÓLICA

Segundo Macêdo (2002), dependendo do ponto de vista técnico e econômico, assim como das próprias características individuais de cada localidade, uma fonte de energia em particular ou a combinação delas pode ser interessante, usando sistemas híbridos, ocorrendo neste caso a complementaridade entre as fontes disponíveis. O mesmo autor estudou a complementaridade entre a energia solar e eólica para a geração de eletricidade.

Pianezzola (2006) utilizou mapas para identificar geograficamente a complementaridade dos potenciais entre as energias solar e eólica para o estado do Rio Grande do Sul, confirmando que o estado apresenta potencial energético que viabilizaria o uso dos sistemas híbridos fotovoltaico-eólico. Para explorar estas características complementares é necessário conhecer as disponibilidades

energéticas quanto a sua variação de amplitude, respectivamente aos períodos considerados sazonalmente.

Uma metodologia foi aplicada para o estudo da integração das energias renováveis no Arquipélago do Marajó - PA, baseado na verificação dos recursos naturais, em especial a energia solar e eólica, visando o consumo destas fontes e na tecnologia aplicada para seu aproveitamento. A metodologia foi implementada de forma a tornar-se aplicável também para outras regiões a partir de mapas temáticos baseados na interpolação e extrapolação de dados oriundos da base de dados de estações meteorológicas (MONTEIRO, 1999).

Com dados obtidos por Siqueira (2005) em sua pesquisa envolvendo híbridos e disponibilidade energética, Caneppele (2007) implementou um sistema de controle voltado para a geração de energia elétrica, proporcionando o melhor aproveitamento das fontes de energia solar e eólica, extraindo o máximo destas fontes alternativas disponíveis na natureza. Este modelo contou com um controlador baseado na teoria *Fuzzy* para o gerenciamento das energias utilizadas, juntamente com acumuladores de energia, utilizados nas cargas.

Segundo Ozdamar (2005), um sistema baseado na energia solar não pode, por si só, fornecer energia continuamente pela sua relativa indisponibilidade no período noturno, bem como, no inverno, da mesma forma que um sistema baseado na energia eólica não pode, por si só, satisfazer uma carga constante em decorrência da diferença de variabilidade da velocidade do vento no decorrer das horas. Portanto, há grandes problemas em utilizar de forma separada as energias solar e eólica pela descontinuidade individualizada.

Segundo Notton (2011), é possível analisar dados meteorológicos com o intuito de verificar a disponibilidade energética entre as fontes solar e eólica. Este estudo foi realizado no Mar Mediterrâneo, onde 5 locais foram submetidos a uma análise para a quantificação e qualificação de seu potencial energético para a simulação de um sistema híbrido de energia alternativa. Um coeficiente de correlação (CC) foi proposto para avaliar a disponibilidade dos valores horários médios de irradiância solar e velocidade do vento para períodos entre 3 e 5 anos. *Ersa* foi o local que apresentou a melhor complementaridade energética com um

CC= - 0,903, ao contrário de Ajaccio onde foi encontrado o CC= 0,693, sendo que, para uma boa interação entre as disponibilidades energéticas, neste caso, quanto mais o CC se aproximar de - 1, melhor é a complementação entre fontes, conforme a figura 26.

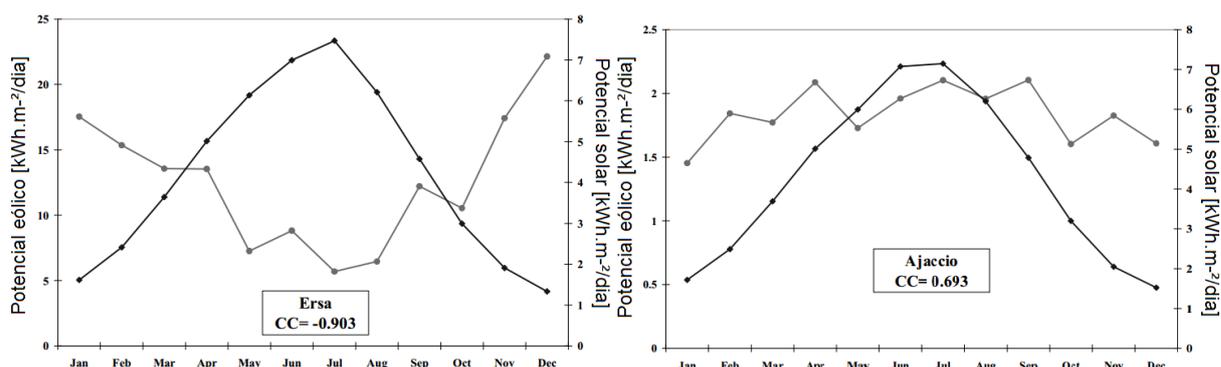


Figura 26: Disponibilidade solar e eólica com médias mensais em *Ersa* e *Ajaccio*, no Mar Mediterrâneo e coeficientes de correlação (CC) entre os dois locais. Fonte: (NOTTON, 2011).

2.7 ANÁLISES DE CORRELAÇÕES

Análise de correlação é a definição de uma associação numérica entre duas variáveis e não implica uma relação necessariamente de efeito e causa, podendo ser uma correlação linear ou não. O coeficiente de correlação linear de *Pearson* mede a intensidade da relação linear, propriamente dita, entre duas variáveis, da mesma forma que mede o grau de relacionamento linear entre os dados. Este coeficiente, baseasse em níveis de correlações oscilando no intervalo compreendido entre - 1 e 1 e, quanto mais próximo desses limites, maior sua força de correlação entre as variáveis em questão (ANDRIOTTI, 2010).

Não significa dizer que o coeficiente sendo igual a zero, as variáveis não possuam correlação entre si, porém significa dizer que entre elas não ocorra uma correlação linear. Uma forte correlação entre duas variáveis também pode ocorrer em função de uma terceira variável que ligue as duas (ANDRIOTTI, 2010). O coeficiente de *Spearman* pode ser usado para dados que não possuam um padrão,

ou dados não-paramétricos que usam somente os postos, também chamados de coeficientes de postos de *Spearman*, esse método não faz qualquer suposição sobre a distribuição de frequência das variáveis (SHIMAKURA, 2012). Esta robustez, segundo Andriotti (2010), não é insensível para relações que não tenham linearidade entre as variáveis.

Campos (1983), afirma que o teste não-paramétrico não especifica condições sobre os parâmetros da população da qual a amostra foi obtida. O emprego deste modo de estatística constitui numa valiosa ferramenta de trabalho pela sua simplicidade e versatilidade, pois quando existem pressuposições, estas são mais brandas do que aquelas associadas com os testes paramétricos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

3.1.1 Caracterização da área experimental

Cascavel possui uma área de $2.091,41 \text{ km}^{-2}$ e clima subtropical mesotérmico superúmido. A temperatura média anual em torno de $19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ com máxima média de $28,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em janeiro e mínima média de $11,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em julho, com ocorrência de geadas. Em 1975, 1979 e 2000 foi verificada ocorrência de neve e “chuva congelada” em 2013. O mês mais frio corresponde a julho, em 1975 quando a temperatura máxima foi de $3,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e mínima de $-4,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A temperatura máxima registrada foi de $37,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$, em março de 2005 (CASCAVEL, 2013). A velocidade média histórica registrada entre 2008 e 2013 é de $3,91 \text{ m.s}^{-1}$ (SIMEPAR, 2013). A estação meteorológica, visualizada na figura 27, utilizada para coleta dos dados das séries temporais está situada na Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, campus de Cascavel. O equipamento está posicionado na cobertura de um prédio, com as coordenadas geográficas - $24^{\circ} 59' 19''$ latitude Sul (S) e - $53^{\circ} 26' 52''$ longitude Oeste (W), com 763 m acima do nível do mar.



Figura 27: Mapa de localização da estação meteorológica utilizada. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.1.1 Índice pluviométrico e temperatura ambiente

Os valores dos índices pluviométricos médios mensais foram instáveis, variando entre mínima de 2,00 mm em agosto de 2012 e máxima de 304,80 mm em junho de 2013. O menor índice pluviométrico sazonal acumulado corresponde a 620,00 mm e o maior a 1.040,76 mm, inverno e outono respectivamente. Para o ano 1 foi verificado um maior índice de precipitação pluviométrica com 1.893,20 mm e o ano 2 com 1.724,54 mm.

Os índices de temperaturas mensais médias variaram entre mínima de 16,08 °C no mês de julho e máxima de 23,87 °C em dezembro. O menor índice de temperatura ambiente sazonal corresponde a 18,11 °C e o maior a 23,66 °C, inverno e verão respectivamente. A média de temperatura ambiente verificada entre o ano 1 e 2 foi 20,48 °C. Os índices pluviométricos e de temperatura médios estão apresentados na figura 28, a seguir.

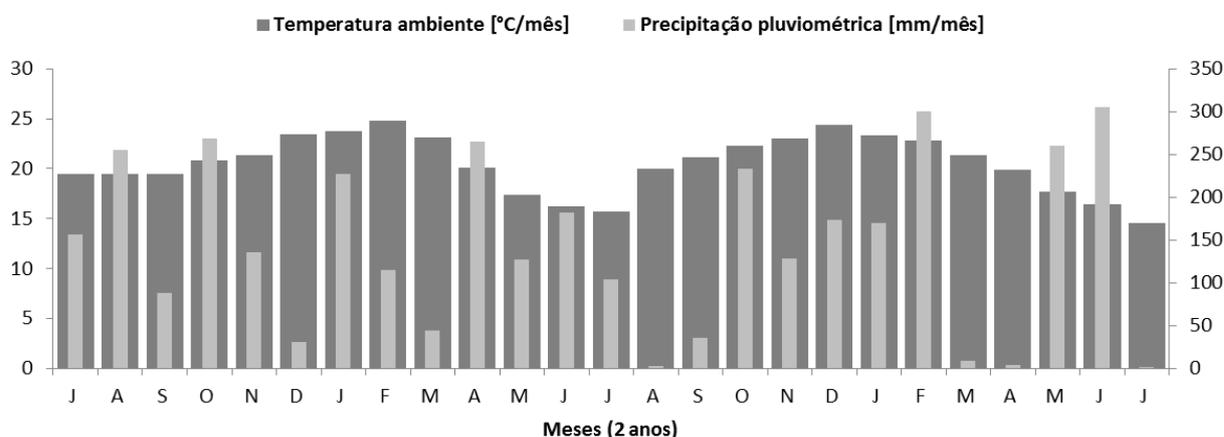


Figura 28: Índices de precipitação pluviométrica e temperatura ambiente.

Na figura 29, estão apresentados os índices pluviométricos horários com suas respectivas direções predominantes. A direção vetorial predominante das precipitações pluviométricas no ano 1 está localizada na região compreendida entre no ponto subcolateral Leste-nordeste (ENE). No ano 2, observa-se a mudança da direção predominante para ponto colateral Nordeste (NE), quanto a intensidade da

precipitação, pode-se notar que no ano 1 as maiores quantidades originam-se do ponto cardinal Sul (S) e do ponto colateral Sul-oeste (SO).

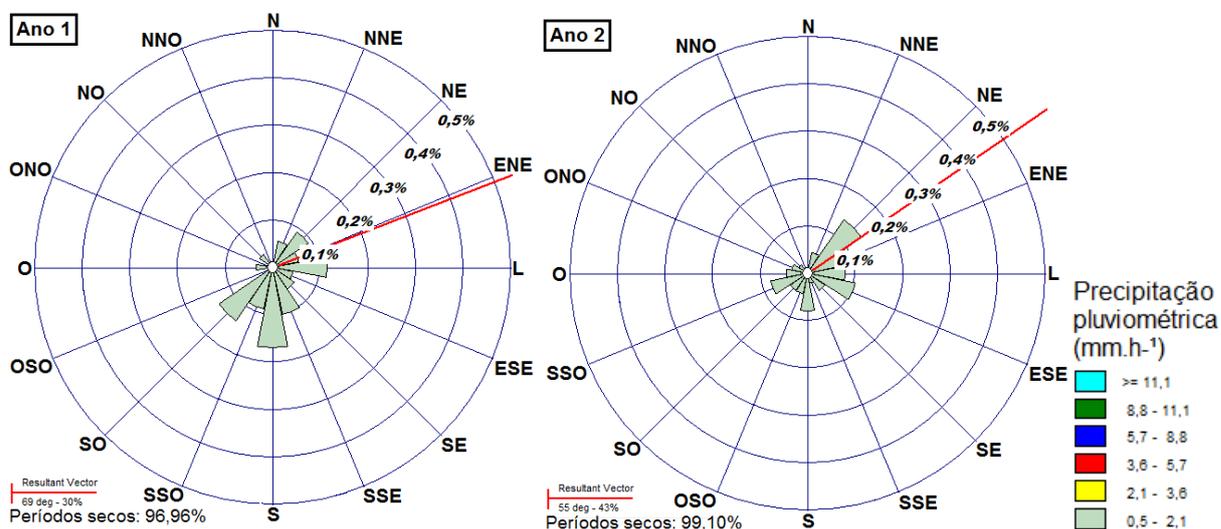


Figura 29: Rosa dos ventos com intensidade horária das precipitações pluviométricas para os anos 1 e 2.

3.1.2 Medições meteorológicas

3.1.2.1 Aquisição de dados

As medições meteorológicas foram disponibilizadas pela estação meteorológica *Hobo U30 Station*, que possui um sistema de registro de 15 canais. Os dados são transmitidos por meio de comunicação *Wi-Fi* para acessar os dispositivos remotamente via internet. Os equipamentos que a compõem são ilustrados na figura 30, bem como, o *Data logger* para a aquisição dos dados e seus principais componentes, na figura 31.

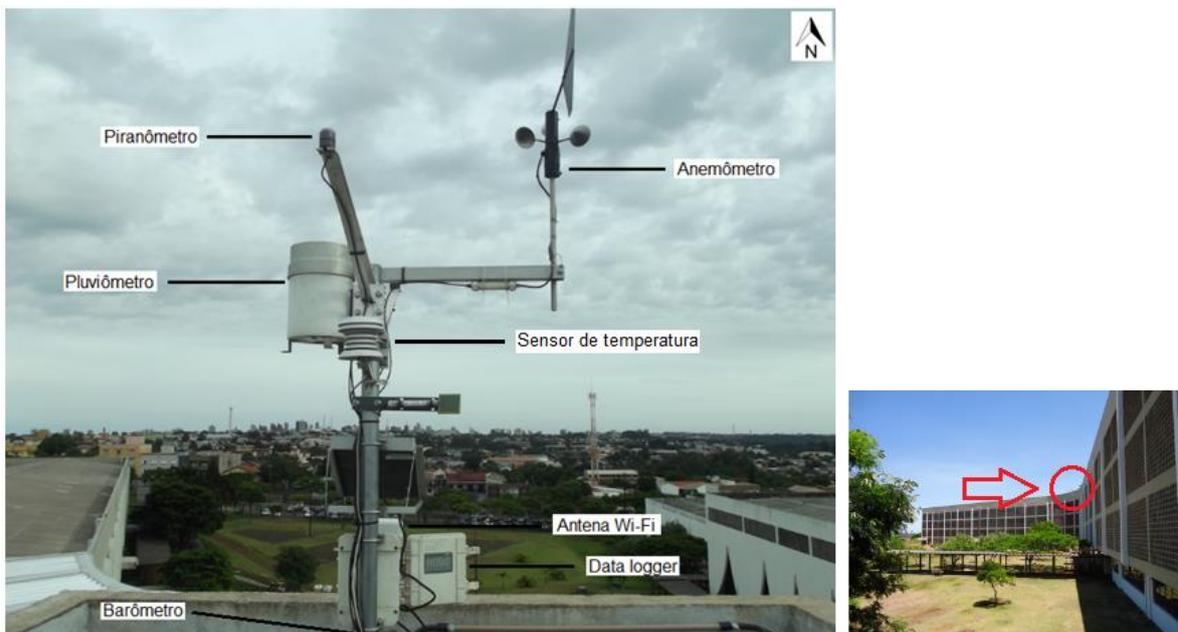


Figura 30: Estação meteorológica *Hobo U30 Station Wi-Fi* e localização do equipamento acima do prédio. Fonte: Elaborado pelo Autor.

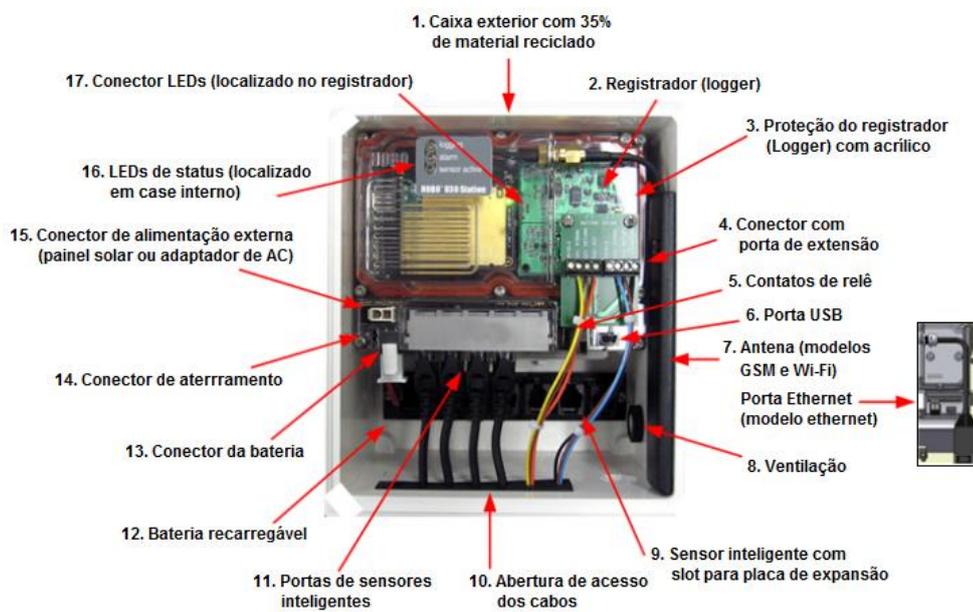


Figura 31: *Data logger Hobo U30*. Fonte: Adaptado de (www.hobolink.com).

3.1.2.2 Sensor de radiação solar global

A radiação solar global, ou seja, a soma da radiação solar direta e radiação solar difusa foi medida por um piranômetro *S-LIB-M003*, conforme ilustra a figura 32. O sensor informa a intensidade de luz média durante um intervalo determinado pelo usuário de no mínimo 1 segundo. O sensor de radiação solar é um sensor de luz (pirômetro silício) com uma faixa de medição entre 0 e 1.280 W.m^{-2} em uma faixa espectral de 300 a 1100 nm. As especificações do piranômetro estão descritas na tabela 01.

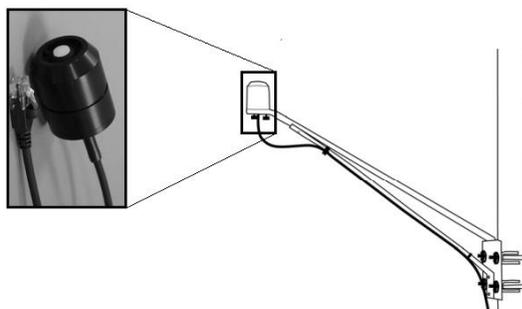


Figura 32: Piranômetro *S-LIB-M003*. Fonte: www.hobolink.com.

Tabela 01: Especificações técnicas do piranômetro *S-LIB-M003*

Especificações	Descrições
Intervalo de medição	0-1280 W.m^{-2}
Faixa espectral	300-1100 nm
Precisão	Entre 10 W.m^{-1} ou $\pm 5\%$
Precisão angular	Erro Azimutal $< \pm 2\%$ a 45° de rotação vertical.
Resolução	1.25 W.m^{-2}
Faixa de temp. operacional	-40°C a $+75^\circ\text{C}$
Avaliação ambiental	Resistência a intempéries
Carcaça	Alumínio anodizado com difusor em acrílico.
Dimensões	4.1 x 3.2 cm (altura e diâmetro, respectivamente).
Massa	120 gramas
Bits por amostra de dados	10 por canal, sendo 1 canal.

Fonte: www.hobolink.com.

3.1.2.3 Sensor de velocidade de vento

Para as medições das variáveis do vento foi utilizado o anemômetro S-WCA-M003. O equipamento está instalado em torno de 18 metros acima da superfície (Figura 33). Os “copos” captam o vento e o sensor acumula os dados a cada 3 segundos até que sejam registrados os dados de velocidade do vento, sendo que o maior registro é contabilizado nesse intervalo de tempo. Da mesma forma para o registro dos dados de rajada e direção, sendo que o último parâmetro é calculado por meio média dos vetores em cada intervalo de 3 segundos. As especificações do anemômetro estão relacionadas na tabela 02.



Figura 33: Anemômetro S-WCA-M003. Fonte: Autor.

Tabela 02: Especificações técnicas do anemômetro S-WCA-M003

Especificações	Descrições	
	Velocidade do vento/ rajada	Direção do vento
Faixa de medição	0-44 m.s ⁻¹	0-358°, sendo 2° de faixa morta
Precisão	± 0.5 m.s ⁻¹ ± 3% 17-30 m.s ⁻¹ ± 4% 30-44 m.s ⁻¹	± 5°
Resolução	0,19 m.s ⁻¹	1,4°
Vel. máx. de sobrevivência	54 m.s ⁻¹	
Faixa de temp. operacional	-40°C a +75°C	
Carcaça	Carcaça de alumínio anodizado, copos moldados por injeção de plástico, parafusos de aço inoxidável, base Acetal, e haste de fixação de alumínio anodizado preto.	
Raio de giro	108 mm	± 305 mm
Dimensões	317 x 419 x 12.7 mm (altura, largura e diâmetro, respectivamente).	
Massa	± 700 gramas	
Bits por amostra de dados	8 por canal, em um total de 3 canais.	

Fonte: www.hobolink.com.

3.1.2.4 Sensor de pressão barométrica

A pressão barométrica possui correlação direta com as variáveis da energia eólica, mesmo sendo em grau inferior às demais, interfere correlacionando-se com outros parâmetros. O sensor de pressão barométrica S-PB-CM50 foi utilizado para realizar essa medição (Figura 34). O sensor inteligente verifica a média dos intervalos de amostragem e registra-os. A média de medição é útil para reduzir a falha de leitura dos dados. As especificações do sensor de pressão estão relacionadas na tabela 03.



Figura 34: Sensor de pressão barométrica S-PB-CM50. Fonte: Autor.

Tabela 03: Especificações técnicas do sensor de pressão barométrica S-BPB-CM50

Especificações	Descrições
Faixa de medição	660-1070 mbar
Precisão	$\pm 3,0$ mbar (25° C); erro máximo de $\pm 5,0$ mbar (-40° C a +70° C).
Resolução	0,1 mbar
Faixa de temp. operacional	-40° a +70°C
Dimensões	6,4 x 5,1 cm (diâmetro e altura, respectivamente).
Massa	96 gramas
Canais de dados	1 canal

Fonte: www.hobolink.com.

3.1.2.5 Sensor de Temperatura

Todos os parâmetros do sensor de temperatura S-THB-M00x (Figura 35), são armazenados dentro do sensor inteligente, comunicando automaticamente as

informações de configuração para o *Data logger*, da mesma forma que os demais sensores, sem qualquer configuração de programação ou calibração do usuário. As especificações do sensor de temperatura estão relacionadas na tabela 04.

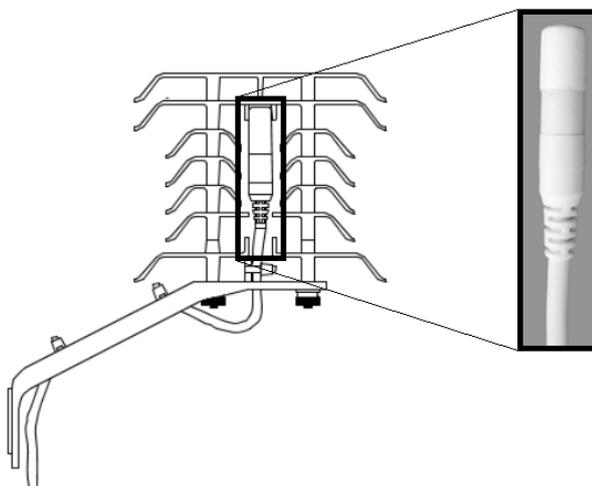


Figura 35: Carcaça protetora em um corte transversal e sensor de temperatura S-THB-M00x. Fonte: Adaptado de www.hobolink.com.

Tabela 04: Especificações técnicas do sensor de temperatura S-THB-M00x

Especificações	Descrições
Faixa de medição	-40°C a 75°C
Precisão	0.2°C acima de 0° a 50°C
Resolução	0.02°C em 25°C
Tempo de resposta	5 minutos no ar que move em 1 m.s ⁻¹
Faixa de temp. operacional	-40°C a +75°C
Carcaça	Revestimento com cabo de PVC
Dimensões	10 x 35 mm (largura e comprimento, respectivamente).
Massa	110 gramas
Canais de dados	2 canais

Fonte: www.hobolink.com.

3.1.2.6 Sensor pluviométrico

O sensor pluviométrico inteligente modelo MAN-S-RGX, conforme a figura 36, é projetado para trabalhar com o *Data logger* da estação meteorológica, sendo configurado automaticamente, sem a necessidade de qualquer programação feita pelo usuário, com um sistema chamado de “*plug and play*”. O pluviômetro funciona

com um tombamento de balde simples e preciso. As especificações do sensor pluviométrico estão relacionadas na tabela 05.



Figura 36: Sensor pluviométrico MAN-S-RGX. Fonte: Autor.

Tabela 05: Especificações técnicas do sensor pluviométrico MAN-S-RGX

Especificações	Descrições
Faixa de medição	0 a 127 mm por hora.
Precisão	$\pm 1,0\%$ até 20 mm/ hora.
Faixa de temp. operacional	0 ° C a 50 ° C, máxima de - 40 ° a 75 ° C.
Carcaça	Reservatório de alumínio de 15,24 cm.
Dimensões	22,8 x 15.4 cm (altura e diâmetro, respectivamente).
Massa	1 kg
Canais de dados	1 canal.

Fonte: www.hobolink.com.

3.1.3 Rosa dos ventos

O *WRplot View* é um software desenvolvido para gerar informações estatísticas e gráficas das variáveis eólicas e pluviométricas. A rosa dos ventos mostra a frequência de ocorrência de ventos em cada um dos setores especificados, direção e classes de velocidade para um determinado período de tempo e local (JESSE, 2011). O software *WRplot View* foi utilizado para analisar o comportamento das séries temporais em intervalos horários, extraídos de planilha eletrônica. Estes gráficos foram confeccionados utilizando alguns parâmetros, tais como, a velocidade e direção angular predominante do vento e precipitação pluviométrica. Para melhor visualização das informações contidas na rosa dos ventos foram indicadas

dezesseis direções diferentes em pontos cardeais, colaterais e subcolaterais. Estes gráficos também são capazes de descrever a influência da direção vetorial na disponibilidade energética baseada no comportamento do vento nos períodos observados. Os períodos de calmarias foram determinados pelo *software* e estão no intervalo compreendido entre 0 e $2,1 \text{ m.s}^{-1}$.

3.2 MÉTODOS

Os dados coletados automaticamente pela estação meteorológica foram inseridos em planilha eletrônica em intervalos de cinco minutos. Para transformá-los em informações pertinentes aos interesses da pesquisa proposta foram postos para intervalos maiores, visto que, as informações horárias descreveriam de forma mais qualitativa e ainda precisa, o comportamento das variáveis de irradiância solar e velocidade de vento. Para os dados de irradiância foram considerados que o período de um dia teriam 12 horas de insolação, para facilitar os cálculos envolvendo a disponibilidade solar, uma vez que, este seria um intervalo médio. Para os dados de velocidade de vento, calculou-se a disponibilidade energética para uma área de uma unidade quadrada de um rotor para efeito quantitativo da energia eólica disponível.

3.2.1 Series temporais

Os diversos tipos de variações temporais são de fundamental importância, do ponto de vista do aproveitamento das energias solar e eólica, haja vista, as variações diárias, anuais, sazonais e de curta duração. Esta última, como no caso da velocidade do vento (MACÊDO, 2002).

Após coleta automática dos dados pela estação meteorológica, os 17.544 intervalos horários (anteriormente em intervalos de 5 minutos) de pressão barométrica, temperatura ambiente, precipitação pluviométrica, irradiância solar, velocidade e direção do vento foram trabalhados em planilha eletrônica. Os valores médios foram discutidos com o intuito de analisar as disponibilidades das energias

solar e eólica ocorridas nestas distintas variações de tempo, para uma discussão horária, diária, mensal, anual e estacionária. O período observado compreende um intervalo de tempo iniciado no dia 3 de julho de 2011 a 3 de julho de 2013 ou 2 anos de dados. Para as discussões relativas ao comportamento das séries temporais, as disponibilidades solar e eólica e a análise dos coeficientes de correlação foram postas separadamente para avaliar a variações ocorridas em cada série observada.

3.2.2 Análise dos dados de disponibilidade energética

Com os dados meteorológicos da irradiância solar, calculou-se a Energia Solar Disponível ESD, descritas pelas equações 08 e 09.

$$\mathbf{ESD} = \sum_{i=1}^n \mathbf{l}_h \times \mathbf{t} \quad (08)$$

$$\mathbf{t} = \frac{1}{12} \mathbf{h} \quad (09)$$

Onde,

ESD = Energia Solar Disponível, em [Wh];

n = Enésima média do conjunto de dados, em [unidade];

l_h = Radiação global, em [Wh. m⁻²] e;

t = Tempo, em [horas];

Com os dados meteorológicos da velocidade do vento, calculou-se a Energia Eólica Disponível EED, contida no vento e descrita pelas equações 05 e 06 (item 2.4.2) em 10 e 11, em função do tempo para o intervalo horário.

$$\mathbf{EED} = \sum_{i=1}^n \mathbf{P} \times \mathbf{t} \quad (10)$$

$$\mathbf{t} = \frac{1}{12} \mathbf{h} \quad (11)$$

Onde,

EED = Energia Eólica Disponível, em [Wh];

n = Enésima média do conjunto de dados, em [unidade];

P = Energia potencial, em [Wh. m⁻²] e;

t = Tempo, em [horas].

3.2.3 Análise de correlação das energias disponíveis

Para a verificação do grau de correlação entre as variáveis solar e eólica foi utilizado o coeficiente de correlação não-paramétrico de *Spearman*, expresso pela equação 12. Este coeficiente possui a classificação dos níveis de correlação que oscilam entre -1 e 1, conforme a tabela 06.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^d-1)} \quad (12)$$

Onde,

ρ = Coeficiente de Correlação de Spearman, [adimensional];

d_i = Diferença entre cada posto de valor correspondente de X e Y, em [Wh. m⁻²] e;

n = Número de pares dos valores, em [unidade].

Tabela 06: Níveis do coeficiente de *Spearman*

Negativa	Níveis	Positiva
-1	Perfeita	1
(-0,9 a -1)	Muito forte	(0,9 a 1)
(-0,6 a -0,9)	Forte	(0,6 a 0,9)
(-0,3 a -0,6)	Regular	(0,3 a 0,6)
(0 a -0,3)	Fraca	(0 a 0,3)
0	Nula	0

Fonte: Adaptado de (ANDRIOTTI, 2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPORTAMENTO DA IRRADIÂNCIA SOLAR E VELOCIDADE DO VENTO

4.1.1 Irradiância solar

O comportamento da irradiância solar, segundo Tubelis (1986), está intimamente correlacionado com a nebulosidade e a variação anual de temperatura, determinada basicamente pelo curso da Terra em sua rotação e translação em torno do Sol, sugerindo que os índices de precipitação pluviométricos apresentados, interferem igualmente na disponibilidade energética, haja vista, as reflexões radioativas causadas pelas massas de ar (nuvens) no momento das precipitações.

Para efeitos comparativos, foram utilizadas as médias históricas de 5 anos, obtidas da estação meteorológica do SIMEPAR, com localização geográfica - 24° 53' latitude Sul (S) e - 53° 32' longitude Oeste (O), com 719 metros acima do nível do mar, permitindo observar o comportamento principalmente no que tange às distinções entre as estações do ano. Os gráficos de irradiâncias munidos destes índices revelam a interação para o estudo interanual e intersazonal, discutidos a seguir.

4.1.1.1 *Comportamento interanual*

Os valores da irradiância solar média, observados nos anos 1 e 2 estão apresentados na figura 37. As irradiâncias mínimas e máximas, ocorreram no ano 2. Os meses de julho, setembro, outubro, novembro, janeiro, abril, maio e junho, tiveram valores médios muito próximos. Pela correlação com a nebulosidade, ocasionada pela precipitação pluviométrica, analogamente aos valores das médias de irradiância solar dos anos 1 e 2, os meses de junho, julho e agosto tiveram uma maior interação com este parâmetro físico. Entre os meses de dezembro e janeiro denotou-se as maiores médias de irradiância solar, e as menores em julho e junho,

haja vista as variações estacionárias em função da declinação solar característica decorrentes no ano. Os valores médios de irradiância solar observados no ano 1 foi de $382,43 \text{ W.m}^{-2}$ e no ano 2 de $365,52 \text{ W.m}^{-2}$ foram superiores na maioria das médias acumuladas dos meses nos últimos 5 anos.

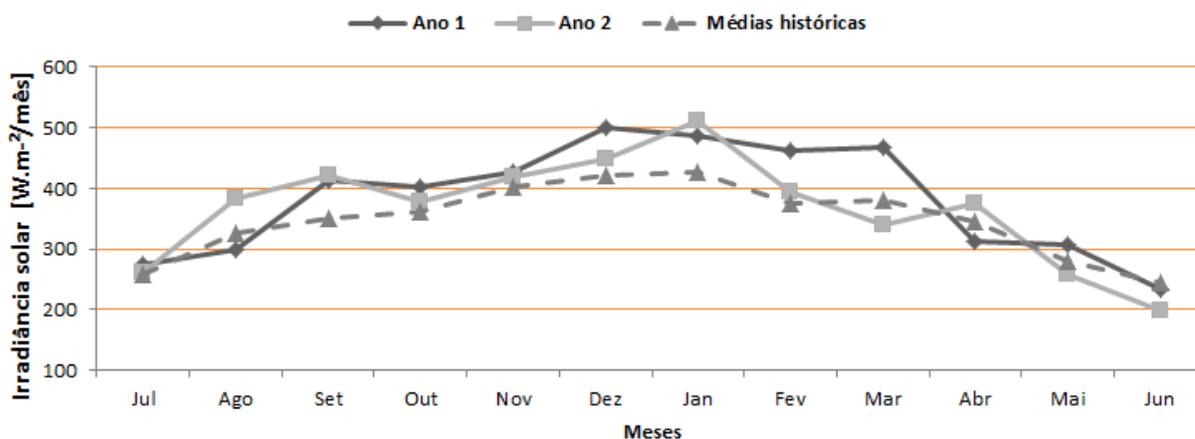


Figura 37: Irradiância solar média entre os anos 1 e 2, e as médias históricas de 5 anos.

O comportamento interanual da irradiância solar média horária dos anos 1 e 2, conforme figura 38, descrevem as médias do ano 1, sobrepondo-se suavemente as médias do ano 2 na primeira metade do dia, ocorrendo o inverso, na segunda metade. O ano 1 possui a maior média horária entre as irradiâncias, apresentando $656,00 \text{ W.m}^{-2}$, seguido do ano 2 com $635,63 \text{ W.m}^{-2}$. No intervalo das 12 horas, observasse sempre o ápice característico da irradiância solar, ao contrário dos demais momentos do dia, visto que esta diferença está correlacionada com as variações do balanço de radiação em função da trajetória diária do sol acima do horizonte.

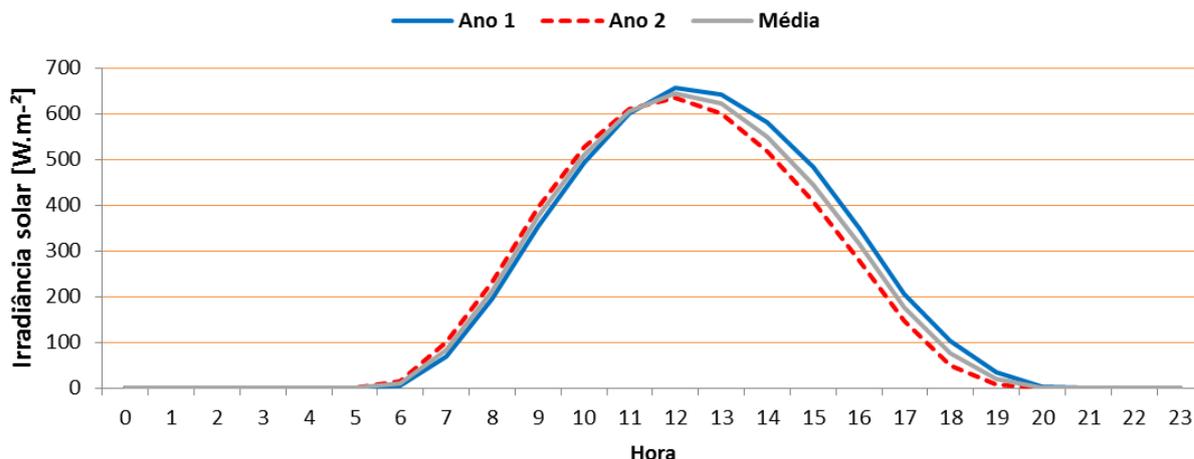


Figura 38: Irradiância solar média horária entre os anos 1 e 2 e a média.

4.1.1.2 Comportamento Intersazonal

Os valores da irradiância solar média, observados no período de 2 anos estão apresentados na figura 39. No comportamento intersazonal as médias de junho e julho (inverno) são as menores, e nos meses de dezembro e janeiro (verão), as maiores, caracterizando um comportamento estacionário típico. A irradiância solar possui os valores de $216,31 \text{ W.m}^{-2}$ e $499,48 \text{ W.m}^{-2}$, mínima e máxima, respectivamente. A média observada para este intervalo é $372,69 \text{ W.m}^{-2}$. Pela correlação com a nebulosidade, os valores de irradiância solar tiveram interferência com médias de precipitação pluviométrica, principalmente nos meses de outubro, maio e junho.

Entre os meses de dezembro e janeiro têm-se as maiores médias de irradiância solar, haja vista as variações estacionárias em função da declinação solar. As médias estacionárias observadas no intervalo de 2 anos, comparadas com as médias históricas dos últimos 5 anos, distinguiram-se de forma mais acentuada na primavera com $431,64 \text{ W.m}^{-2}$ e no verão com $446,41 \text{ W.m}^{-2}$, ao contrário do inverno com $325,85 \text{ W.m}^{-2}$ e no outono com $305,58 \text{ W.m}^{-2}$, ocorrendo uma paridade entre estas duas últimas.

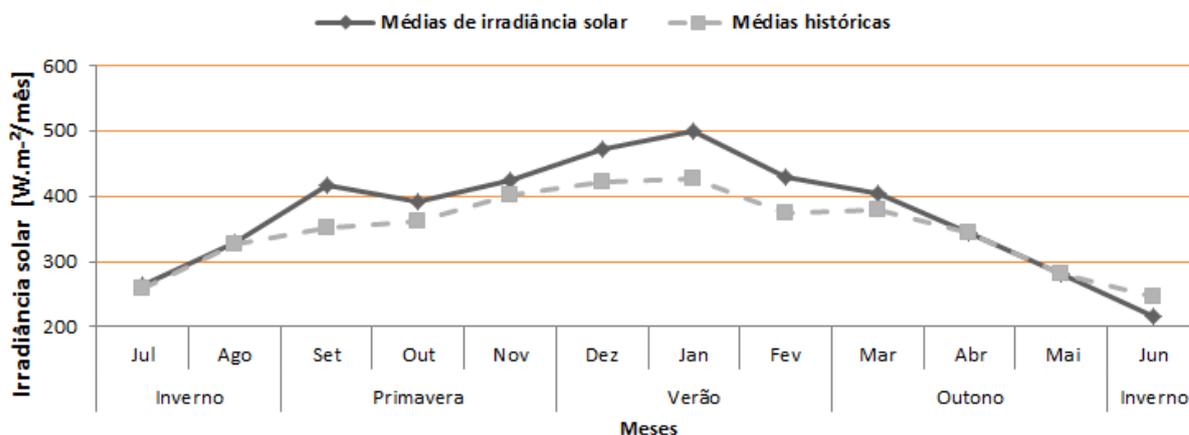


Figura 39: Irradiância solar média de 2 anos e as médias históricas de 5 anos.

O comportamento intersazonal da irradiância solar média horária diária das estações do ano, conforme a figura 40, descrevem as relações horárias que as diferenciam-se. As médias de irradiância solar horárias no inverno e outono apresentam-se parelhas ao longo do dia, da mesma forma que no verão e primavera. Dias mais curtos podem ser percebidos no inverno e outono, enquanto dias mais longos ocorrem na primavera e verão e, mesmo as amplitudes entre os pares são notados.

A média horária diária para o período é de $647,90 \text{ W.m}^{-2}$, sendo que o verão possui a maior média entre as estações, com $777,17 \text{ W.m}^{-2}$, seguido da primavera, inverno e outono, com $749,42$, $545,53$ e $519,46 \text{ W.m}^{-2}$, respectivamente. No intervalo das 12 horas, tem-se sempre o ápice da irradiância solar, da mesma forma que no comportamento interanual, conforme as variações diárias do balanço de radiação solar na superfície em função da trajetória diária do sol acima do horizonte, a própria declinação solar também pode ser percebida pela diferença estacionária ao longo de cada período específico.

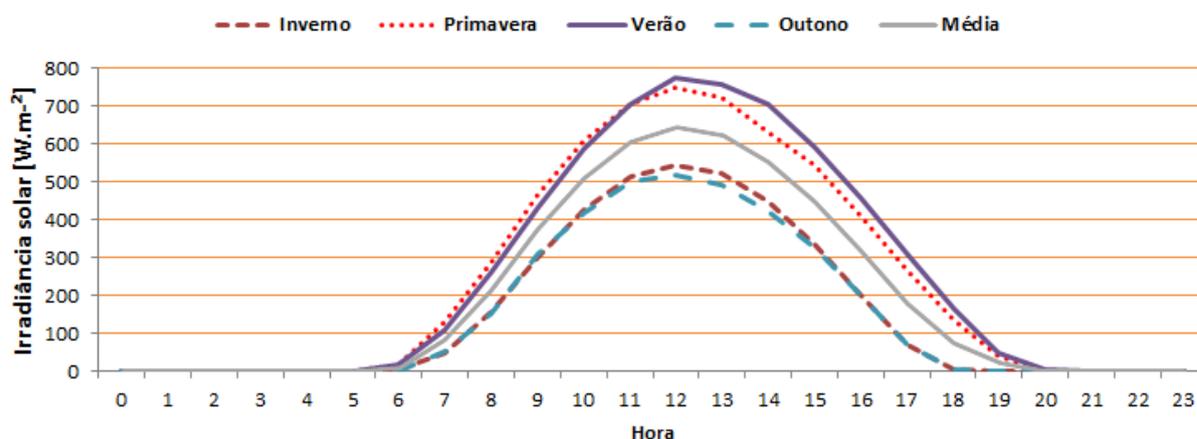


Figura 40: Irradiância solar média horária sazonal de 2 anos.

4.1.2 Velocidade de vento

Os fatores responsáveis pelos valores da velocidade de vento originam-se das diferenças de temperaturas e gradientes de pressão nos intervalos observados, indicando que em algumas situações, por meio das características estocásticas, ventos não uniformes, porém com alguma predominância em sua direção típica são notados no transcorrer dos períodos em estudo. Não é objetivo deste trabalho, descrever a velocidade do vento com fenômenos climáticos como Frentes Frias (FF) ou mesmo a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), dentre outros fenômenos atmosféricos, muito embora, ocorram em grande parte do território brasileiro, incluindo a região sul do país, interferindo no comportamento, de algumas das variáveis meteorológicas (temperatura, pressão, velocidade e direção do vento, principalmente).

Na abordagem a seguir estas FF são denotadas, principalmente nos meses de março a maio de 2013, não interferindo nas médias mensais, porém corroborando para a disponibilidade da energia eólica. Para efeitos comparativos, foram postas algumas médias históricas mensais relativas a 5 anos de observações de dados anemométricos da estação meteorológica do SIMEPAR em Cascavel a 10 metros de altura, com o intuito analisar as características comportamentais da velocidade do vento no tempo observado, principalmente para uma discussão sazonal.

As diferenças na quantidade, direção e intensidade do vento no Paraná, correspondem ao aquecimento diferencial das massas de ar que nos meses de verão, diminui a pressão atmosférica do litoral em direção ao continente. No interior ocorre também aquecimento durante o dia, ocorrendo uma diminuição da pressão atmosférica (MAACK, 2012). No mais, a existência de uma região de baixa pressão à Noroeste do estado, conforme Maack (2012), faz com que originem a formação de ciclones condutores de chuvas com ventos norte e noroeste sobre o estado, explicando a direção predominante encontrada nos gráficos das rosas dos ventos. A origem de ventos fortes, segundo Tubelis (1986) é relativa à dependência dos centros formadores de alta pressão decorrentes do Atlântico e do Pacífico.

4.1.2.1 Comportamento interanual

Os valores da velocidade mensal média do vento, observados no ano 1 e 2, estão apresentados, de acordo com a figura 41. As amplitudes das velocidades para o ano 1 correspondem a 2,46 e 3,89 m.s^{-1} , mínima e máxima, respectivamente. Para as amplitudes do ano 2 tem-se 0,35 e 3,81 m.s^{-1} , mínima e máxima, respectivas. O ano 1 apresentou a maior média de velocidade com 2,94 m.s^{-1} comparada ao ano 2 com 1,79 m.s^{-1} , porém estes dois anos com valores abaixo das médias históricas de 5 anos que foi de 4,06 m.s^{-1} .

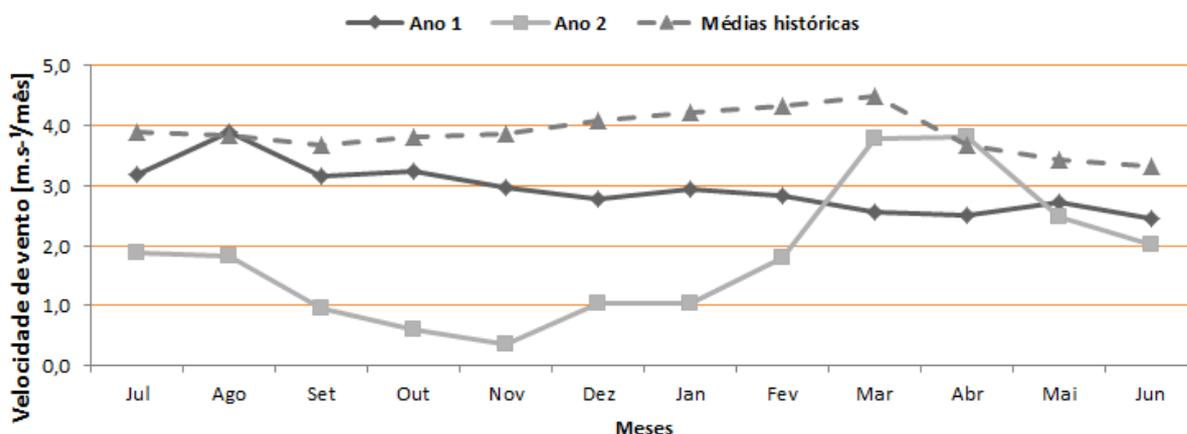


Figura 41: Velocidade média mensal do vento entre os anos 1 e 2 e as médias históricas de 5 anos.

O comportamento interanual da velocidade de vento média horária das estações para os anos 1 e 2, estão postas na figura 42. A média mais elevada é conferida ao ano 1, com uma média de $3,79 \text{ m.s}^{-1}$ e, para o ano 2 de $2,75 \text{ m.s}^{-1}$. Os ápices das velocidades horárias são às 10 horas, sendo que no ano 2 a média máxima concentra-se em 10 e 11 horas. As médias horárias do ano 1 e 2 são caracterizadas por elevações e quedas horárias relativamente abruptas. O tendencioso aumento das maiores médias de velocidade de vento entre as horas intermediárias do dia podem ser explicados, segundo Tubelis (1986), pelo aquecimento diferenciado da superfície do solo neste período, que ascende o ar mais quente, trocando de lugar com uma massa de ar mais fria, gerando maior diferença térmica e gradiente de pressão, deslocando-as. Por outro lado, durante a noite estes gradientes de pressão e temperaturas são menores e, ao contrário, a movimentação das massas de ar (velocidade de vento) também são menores.

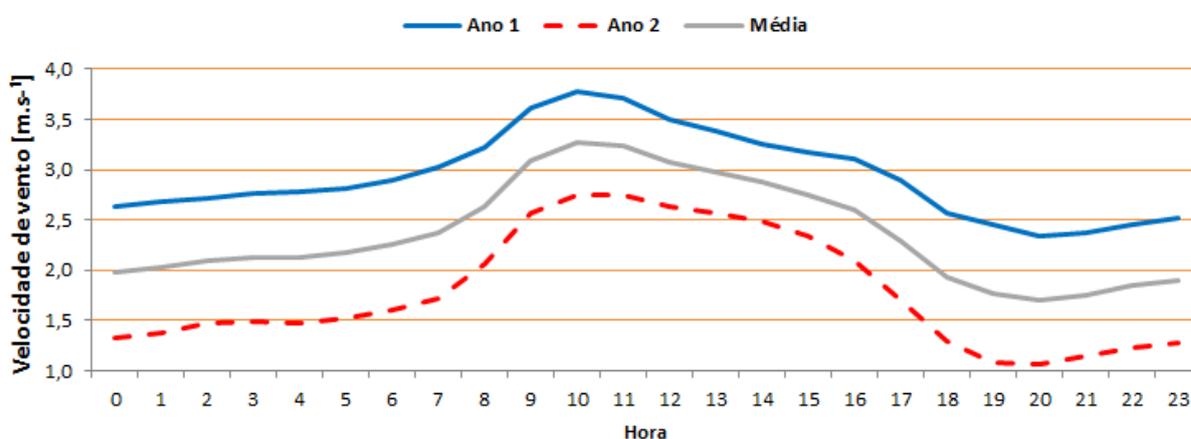


Figura 42: Velocidade média horária do vento entre os anos 1 e 2.

Os gráficos da figura 43, ilustram os parâmetros direcionais da velocidade média horária do vento para os anos 1 e 2. No ano 1 a direção predominante encontra-se no ponto subcolateral Leste-nordeste (ENE), e no ano 2 no colateral Nordeste (NE). Apenas no ano 2 encontram-se velocidades médias iguais ou acima dos 11 m.s^{-1} , localizadas no ponto cardinal Norte (N) e subcolateral Norte-nordeste (NNE). As maiores ocorrências de calmarias, compreendendo velocidades no intervalo de 0 a $2,1 \text{ m.s}^{-1}$, ocorreram no ano 2 com um percentual de 37,41% dos

dados observados para este período. Pelo gráfico das rosas dos ventos, denota-se que o ano 2 descreve as maiores diferenças entre as menores e maiores médias de velocidade.

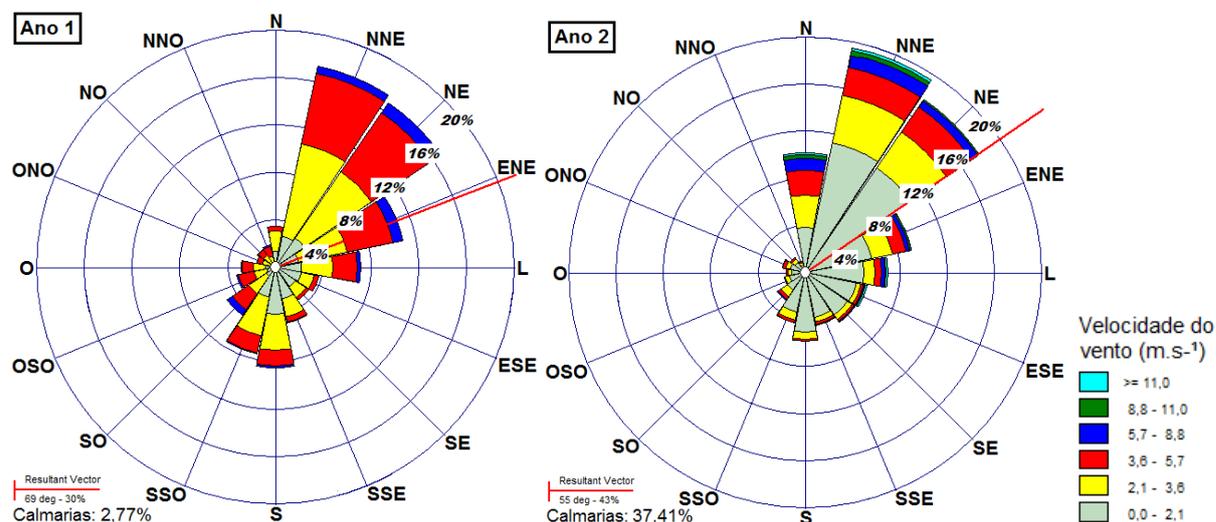


Figura 43: Rosa dos ventos das velocidade médias interanuais e direção predominante, para uma altura de 18 metros.

4.1.2.2 Comportamento intersazonal

Segundo Nobel (1983), os regimes dos ventos são sazonais, uma vez que, a direção e velocidade são impostas à medida que a intensidade da radiação muda no decorrer das estações do ano. Os valores da velocidade média mensal do vento, observados no período de 2 anos, intercalados por estações do ano, estão apresentados na figura 44, onde é percebida sua característica estocástica e não uniforme, assumindo na maioria deste intervalo de tempo, valores sempre abaixo das médias históricas. As amplitudes das velocidades médias mensais para este período observado estão entre $1,66 \text{ m.s}^{-1}$ em novembro e $3,16 \text{ m.s}^{-1}$ em março, mínima e máxima, respectivamente. As médias mensais dos meses de setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e junho, possuem os menores valores, diga-se abaixo da média de $2,37 \text{ m.s}^{-1}$. No inverno ($2,57 \text{ m.s}^{-1}$) e outono ($2,69 \text{ m.s}^{-1}$) as médias de velocidade são maiores que as do verão ($2,39 \text{ m.s}^{-1}$) e primavera ($1,80 \text{ m.s}^{-1}$), denotando uma característica sazonal para a região

estudada, por outro lado, as médias históricas descrevem médias com picos parecidos, porém com maiores e mais suavizados valores.

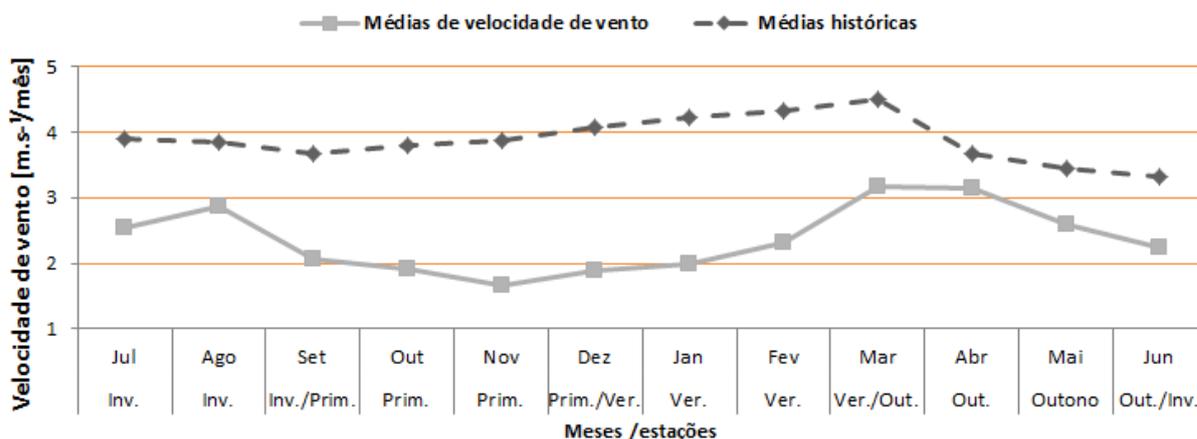


Figura 44: Velocidades médias mensais do vento entre as estações no intervalo de 2 anos e as médias históricas de 5 anos.

O gráfico do comportamento intersazonal da velocidade média horária do vento nas estações no período de 2 anos, conforme a figura 45, descreve uma correlação horária relativamente simétrica porém diferenças visíveis entre as médias. A velocidade média horária, possui seu ápice às 10 horas para todas as estações, com exceção do inverno que descreve sua máxima velocidade às 11 horas. Todas as estações seguem uma característica homogênea ao elevar sua velocidade horária, com distinção do outono, mostrando-se instável na primeira metade do dia. Por outro lado, ainda no outono é indicada uma maior média horária, com $3,85 \text{ m.s}^{-1}$, seguindo com uma paridade entre o inverno e o verão nas maiores médias horárias e, por último, a primavera com uma menor média de velocidade horária de vento, com $2,46 \text{ m.s}^{-1}$, abaixo inclusive da média das demais. Da mesma forma que no comportamento interanual, no intersazonal, os horários de maiores médias de velocidade de vento são exemplificados, conforme Tubelis (1986), pelas diferenças de temperaturas e gradientes de pressão, ocorrendo as menores médias de velocidades dos ventos durante período noturno e maiores decorrendo no meio do dia.

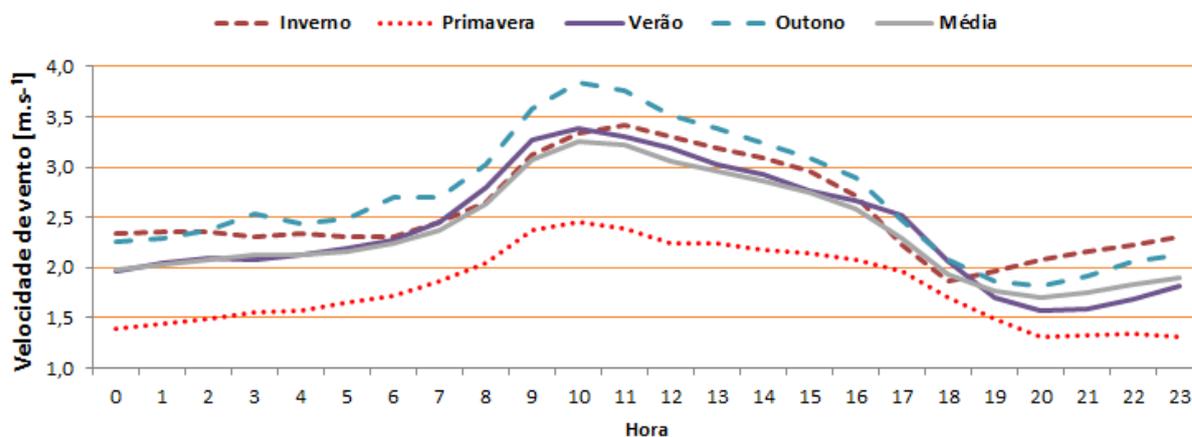


Figura 45: Velocidade média horária do vento entre as estações a uma altura de 18 metros.

Os gráficos das rosas dos ventos da figura 46, ilustram os parâmetros direcionais da velocidade média horária do vento para cada estação observada no período de 2 anos. O inverno e o outono possuem a direção predominante no ponto colateral Nordeste (NE), a primavera no ponto cardinal Leste (L) e, finalmente, o verão com predominância no ponto subcolateral Leste-nordeste (ENE). Apenas no verão e outono observam-se velocidades iguais ou acima dos 11 m.s^{-1} . O maior intervalo de calmarias, compreendendo valores entre 0 e $2,1 \text{ m.s}^{-1}$, ocorreu na primavera com um percentual de 32,92% dos dados horários observados para esta estação, denotando também as menores médias de velocidades. As classes de velocidades mais frequentes são de $2,1$ a $3,6 \text{ m.s}^{-1}$ e $3,6$ a $5,7 \text{ m.s}^{-1}$, conforme destaque nos gráficos.

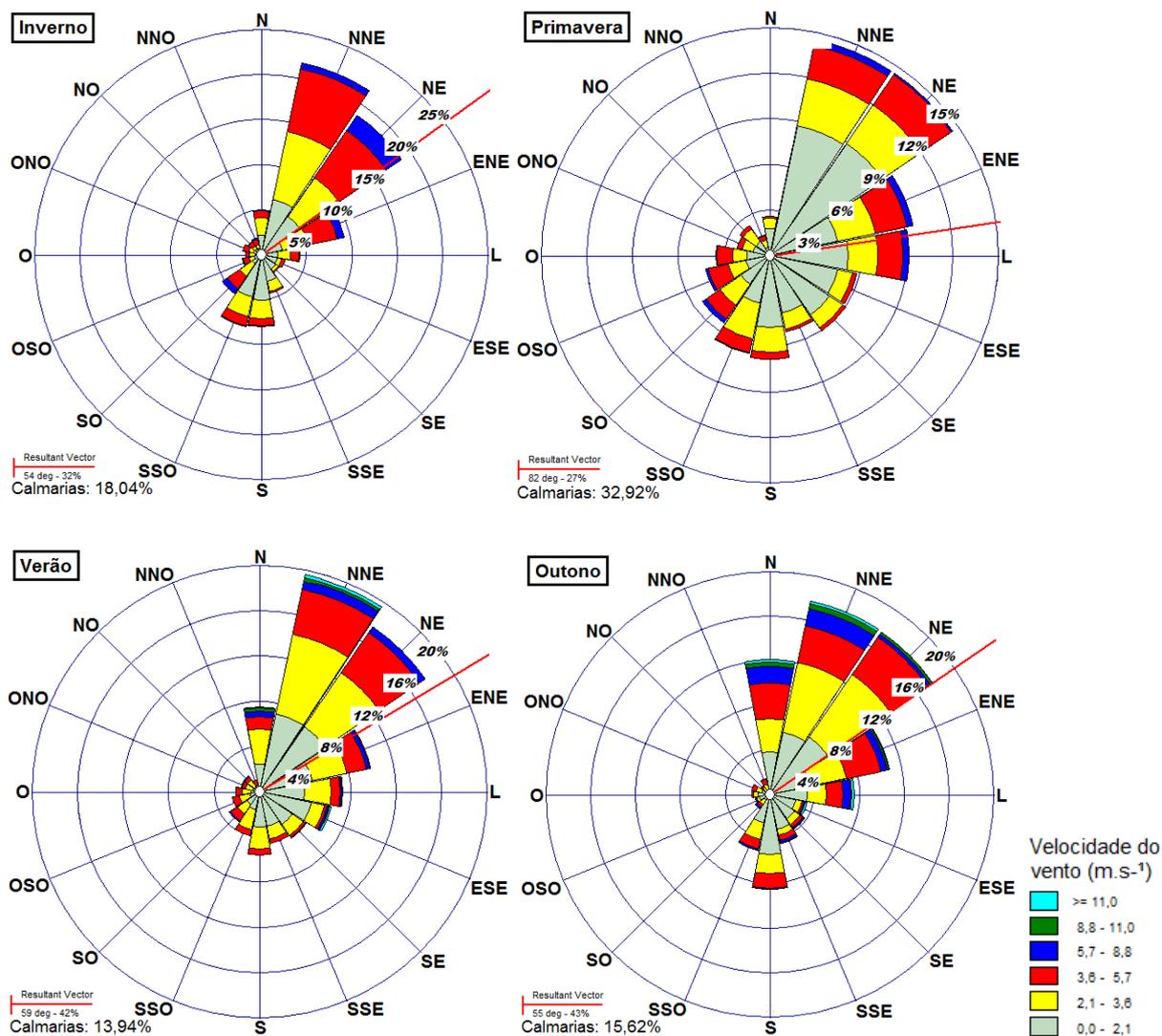


Figura 46: Rosa dos ventos das médias intersazonais e direção predominante, para uma altura de 18 metros.

4.2 DISPONIBILIDADES DAS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA

Quanto às disponibilidades energéticas encontradas, conforme o item 4.2.1 a seguir, ressalta-se que entre os anos observados, a energia solar foi superior a eólica 7,39 e 5,75 vezes, para os anos 1 e 2, respectivamente, sejam para as disponibilidades equacionadas para os dados horários quanto para os dados diários.

Quanto às disponibilidades energéticas encontradas, conforme o item 4.2.2, ressalta-se que entre as estações do ano observadas, a energia solar foi superior a eólica 10,38, 23,60, 11,92 e 5,53 vezes, para o inverno, primavera, verão e outono,

respectivamente, sejam para as disponibilidades equacionadas para os dados horários quanto para os dados diários.

4.2.1 Disponibilidades energéticas interanuais

Conforme a figura 47, os picos das disponibilidades energéticas médias horárias entre os dois anos observados concentram-se em três pontos horários, sendo as 10, 11 e 12 horas do dia. As maiores disponibilidades obtidas em médias horárias da energia solar foram de 54,67 e 52,97 Wh.m^{-2} , enquanto que a eólica, foram 3,88 e 5,09 Wh.m^{-2} , para os anos 1 e 2 respectivamente.

As médias das disponibilidades da energia eólica, entre os dois anos, possuem curvas com formas parecidas, porém com amplitudes diferenciadas, sendo as médias da disponibilidade solar, consideravelmente maiores e mais constantes que a eólica. As maiores amplitudes da disponibilidade eólica, localizadas no ano 2, destacam-se mais do ano 1 no intervalo entre 9 e 15 horas, nos demais momentos horários, mostram-se equilibradas.

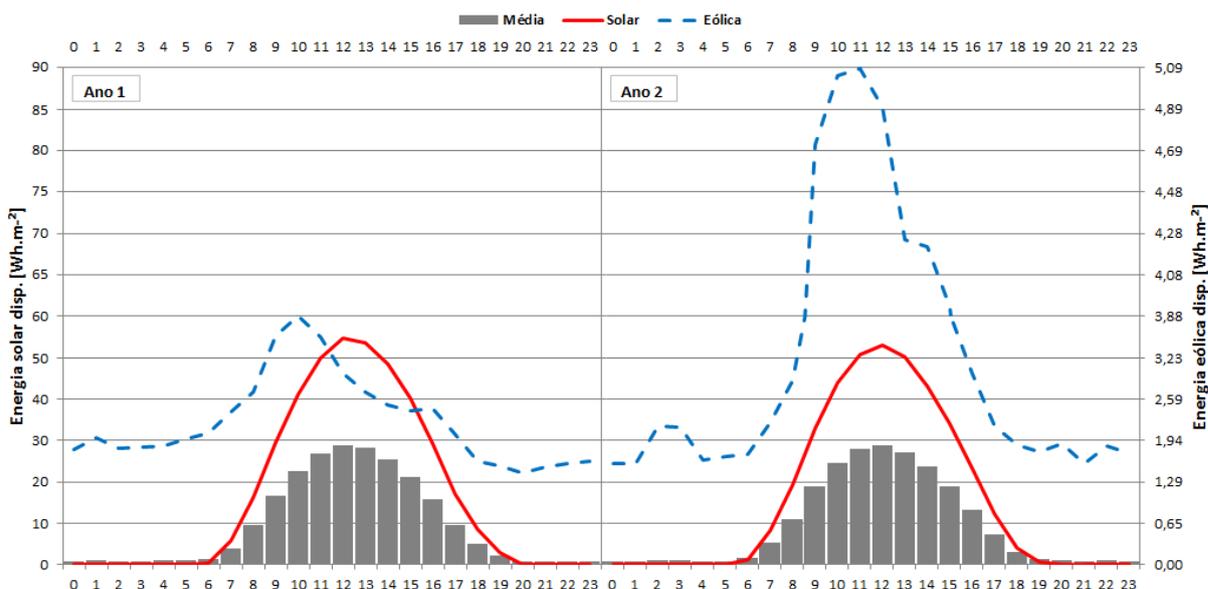


Figura 47: Disponibilidades médias horárias das energias solar e eólica entre os anos 1 e 2.

Conforme a figura 48, a disponibilidade da energia solar média diária entre os dois anos observados possui mínimas de 0,24 e 0,22 kWh.m⁻² e as máximas 9,00 e 8,74 kWh.m⁻², quanto à disponibilidade eólica temos as mínimas de 0,00 kWh.m⁻² e as máximas 3,46 e 15,40 kWh.m⁻², para os anos 1 e 2 respectivamente.

A energia solar foi característica nos dois anos, com apenas dois dias “atípicos” observados no fim do ano 2, com 6,67 e 3,75 kWh.m⁻², por outro lado, a energia eólica obteve alguns picos em dias aleatórios nos inícios dos anos 1 e 2, até um súbito aumento em seguidos dias onde a energia disponível foi mais representativa que a solar, sendo 6 dias com a energia disponível acima dos 10 kWh.m⁻².

Esta representatividade equilibrou a média de disponibilidade diária de energia entre os anos, visto que, o ano 1 obteve 2,71 kWh.m⁻², e 2,66 kWh.m⁻² no ano 2. Com as linhas de tendências das disponibilidades solar, eólica e a média é possível acompanhar as diferenças energéticas entre os dois anos, principalmente a sinuosidade do ano 2, que apresentou uma variabilidade entre as amplitudes do potencial eólico muito acentuado em relação ao ano 1.

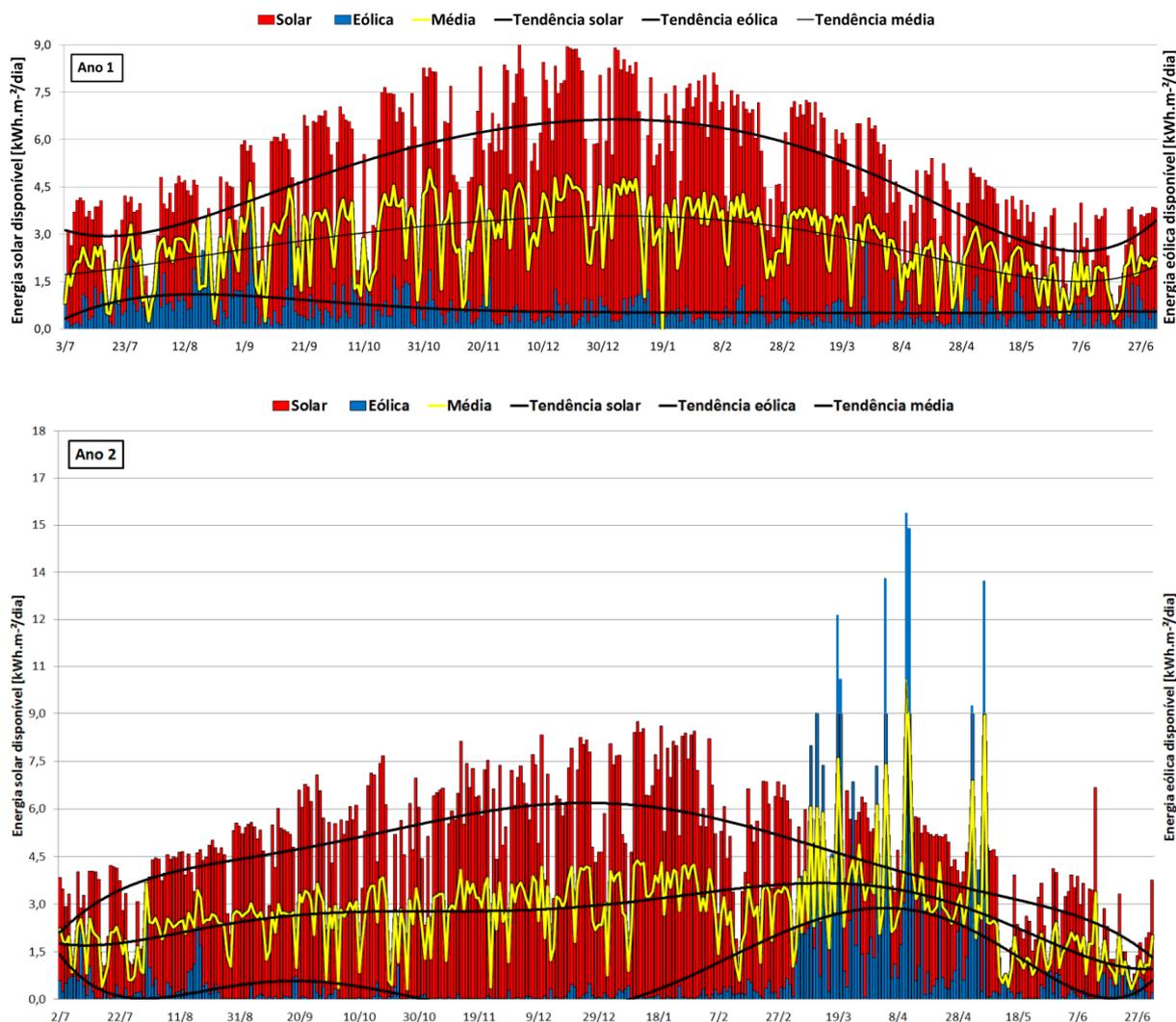


Figura 48: Disponibilidades médias diárias das energias solar e eólica entre os anos 1 e 2.

De acordo com os gráficos da rosa dos ventos e dos intervalos de ocorrências das disponibilidades energéticas, conforme a figura 49, são descritas as disponibilidades energéticas médias horárias do vento para os anos 1 e 2. A disponibilidade eólica no ano 1 apresentou menores valores relativos ao ano 2. O ano 1 apresentou direção vetorial predominante no ponto subcolateral Leste-nordeste (ENE), e no ano 2 no ponto colateral Nordeste (NE).

Nos dois períodos são encontradas disponibilidades energéticas iguais ou acima a 32 Wh.m^{-2} , porém, no ano 2 estes valores tiveram uma variabilidade maior. Neste último, 71,5% dos valores compreenderam disponibilidades entre $0,0$ e $1,0 \text{ Wh.m}^{-2}$ e 1,9% com disponibilidades energéticas iguais ou maiores que 32 Wh.m^{-2} .

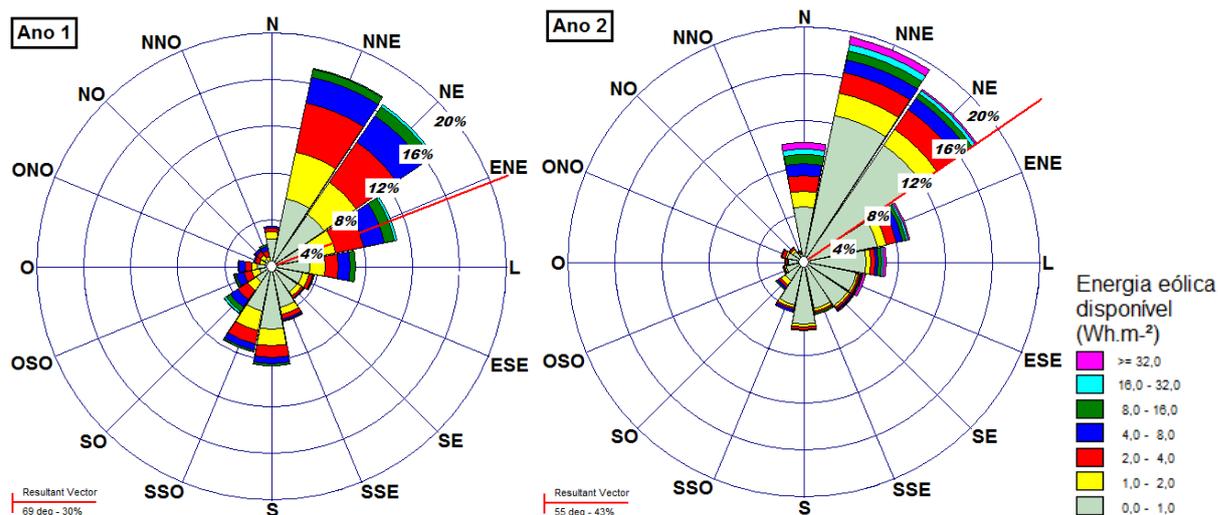


Figura 49: Rosa dos ventos das médias interanuais da energia eólica disponível e direção predominante, para uma altura de 18 metros.

4.2.2 Disponibilidades energéticas intersazonais

Conforme a figura 50, os picos das disponibilidades energéticas médias horárias entre as estações concentram-se em quatro pontos horários, ou seja, as 9, 10, 11 e 12 horas do dia. As maiores disponibilidades da energia solar são 45,31, 62,13, 64,43 e 43,29 Wh.m⁻², da eólica, são 3,69, 2,17, 4,90 e 7,35 Wh.m⁻² para o inverno, primavera, verão e outono, respectivamente. As médias de disponibilidade solar entre as estações assemelham-se para a primavera e verão, da mesma forma que para o outono e o inverno, estes dois últimos com médias menores. Quanto às médias horárias entre as disponibilidades das energias solar e eólica, em todas as estações do ano, a energia solar foi superior a energia eólica: 10,38 vezes maior no inverno; 23,60 vezes maior na primavera; 11,92 vezes maior no verão e; 5,53 vezes maior no outono.

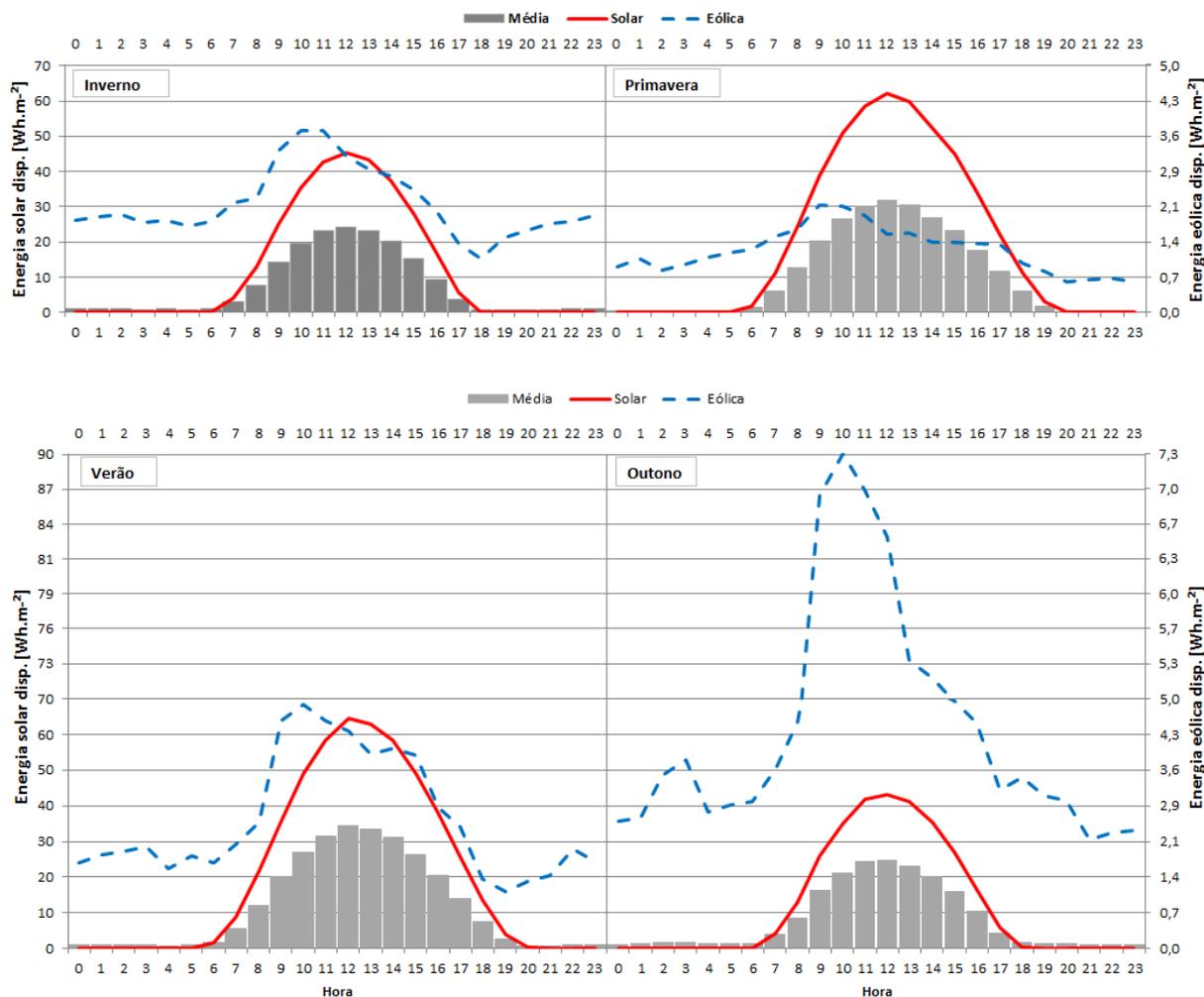


Figura 50: Disponibilidades médias horárias das energias solar e eólica entre as estações.

Conforme a figura 51, a disponibilidade da energia solar média entre as estações observadas são as mínimas de 0,74, 1,81, 2,89 e 0,42 kWh.m^{-2} e máximas de 6,43, 8,87, 8,60 e 6,43 kWh.m^{-2} , para o inverno, primavera, verão e outono, respectivamente. Quanto a disponibilidade eólica temos as mínimas de 0,00, 0,04, 0,03 e 0,03 kWh.m^{-2} e máximas de 2,10, 1,08, 6,51 e 7,87 kWh.m^{-2} , para o inverno, primavera, verão e outono, respectivamente. A energia solar manteve sua disponibilidade em valores mais elevados na primavera e verão, por outro lado, a eólica, no fim do verão, em dias aleatórios e espaçados no inverno, e boa parte do outono, este último com os maiores valores de disponibilidade energética. As médias foram menores no inverno e outono, com 0,58 e 0,49 kWh.m^{-2} , respectivamente e, maiores na primavera e verão, com 4,50 e 5,57 kWh.m^{-2} , respectivos. As características climáticas típicas das estações do ano são visíveis nas linhas de

tendências das disponibilidades solar, eólica e a média entre as duas fontes. No inverno a disponibilidade solar e eólica, ressalvadas suas magnitudes, demonstram maior equilíbrio qualitativo e quantitativo. A maior disponibilidade da energia solar está evidenciada na primavera e verão, enquanto que a eólica, é denotada de maneira mais acentuada no fim do verão até meados do outono, onde são encontrados os dias potencialmente visíveis até primeira quinzena de maio.

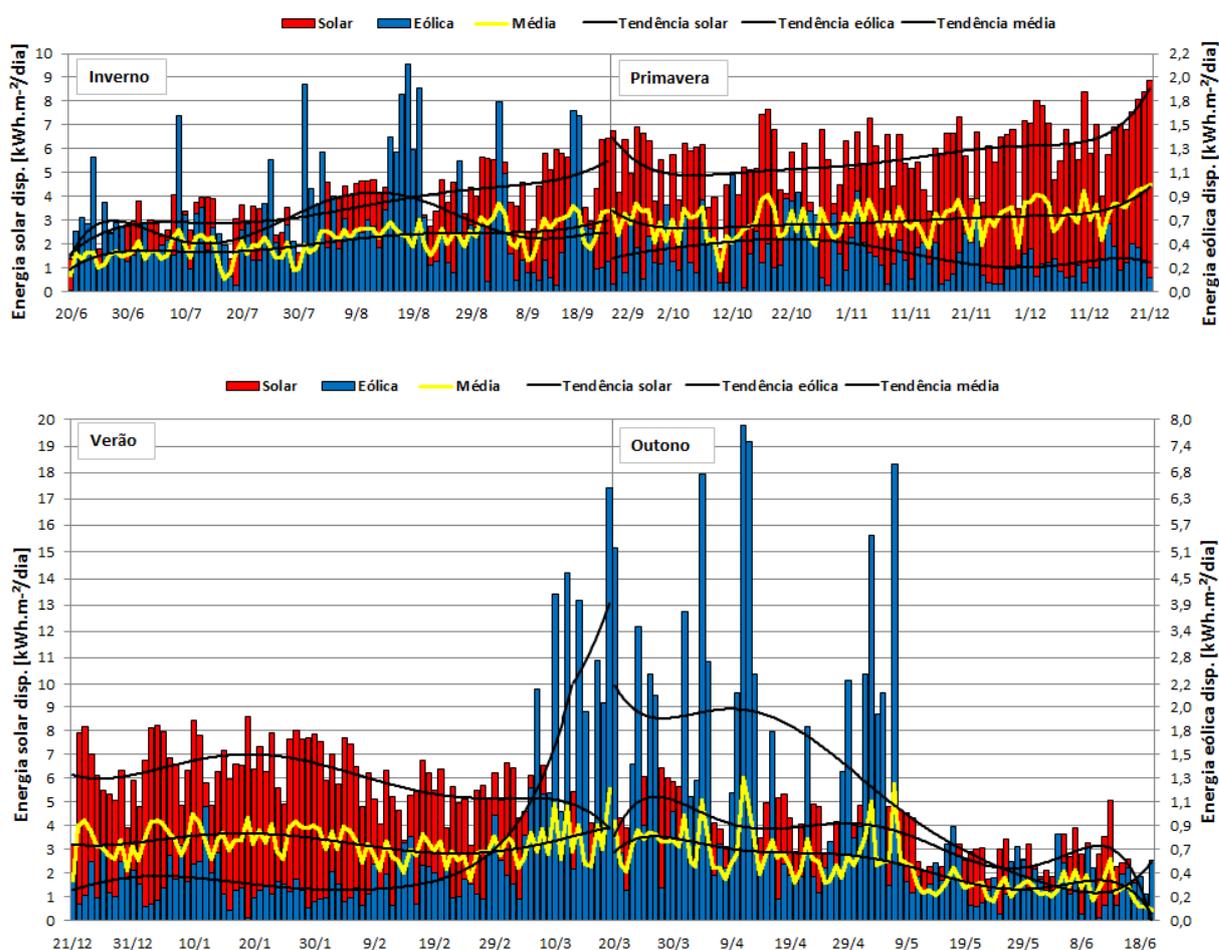


Figura 51: Disponibilidades médias diárias das energias solar e eólica entre as estações.

Os gráficos da rosa dos ventos e das ocorrências das disponibilidades energéticas, descritos na figura 52, descrevem as disponibilidades energéticas médias horárias do vento para as estações do ano, conforme sua direção predominante. Os valores da disponibilidade eólica foram maiores no outono, sendo que 2,7% das disponibilidades energéticas são iguais ou maiores que 32 Wh.m^{-2} .

No verão foi observado o segundo maior potencial energético, principalmente no ponto cardinal Norte (N) e no subcolateral Norte-nordeste (NNE). O inverno concentrou a energia disponível, principalmente no ponto subcolateral Norte-nordeste (NNE) e o colateral Nordeste (NE) com 1,4% da energia disponível entre os valores 16 e 32 Wh.m⁻². A primavera foi marcada pelas menores disponibilidades, uma vez que, 68,7% do potencial desta estação compreenderam valores no intervalo entre 0 e 1 Wh.m⁻².

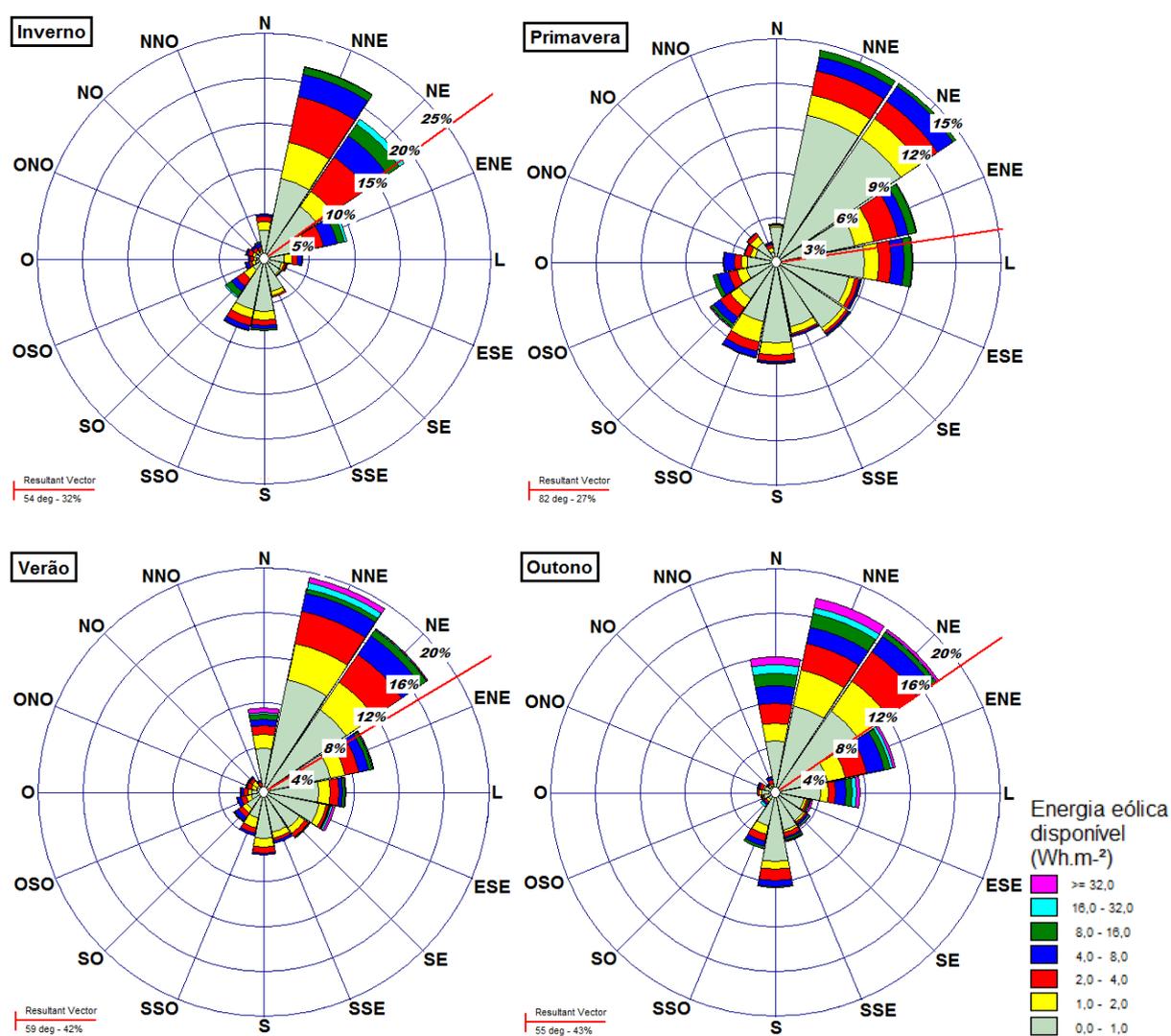


Figura 52: Rosa dos ventos das médias intersazonais de energia eólica disponível e direção predominante, para uma altura de 18 metros.

4.3 ANÁLISE DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO

A correlação entre os intervalos de tempo estão ligados ao comportamento da variabilidade contida nas disponibilidades energéticas dos valores médios destes intervalos. Estas variações originam-se dos níveis de irradiância características de cada período, estas normalmente típicas, refletindo na disponibilidade energética. Por outro lado, as velocidades dos ventos podem ser alteradas de maneira abrupta pela forma estocástica da velocidade, inclusive fora das características típicas, tornando sua disponibilidade energética também estocástica.

Quando a disponibilidade energética for correlacionada consigo mesma, seu nível de correlação CC será sempre 1 (um), uma vez que, sempre existirá uma correlação “perfeita”. Os valores na cor vermelha, contidos nas matrizes de correlação das tabelas são análogos às correlações descritas nas figuras, confrontando e exemplificando a análise dos coeficientes das disponibilidades energéticas entres as fontes solar e eólica. Foram utilizadas duas casas decimais, após as unidade, para descrever os CC, por isso em algum momento os intervalos entre os níveis podem eventualmente serem confundidos em função do arredondamento adotado. Além das correlações interanuais e intersazonais, também foram verificadas as correlações dos valores mensais acumulados.

4.3.1 Correlações mensais

No gráfico da figura 53, as correlações das disponibilidades são predominantes na região do eixo das abcissas, onde o CC é zero. Este último definido pela ausência de correlação entre as variáveis solar e eólica, pois quanto mais próxima de zero maior a independência entre as variáveis energéticas. O mês de fevereiro apresentou uma correlação positiva “regular” (0,37), podendo ser explicado pelo maior grau de paridade entre as fontes relativa aos demais meses. Março também apresentou um nível “regular” negativo (- 0,53), haja vista, que este mês apresentou maiores índices de disponibilidade eólica, proporcionais às maiores

velocidades de vento registradas para todo o período observado, ao contrário da variável solar que apresentou comportamento inverso.

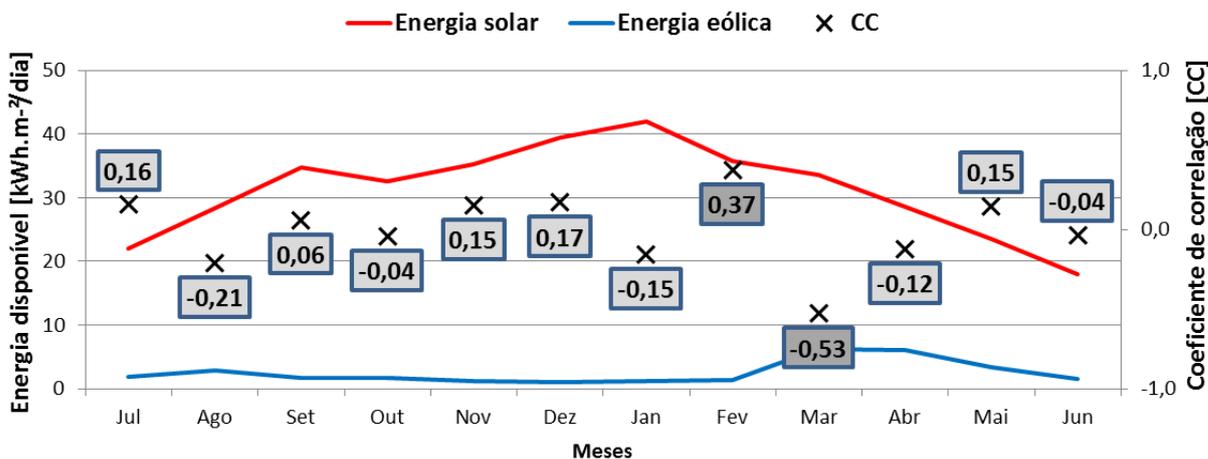


Figura 53: Disponibilidades média das energias solar e eólica e coeficiente de correlação entre os meses.

A tabela 07, detalha todas as possíveis correlações das disponibilidades energéticas envolvendo as energias solar e eólica entre os valores acumulados mensais do período observado. Por meio da matriz de correlação pode-se verificar que a maior correlação positiva “forte” ocorreu nos meses de janeiro e novembro (0,61) e apenas entre a variável eólica. Por outro lado, em março e novembro (- 0,60) encontra-se a maior correlação negativa, porém com um nível no intervalo “regular”, esta última correlação também entre a variável eólica entre estes meses. Dos coeficientes das correlações existentes na matriz, 73% possui uma correlação “fraca” e 18%, uma correlação “regular”.

Tabela 07: Coeficientes de correlação entre as disponibilidades das energias solar e eólica entre meses

Meses	Variáveis	Jul		Ago		Set		Out		Nov		Dez		Jan		Fev		Mar		Abr		Mai		Jun	
		Sol.	Eól.	Sol.	Eól.																				
Jul	*Sol.	1																							
	**Eól.	0,16	1																						
Ago	Sol.	0,05	-0,21	1																					
	Eól.	-0,02	0,02	-0,21	1																				
Set	Sol.	-0,10	0,14	0,15	0,00	1																			
	Eól.	-0,03	0,17	-0,28	0,51	0,06	1																		
Out	Sol.	0,10	-0,04	-0,14	0,33	-0,29	0,25	1																	
	Eól.	0,14	0,32	-0,24	0,45	0,17	0,39	-0,04	1																
Nov	Sol.	-0,17	-0,06	-0,19	0,18	0,09	0,23	0,14	0,01	1															
	Eól.	0,11	0,31	-0,32	0,54	0,10	0,50	0,10	0,57	0,15	1														
Dez	Sol.	-0,18	0,23	-0,23	0,27	0,17	0,26	0,00	0,18	0,03	0,29	1													
	Eól.	0,00	0,28	-0,14	0,37	0,26	0,50	0,03	0,52	0,09	0,57	0,17	1												
Jan	Sol.	0,14	-0,23	0,17	-0,16	-0,11	-0,13	-0,02	-0,14	0,08	0,02	-0,17	0,01	1											
	Eól.	0,18	0,46	-0,12	0,35	0,15	0,43	0,04	0,44	-0,06	0,61	0,16	0,52	-0,15	1										
Fev	Sol.	-0,06	0,11	-0,13	0,48	0,02	0,39	-0,05	0,36	-0,04	0,33	0,30	0,32	-0,19	0,32	1									
	Eól.	-0,18	0,14	-0,21	0,54	0,21	0,38	0,08	0,31	0,07	0,53	0,36	0,32	-0,21	0,39	0,37	1								
Mar	Sol.	0,14	0,04	-0,09	0,29	-0,01	0,24	-0,04	0,46	-0,04	0,41	-0,07	0,24	0,06	0,31	0,27	0,08	1							
	Eól.	-0,03	-0,25	0,28	-0,28	-0,03	-0,26	0,12	-0,56	0,12	-0,60	-0,01	-0,33	0,09	-0,43	-0,24	-0,33	-0,53	1						
Abr	Sol.	-0,05	-0,21	-0,06	0,09	0,01	-0,02	0,24	-0,05	0,22	-0,07	0,12	-0,03	-0,04	-0,18	0,21	0,05	-0,29	0,19	1					
	Eól.	-0,06	-0,10	0,11	-0,25	0,04	-0,36	-0,25	-0,46	0,02	-0,34	-0,28	-0,34	0,08	-0,41	-0,17	-0,13	-0,06	0,18	-0,12	1				
Mai	Sol.	0,11	0,10	-0,17	0,10	-0,24	0,19	-0,17	0,20	-0,03	0,18	0,18	-0,01	0,06	0,12	0,33	0,12	0,33	-0,08	-0,17	-0,05	1			
	Eól.	-0,23	0,30	-0,30	0,13	-0,23	0,20	0,16	0,04	0,08	0,15	0,10	0,06	0,03	0,16	0,12	-0,07	0,22	-0,28	-0,09	-0,17	0,15	1		
Jun	Sol.	0,13	0,48	-0,12	0,03	0,18	0,06	-0,28	0,10	0,08	0,11	-0,11	0,06	-0,19	0,32	0,05	0,05	-0,04	-0,20	-0,25	0,21	0,04	0,08	1	
	Eól.	0,08	-0,08	0,06	0,17	0,25	0,24	0,24	0,27	0,20	0,25	-0,03	0,25	-0,01	0,22	-0,04	0,11	0,25	-0,16	0,27	-0,02	-0,27	-0,11	-0,04	1

Legenda:

Níveis	%
Perfeita	8,00
Muito forte	0,00
Forte	0,33
Regular	18,00
Fraca	73,00
Nula	0,66
Total	100,00

*Sol.= Solar e;

**Eól.= Eólica.

4.3.2 Correlações interanuais

No gráfico da figura 54, os CC dos anos 1 e 2 são descritos. A correlação entre as disponibilidades energéticas no ano 1 é negativa “fraca” (- 0,07), prevalecendo uma independência entre as variáveis neste período pela variabilidade existente entre as amplitudes das energias solar e eólica. No ano 2 ocorreu uma correlação negativa “regular” (- 0,32), denotada na segunda metade deste intervalo pelo aumento abrupto dos valores da variável eólica, em confronto à variável solar, descrita por valores relativamente menores.

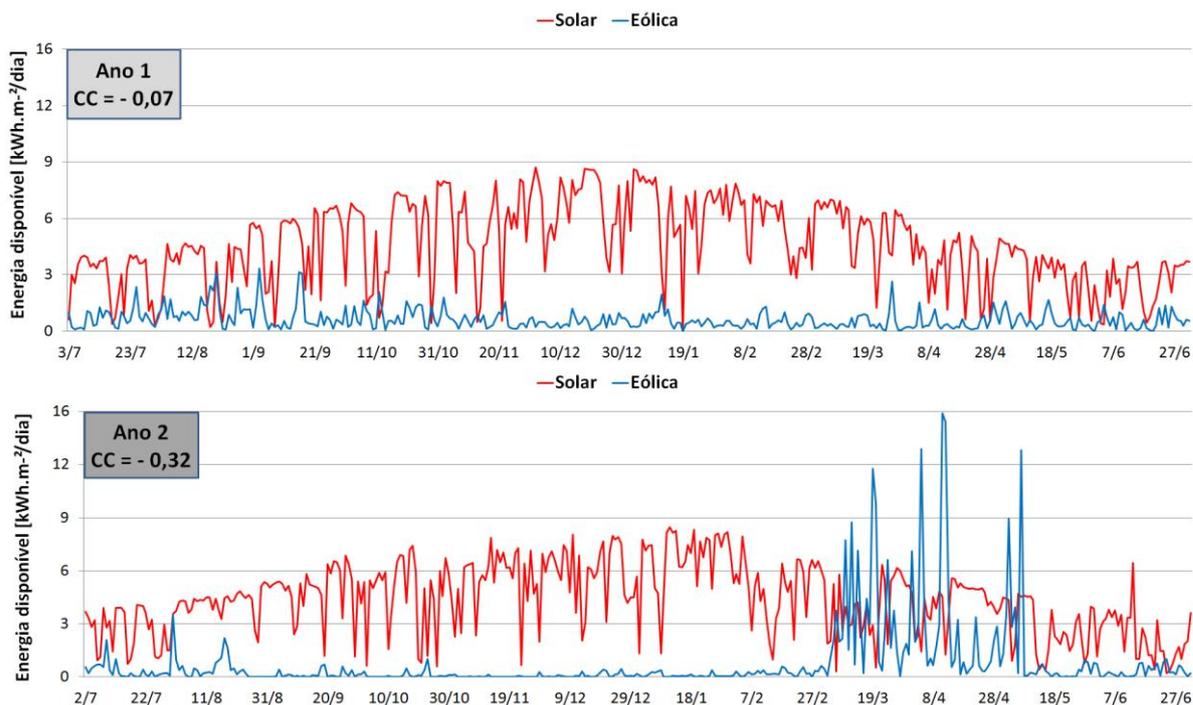


Figura 54: Disponibilidade das energias solar e eólica e coeficientes de correlação entre os anos 1 e 2.

Na matriz da tabela 08, denota-se a maior correlação “positiva” (0,32) para a variável solar, no ano 1. A maior correlação “negativa” (- 0,32) entre as variáveis solar e eólica, são encontradas no ano 2. Dos coeficientes existentes na matriz, 40% possuem níveis “fracos” de correlação e 20% são “regulares”.

Tabela 08: Coeficientes de correlação entre as disponibilidades das energias solar e eólica interanuais

Anos	Variáveis	Ano 1		Ano 2	
		Solar	Eólico	Solar	Eólico
Ano 1	Solar	1			
	Eólico	-0,07	1		
Ano 2	Solar	0,32	-0,02	1	
	Eólico	-0,16	-0,12	-0,32	1

Legenda:	
Níveis	%
Perfeita	40,00
Muito forte	0,00
Forte	0,00
Regular	20,00
Fraca	40,00
Nula	0,00
Total	100,00

4.3.3 Correlações intersazonais

O maior valor entre os coeficientes estacionários ocorreu na primavera, com uma correlação positiva “fraca” (0,17), muito embora, as demais estações tenham sido caracterizadas por valores com correlação “fraca”, próximas de zero, tais como a correlação negativa do inverno (- 0,07), e do verão (- 0,05) e uma correlação positiva no outono (0,08). Estes níveis denotam que as disponibilidades energéticas possuem pouca força de correlação entre as variáveis solar e eólica entre as estações do ano. As correlações entre os valores das disponibilidades energéticas intersazonais, conforme a figura 55, são descritas a seguir.

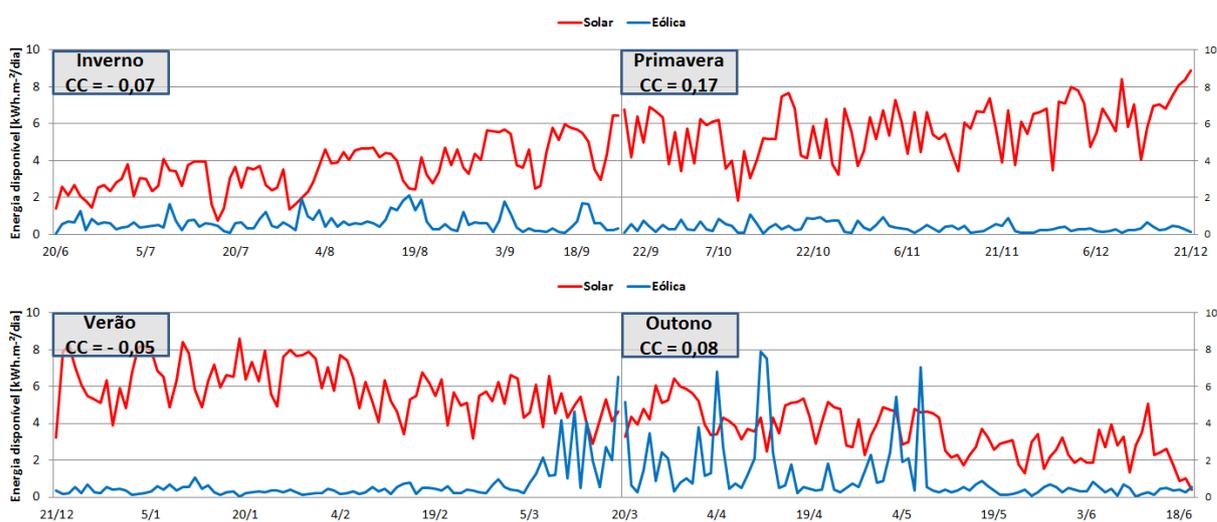


Figura 55: Disponibilidade das energias solar e eólica e coeficientes de correlação entre as estações.

Os coeficientes de possíveis correlações entre as disponibilidades energéticas solar e eólica, dos períodos estacionários, são postos na tabela 09, onde na matriz é encontrada a maior correlação positiva “regular” entre o inverno e a primavera da variável eólica (0,37). Este valor tem relação às médias mais equilibradas da variável da disponibilidade eólica entre as duas estações em questão. A maior correlação negativa “fraca” é vista comparando o verão com o outono (- 0,24), onde a variabilidade entre a disponibilidade eólica é inversamente proporcional entre as estações, ou seja, quando ocorre um aumento em uma, na

outra diminui. Dos coeficientes existentes na matriz, 69,44% possuem níveis “fracos” de correlação e 5,55% são “regulares”.

Tabela 09: Coeficientes de correlação entre as disponibilidades das energias solar e eólica estacionárias

Estações	Variáveis	Inverno		Primavera		Verão		Outono	
		Solar	Eólico	Solar	Eólico	Solar	Eólico	Solar	Eólico
Inverno	Solar	1							
	Eólico	-0,07	1						
Primavera	Solar	0,13	-0,03	1					
	Eólico	-0,10	0,37	0,17	1				
Verão	Solar	-0,03	0,14	-0,04	0,25	1			
	Eólico	0,22	0,11	0,13	0,36	-0,05	1		
Outono	Solar	-0,23	0,12	-0,05	0,13	0,28	0,00	1	
	Eólico	-0,12	0,12	-0,14	-0,03	0,21	-0,24	0,08	1

Legenda:	
Níveis	%
Perfeita	22,22
Muito forte	0,00
Forte	0,00
Regular	5,55
Fraca	69,44
Nula	2,77
Total	100,00

5 CONCLUSÕES

A direção predominante do vento para todo o período observado ocorreu no ponto subcolateral Leste-nordeste (ENE). A disponibilidade horária da energia eólica foi mais acentuada entre 9 e 12 horas em função da diferença térmica da superfície do solo e do gradiente de pressão neste período. O outono foi a estação do ano com maior potencial eólico, apresentando $17,91 \text{ kWh.m}^{-2}$ de energia acumulada disponível. O valor médio da velocidade do vento para os dois anos observados foi de $2,37 \text{ m.s}^{-1}$.

A disponibilidade eólica é relativamente baixa, não ocorrendo complementaridade energética satisfatória, resguardadas às magnitudes entre as fontes alternativas estudadas, bem como, a altura examinada. A disponibilidade da energia solar foi proporcionalmente mais representativa que a disponibilidade eólica em todos os períodos estudados, principalmente entre as médias interanuais e intersazonais: 7,39 e 5,75 vezes maior nos anos 1 e 2, respectivamente e; 10,38, 23,60, 11,92 e 5,53 vezes maior no inverno, primavera, verão e outono, respectivamente.

O ano 1 obteve a maior energia acumulada disponibilizada pelas fontes solar e eólica, com $165,24 \text{ kWh.m}^{-2}$, seguido do ano 2 com $161,62 \text{ kWh.m}^{-2}$. O verão apresentou o maior valor de energia acumulada entre as estações, com $98,33 \text{ kWh.m}^{-2}$, seguido da primavera com $90,77 \text{ kWh.m}^{-2}$, outono com $71,98 \text{ kWh.m}^{-2}$ e inverno com $65,97 \text{ kWh.m}^{-2}$.

Os Coeficientes de Correlações utilizados nas análises do comportamento entre as fontes alternativas evidenciaram uma correlação “fraca” em todos os parâmetros verificados, sendo 73,00% nas correlações mensais, 40,00% nas correlações interanuais e 69,44% nas correlações intersazonais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTENER (Org.). **Energia Fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação**, 2004. 368 p.

_____. **Energia Solar Térmica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. 2004. 262 p.

AMARANTE, O. A. C.; ZACK, M. B. J; SÁ, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: Ministerio de Minas e Energia Eletrobras, 2001.

ANCONA, D. F.; BEZRUKIKH, P.; KRAU, S.; et al. Operational constraints and economic benefits of wind-hydro hybrid systems analysis of systems in the U.S./Canada and Russia. In: **European wind energy conference**. Madrid, Spain, 2003. p. 1-8.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Ed Unisinos, 2010.

ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. **Quarterly journal of the royal meteorological society**, v. 50, n. 210, p. 121–126, 1924.

BARBOSA, C. F. O.; PINHO, J. T.; PEREIRA, E. J. S; et al. Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no estado do Pará e perspectivas frente à universalização da energia elétrica. In: **Encontro de energia no meio rural**, 5., 2004, Campinas.

BELUCO, A. **Bases para uma metodologia de dimensionamento de aproveitamentos híbridos baseados em energias hidrelétrica e fotovoltaica**. 2001. 234p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

BELUCO, A.; SOUZA, P. K. e KRENZINGER, A. A complementaridade no tempo entre as energias hidrelétrica e fotovoltaica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 99-110, 2003.

BETT, A. W.; DIMROTH, F.; GUTER, W.; et al. Highest efficiency multi-junction solar cell for terrestrial and space applications. In: 24 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2009, Hamburg. Proceedings... Hamburg: Fraunhofer ISE, 2009. p. 863-870.

BRASIL. Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012. Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório final**. Rio de Janeiro: EPE, 2013.

BRITO, S. S. Energia solar princípios e aplicações. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**, 2003.

CAMPOS, H. **Estatística experimental não-paramétrica**. 4 ed. Piracicaba: Esalq USP, 1983, 349 p.

CANEPPELE, F. L. **Desenvolvimento de um modelo fuzzy para otimização da energia gerada por um sistema híbrido (solar-fotovoltaico e eólico)**. 2007. 117p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Botucatu, 2007.

CASCAVEL (Município). Portal do município de Cascavel, PR. **Net**. Indicadores de informações úteis, 2012. Disponível em: <<http://www.cascavel.pr.gov.br/indicadores.php> >. Acesso em: 13 out. 2013.

CAVALCANTI, E. S. C. e LOPES, SARAIVA, J. D. **Energia solar para aquecimento de água: Série energia alternativa**. Viçosa: CPT, 2001. 238 p.

DUFFIE, J. A. and BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 936 p.

DUTRA, R. (Org.). **Energia Eólica princípios e tecnologia**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2008, 58p.

DUTRA, R. M. **Propostas de políticas específicas para energia eólica no Brasil após a primeira fase do PROINFA**. 2007, 415p. Tese (Doutor em Ciências em

Planejamento Energético) Programa de Pós-graduação em Engenharia – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ECHER, E.; SOUZA, M. P. e SCHUCH, N. J. A lei de Beer aplicada na atmosfera terrestre. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. São Paulo, v. 23, n. 3, p. 276 - 283, set. 2001.

ELLIOTT, D. L.; HOLLADAY, C. G.; BARCHET, W. R.; et al. Wind energy resource atlas of the United States. Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado 1986. **Solar Energy Research Institute**. Golden, 1986.

ESTEVES, M. F. S. **Centrais fotovoltaicas em habitações unifamiliares**. 2012, 231p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Porto, 2012.

FILHO, G. L. T. (Org.). **Série Energias Renováveis: Solar**. 1 ed. Itajubá: CERPCH, 2007. 44p.

FILHO, K. S. O. e SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e astrofísica**. 2 ed. Porto Alegre: Livraria da Física. 2004. 558 p. ISBN: 8588325233.

_____. O Sol: a nossa estrela. **Net**. Departamento de Astronomia do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS, 2013. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>>. Acesso em 09 de mar. 2014.

GASCH, R. and TWELE, J. (Eds). **Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation**. 2 ed. Berlin: Springer, 2012. 548 p. ISBN 978-3-642-22938-1.

GUIMARÃES, A. P. C.; RIBEIRO, C. M.; BASTOS, L. E. G.; et al. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Edição especial. Rio de Janeiro: Ediouro Gráfica e Editora S.A., 2004. 206 p.

HEPBASLI, A. and KALINCI, Y. A review of heat pump water heating systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 6, p. 1211-1229, aug.-set. 2009.

JAISANKAR, S.; ANANTH, J., THULASI, S.; et al. A comprehensive review on solar water heaters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3045-3050, ago. 2011.

JARAMILLO, O. A.; BORJA, M. A. and HUACUZ, J. M. Using hydropower to complement wind energy: a hybrid system to provide firm power. **Renewable Energy**, v. 29, n. 11, p. 1887-1909, set. 2004.

JESSE, L.; CRISTIANE, L.; JOHNSON, M. A.; et al. **Wind Rose Plot for Meteorological Data**. Version 7.0.0. Lakes Enviromental. 2011. Available in: <<http://www.weblakes.com/products/wrplot/?AspxAutoDetectCookieSupport=1>>.

KIM, I. S.; GRODZKI, L. e VISSOTO, S. Freqüência e intensidade dos ventos no estado do Paraná. In: **XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, Foz de Iguaçu-PR, Brasil, 2002. p. 1-12.

KNIER, G. How do Photovoltaics Work? **Net**, ago 2002. Science National Aeronautics and Space Administration - NASA. Available in: <<http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>>. Access in: 06 mar. 2014.

KUHN, R. L.; KAEHLER, J. W. M. e RAMOS, D. B. **Rastreamento Diário e Anual dos Níveis Máximos de Radiação Solar para Otimização da Produção Fotovoltaica**. 2012. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/anais/induscon/2012/Data/iREP1967.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2013.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 4 ed. Rio de Janeiro: UEPG, 2012. 528p. ISBN: 9788577981403.

MACÊDO, W. N. **Estudo de sistemas de geração de eletricidade utilizando as energias solar fotovoltaica e eólica**. 170p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará. Pará, Belém. 2002.

MACÊDO, W. N.; et. al. ASES: Programa para Análise de Sistemas Eólicos e Solares fotovoltaicos. In: **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio**

Rural, 2002. Disponível em:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100022&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 15 de ago. 2013.

MARINHO, M. H. N. e AQUINO, R. R. B. Oferta de energia através da complementaridade sazonal hidroeólica. **PCH Notícias & SHP News**,(40), p. 24-28, 2009.

MARTINAZZO, C. A. **Modelos de estimativa de radiação solar para elaboração de mapas solarimétricos**. 210p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - PROMEC, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A. e PEREIRA, E. B. O. aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008.

MONTEIRO, C.; LOPES, J. P.; VA K. P.; et al. **Metodologias Integradas para o Mapeamento de Energias Alternativas no Estado do Pará**. Actas do 4º Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 1999.

NETO, D. D.; ASSIS, J. P.; MANFRON, P. A.; et al. Simulação estocástica de valores médios diários de temperatura do ar e de radiação solar global para Piracicaba-SP, utilizando distribuição normal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 2, p. 225-235, 2005. ISSN 0104-1347.

NOBEL, P.S. **Byophysical plant physiology and ecology**. 2 ed. San Francisco, W.H. Freeman, 1983. 608p.

NOGUEIRA, C. E. C. **Dimensionamento de sistemas integrados de energia em ambientes rurais**. 2004. 144p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

NOTTON, G.; DIAF, S. and STOYANOV, L. Hybrid photovoltaic/wind energy systems for remote locations. **Energy Procedia**, v. 6, p. 666-677, 2011.

OKE, T. R. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. Instruments and Observing Methods – IOM, **Report No. 81**, World Meteorological Organization, Canada, 2004.

OZDAMAR, A.; OZBALTA, N.; AKIN, A.; et al. An application of a combined wind and solar energy system in Izmir. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 9, n. 6, p. 624-637, 2005.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; et. al. **Atlas brasileiro de energia solar**. ed. 1. São José Dos Campos: INPE, 2006, 60p. ISBN 85-17-00030-7.

PIANEZZOLA, G. **Mapas de complementaridade dos potenciais solar e eólico no estado do Rio Grande do Sul**. 2006. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica - PROMEC, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PINHO, J. T. (Coord.). **Sistemas híbridos: Soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. 396p. ISBN 978-85-9834102-6.

PINTO, M. **Fundamentos de Energia Eólica**. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 392 p. ISBN 9788521621607.

RAMAKUMAR, R. and BIGGER, J. E. Photovoltaic systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 81, n. 3, p. 365-377, 1993. ISSN 0018-9219.

RAMAKUMAR, R. Renewable energy sources and developing countries. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, n. 2, p. 502-510, 1983. ISSN 0018-9510.

ROBALLO, S. T.; FISCH, G. e GIRARDI, R. M. Escoamento atmosférico no centro de lançamento de alcântara (CLA): parte II – ensaios no túnel de vento. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 87-99, 2009.

SALAMEH, Z. M.; BOROWY, B. S. and AMIN, A. R. Photovoltaic module-site matching based on the capacity factors. **Energy Conversion, IEEE Transactions**

on **Energy Conversion**, San Francisco, v. 10, n. 2, p. 326-332, 1995. ISSN 0885-8969.

SHIMAKURA, S. **Bioestatística avançada I**. Departamento de Estatística – UFPR. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~shimakur/CE701/node80.html>>. Acesso em: 01 jan. 2014.

SILVA, C. H. F. (coord.). **Alternativas energéticas: Uma visão da CEMIG**. Belo Horizonte: Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig, 2012. 369 p. ISBN: 978-85-87-929-51-8.

SIMEPAR – Instituto Tecnológico. **Dados da estação meteorológica de Cascavel: 1999 a 2013**. Cascavel, 2013. Arquivo digital.

SIQUEIRA, J. A. C. **Desempenho de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. 2005. 190p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Botucatu, 2005.

TIBA, C. (Coord.). Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. **Recife: Ed. Universitária da UFPE**, 2000. 111p.

TUBELIS, A. e NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1986. 374p. ISBN 85-213-0007-7.

TWIDELL, J. and WEIR, T. **Renewable energy resources**. 2 ed. London: Taylor and Francis, 2006. 601 p. ISBN 0419253300.

VALIATI, M. I. e RICIERI, R. P. Estimativa da irradiação solar global com partição mensal e sazonal para região de Cascavel PR. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 76-85, 2005. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v25n1/24873.pdf> >. Acesso em: 23 set. 2013.