

Dedico este trabalho à minha família, cujos laços, de sangue ou não, me confortam em momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu filho Gabriel que me inspira todos os dias a trabalhar mais e melhor e à minha esposa Verônica pelo amor e pela força. Aos meus pais por serem tudo que se espera que os pais sejam e ainda mais. Agradeço á Chesf pela oportunidade e ao meu Gerente Ricardo Fellows pelo apoio.

"A persistência é o caminho do êxito."

CHARLES CHAPLIN

RESUMO

A utilização de energia eólica vem crescendo, no Brasil e no Mundo. Para estudos de viabilidade de projetos nesta área é importante a modelagem de terrenos através de uma grandeza chamada rugosidade. Este trabalho visa utilizar técnicas de sensoriamento remoto, através da classificação de imagens de satélite quanto ao uso e ocupação do solo, para levantamento da rugosidade da região de interesse. Desta forma espera-se dirimir os riscos desta energia, que são naturalmente altos.

Palavras-chave: Energia eólica. Geração de energia. Rugosidade. Viabilidade técnica. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The use of wind power is growing in Brazil and worldwide. For Projects feasibility studies in this area, it is important to compute a land characteristic named roughness. This work aims to use classification of satellite images, based on the characteristics of land use and occupation, to estimate the roughness of the region of interest. Thus it is expected to minimize the risks of this energy, which are naturally high

Keywords: Wind energy. Power generation. Roughness. Technical feasibility. Remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2. 1: Esquema de um Sistema de sensoriamento Remoto. (Fonte: Accioly, 2011) | 14 |
| Figura 2. 2: Tipos de espalhamento. (Fonte: Jensen, 2011) | 15 |
| Figura 2. 3: Absorção da atmosfera de acordo com o comprimento de onda. (Fonte: Jensen, 2011)... | 17 |
| Figura 2. 4: Perfil espectral típico de alguns alvos. (Fonte: Jensen, 2011) | 18 |
| Figura 2. 5: Tipos de refletores. (Fonte: Jensen, 2011) | 19 |
| Figura 2. 6: Órbita Geossíncrona. (Fonte: Accioly, 2011) | 20 |
| Figura 2. 7: Campo de visada instantâneo (IFOV) e outras características da geração de uma imagem por um sensor óptico-elétrico. (Fonte: Accioly, 2011) | 21 |
| Figura 2. 8: Exemplos de imagens de diferente resolução espacial. (Fonte: Accioly, 2011) | 22 |
| Figura 2. 9: Resolução espectral de alguns sensores e suas correspondências com curvas espectrais de amostras de solo (a), vegetação (b) e água (c). (Fonte: Accioly, 2011) | 23 |
| Figura 2. 10: Exemplo de imagens de diferente resolução radiométrica. (Fonte: Accioly, 2011) | 24 |
| Figura 2. 11: Linha temporal do Projeto Landsat. (Fonte: NASA, 2011) | 26 |
| Figura 2. 12: Características técnicas do Sensor WFI nos satélites CBERS-1, 2 e 2B. (Fonte: CBERS, 2011) | 28 |
| Figura 2. 13: Características técnicas do Sensor CCD nos satélites CBERS-1, 2 e 2B. (Fonte: CBERS, 2011) | 28 |
| Figura 2. 14: Características técnicas do Sensor IRMSS nos satélites CBERS-1 e 2. (Fonte: CBERS, 2011) | 29 |
| Figura 2. 15: Características técnicas do Sensor HCR presente apenas no satélite CBERS-2B. (Fonte: CBERS, 2011) | 29 |
| Figura 3. 1: Camada limite atmosférica. (Fonte: Custódio, 2007) | 31 |
| Figura 3. 2: Determinação da velocidade do Vento em um Local de estudo a partir do conhecimento do comportamento do vento em outro local de referencia. (Fonte: Custódio, 2007) | 36 |
| Figura 3. 3: Exemplo de terreno com rugosidade classe 0 ($Z_0=0,0002m$). (Fonte: Custódio, 2007) | 39 |
| Figura 3. 4: Exemplo de terreno com rugosidade classe 1 ($Z_0=0,03m$). (Fonte: Custódio, 2007) | 39 |
| Figura 3. 5: Exemplo de terreno com rugosidade classe 2 ($Z_0=0,1m$). (Fonte: Custódio, 2007) | 40 |
| Figura 3. 6: Exemplo de terreno com rugosidade classe 3 ($Z_0=0,4m$). (Fonte: Custódio, 2007) | 40 |
| Figura 4. 1: Imagem <i>cbers_2b_ccd2xs_20090103_147_111</i> com a banda 4 no vermelho, a banda 3 no verde e a banda 2 no azul. (Fonte: INPE, 2011) | 41 |
| Figura 4. 2: Modelo de conversão / Calibração | 42 |
| Figura 4. 3: Modelo de conversão correção | 43 |
| Figura 4. 4: Imagem original (antes da aplicação dos filtros passa-baixa) | 44 |
| Figura 4. 5: Imagem com um filtro passa-baixa 7×7 | 44 |
| Figura 4. 6: Imagem com dois filtros passa-baixa 7×7 | 44 |
| Figura 4. 7: Resultado da primeira classificação | 45 |
| Figura 4. 8: Resultado da segunda classificação | 46 |
| Figura 4. 9: Resultado da classificação final | 48 |
| Figura 4. 10: Áreas importadas para o WindPro | 50 |
| Figura 4. 11: Áreas construídas no WindPro | 50 |
| Figura 4. 12: Layout utilizado para simulação de impacto da rugosidade | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2. 1: Resumo Landsat e CBERS..... | 25 |
| Tabela 2. 2: Resumo dos principais programas espaciais de Imageamento..... | 26 |
| Tabela 2. 3: Bandas dos sensores ET e ETM+ e aplicações | 27 |
| Tabela 3. 1: Valores aproximados para o comprimento de rugosidade e para o expoente de potência em alguns terrenos típicos | 33 |
| Tabela 3. 2: Classificação da superfície quanto à rugosidade. 38 | |
| Tabela 4. 1: Coeficientes de calibração absoluta dos sensores do satélite CBERS-2 (CCn) | 42 |
| Tabela 4. 2: Valores de classe de rugosidade e rugosidade (Z_0) | 49 |
| Tabela 4. 3: Estatística de Vento..... | 51 |
| Tabela 4. 4: Impacto do levantamento de rugosidade na produção | 52 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 2. SENSORIAMENTO REMOTO | 14 |
| 2.1. INTERAÇÃO COM A ATMOSFERA..... | 14 |
| 2.1.1. REFRAÇÃO..... | 15 |
| 2.1.2. ESPALHAMENTO..... | 15 |
| 2.1.3. ABSORÇÃO | 16 |
| 2.1.4. REFLECTÂNCIA DA ATMOSFERA | 17 |
| 2.2. INTERAÇÃO COM ALVOS NA SUPERFÍCIE | 17 |
| 2.3. SATÉLITES E SENSORES..... | 19 |
| 2.3.1. PROJETO LANDSAT | 26 |
| 2.3.2. PROJETO CBERS | 27 |
| 3. IMPACTO DO TERRENO NO VENTO | 30 |
| 3.1. CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA | 30 |
| 3.2. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO COM A ALTURA..... | 31 |
| 3.3. O VENTO GEOSTRÓFICO..... | 35 |
| 3.4. RUGOSIDADE..... | 37 |
| 4. TÉCNICA PROPOSTA | 41 |
| 4.1. TRATAMENTO DIGITAL DE IMAGENS..... | 41 |
| 4.2. CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS | 45 |
| 4.3. ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA COM O WINDPRO | 49 |
| 5. RESULTADOS OBTIDOS | 52 |
| 6. CONCLUSÃO | 53 |
| 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 54 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |

1. INTRODUÇÃO

O setor energético, não só no Brasil como no mundo, há muito sabe da importância da diversificação na matriz energética. Sendo assim a busca por novas fontes de energia, que sempre foi constante, intensifica-se. Juntando isso ao apelo crescente pelas questões ambientais e a discussão acerca dos impactos da atividade humana sobre o planeta, temos um ambiente favorável ao investimento em energias limpas e renováveis.

Dentre as tecnologias para energia renovável destaca-se a energia eólica, a energia elétrica produzida através da energia mecânica dos ventos. Tecnologia esta já consolidada, principalmente na Europa, onde a disponibilidade de outras fontes renováveis, como hidrológica e terra para produção de bicomcombustíveis e biomassa, é pouca. No Brasil a energia eólica vem ganhando fôlego e confirmando sua viabilidade técnica e econômica, tanto que tem sido destaque nos últimos leilões de energia realizados no Brasil.

Mesmo tendo seu *status* alterado de “energia do futuro” para “energia do presente” a energia eólica ainda tem um investimento de implantação muito alto e um componente de risco elevado, pois os ciclos de vento apesar de conhecidos são muito variáveis e imprevisíveis, podendo este risco arruinar a viabilidade de um projeto pelo afastamento de investidores.

Desta forma, durante a fase de avaliação do potencial energético de uma determinada região, todos os esforços são válidos no sentido de dirimir os riscos, fazendo-se um modelo mais próximo o possível da realidade para o cálculo deste potencial. Dentre os aspectos técnicos que influenciam na produção de uma usina eólica e que devem ser considerados durante a fase de estudos de viabilidade, além da velocidade de vento, temperatura e densidade do ar e outros, temos a influência do terreno sobre o vento.

Para estudar o efeito do terreno sobre o vento deve-se levar em consideração dois aspectos importantes: o topográfico e o de cobertura do solo. O aspecto topográfico está relativamente bem estruturado, pois já existem diversas técnicas de levantamento topográfico consolidadas, além da obtenção prévia e gratuita de dados topográficos dos projetos SRTM e ASTER. Ao aspecto de cobertura do solo é que se deve atenção, pois este vem de um levantamento considerado custoso para uma etapa tão preliminar quanto a de estudo de viabilidade técnica e econômica.

Para se determinar a influência da cobertura do solo usa-se uma grandeza recorrente da mecânica dos fluidos: a rugosidade. Dá-se isso porque o vento nada mais é que o fluxo de ar. Sendo assim, para reduzir os riscos envolvidos na análise de viabilidade é importante modelar o terreno de maneira mais real possível. Para estudos preliminares, recomenda-se o

mapeamento de rugosidade numa área que vai até 20 km das bordas do projeto, ou seja: uma área de no mínimo 400km².

Cobrir tal área com levantamento de campo, como dito antes, teria um custo alto. Sendo então, o levantamento através de imagens de satélite uma alternativa viável. Considerando que, a classificação feita apenas pela observação da imagem seria uma aproximação grosseira e imprecisa, este projeto propõe o uso de técnicas de sensoriamento remoto para classificação da cobertura do solo para, juntamente com o cruzamento com tabelas aplicáveis, modelar a rugosidade dentro da área de influência em projetos de parques eólicos.

Modelos teóricos são importantes para estudos de viabilidade técnica e econômica. Porém, são inerentes a estes modelos erros e incertezas. Minimizar ou até eliminar estes fatores é um desafio constante da engenharia.

Este projeto visa propor uma técnica aplicando sensoriamento remoto para levantamento e mapeamento da rugosidade de uma área de interesse para reduzir as incertezas durante o estudo de viabilidade técnica e econômica de um parque eólico. Para tanto, serão descritos os conceitos básicos das áreas de energia eólica, sensoriamento remoto, Processamento digital de imagens e classificação remota. Bem como as etapas necessárias para obtenção de um resultado prático aplicável em softwares específicos de estudo em energia eólica.

2. SENSORIAMENTO REMOTO

Existem várias definições para Sensoriamento Remoto, porém em todas se encontrará a característica principal da técnica, que é a falta de contato físico com o alvo ou objeto estudado.

Um sistema de Sensoriamento Remoto é composto por etapas ou elementos que podem ser divididos em dois processos fundamentais que são a Aquisição de Dados e a Análise dos dados.

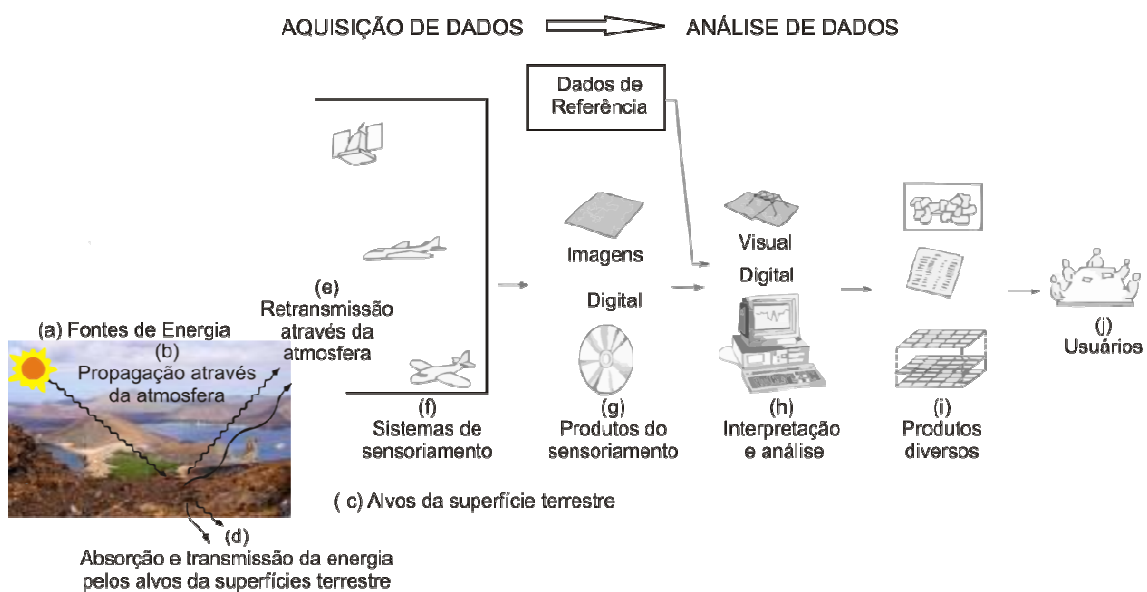


Figura 2. 1: Esquema de um Sistema de sensoriamento Remoto. (Fonte: Accioly, 2011)

A aquisição de dados é a etapa inicial do sistema, onde se obtém os dados propriamente ditos, estes dados são brutos e inacabados. Esta aquisição se dá através da interação da energia eletromagnética com os alvos e com a atmosfera em que esta energia se propaga.

2.1. INTERAÇÃO COM A ATMOSFERA

A principal fonte de energia para o sensoriamento remoto é o Sol, devido à abundância, como sua característica de possuir todo o espectro eletromagnético, ou seja, a luz solar é composta por radiações eletromagnética com faixas de comprimento de onda que cobrem todo o espectro. Porém o sol encontra-se a cerca de 150 milhões de quilômetros da terra, e entre ele e a superfícies da terra temos 100 e 200 km de atmosfera com que a luz solar tem de interagir.

Mesmo os radares e até os aviões portadores de sensores, que voam em altíssimas altitudes, têm de lidar com a atmosfera e seus efeitos depreciativos da trajetória teórica da luz.

Como principais efeitos da atmosfera sobre a radiação eletromagnética, podemos citar: A refração, o espalhamento e a absorção.

2.1.1. REFRAÇÃO

Sabe-se que, ao mudar de meio com diferentes densidades, a radiação eletromagnética muda de velocidade. Este fato causa um efeito chamado refração, que é uma mudança no ângulo de incidência da radiação eletromagnética. Em cada material, de densidades diferentes, a radiação eletromagnética se propaga em uma fração da velocidade da luz. A refração e seus efeitos são, muitas vezes, ignorados nas análises de sensoriamento remoto.

2.1.2. ESPALHAMENTO

Ao atravessar a atmosfera é inevitável o choque da radiação eletromagnética com as partículas que compõem a mesma. O choque com estas partículas acaba espalhando a radiação eletromagnética mudando de forma aleatória o ângulo do trajeto da radiação eletromagnética.

O espalhamento depende do comprimento de onda e do tamanho das moléculas, partículas de poeira, e/ou gotículas de vapor e é classificado de acordo com estes fatores. O espalhamento é classificado como Espalhamento de Rayleigh, espalhamento Mie e Espalhamento não seletivo.

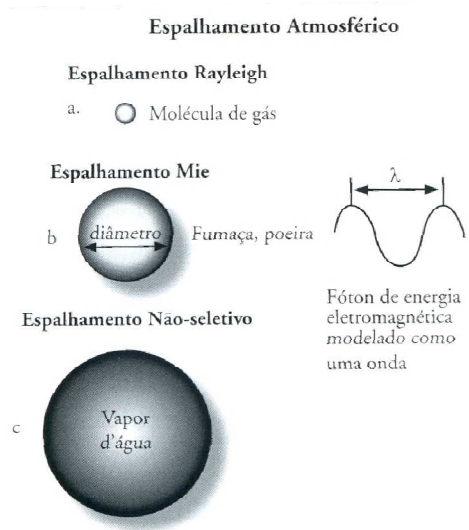


Figura 2. 2: Tipos de espalhamento. (Fonte: Jensen, 2011)

O espalhamento de Rayleigh ou espalhamento molecular é o espalhamento que ocorre quando o diâmetro da matéria com quem a radiação eletromagnética se choca é muitas vezes menor que o seu comprimento de onda. Isso ocorre, geralmente, com moléculas do ar, tais como oxigênio e nitrogênio.

O espalhamento de Rayleigh ocorre em uma altura de 2 a 8 km, sendo que devido à composição desta camada, ondas curtas são mais facilmente espalhadas dando assim o aspecto azulado do céu.

Nos 4,5km finais da atmosfera, em direção à superfície da terra, onde existem partículas de tamanhos muito variados e iguais aos comprimentos de muitas ondas, portanto, existe um espalhamento de ondas com maior comprimento o que dá ao espalhamento de Mie uma magnitude maior que o espalhamento de Rayleigh.

O espalhamento não seletivo ocorre nas etapas inferiores da atmosfera, onde temos partículas bem maiores. Estas partículas já não têm efeito diferenciado com relação ao comprimento de onda, sendo assim, ele espalha de forma igual todo o espectro eletromagnético. Agentes como as gotículas de água e cristais de gelo que formam as nuvens espalham todos os comprimentos de onda da luz visível, tornando-se assim, brancas.

O espalhamento tem efeitos severos sobre as imagens utilizadas no sensoriamento remoto, podendo muitas vezes, inutilizá-las.

2.1.3. ABSORÇÃO

Quando a radiação eletromagnética se choca com uma partícula, mais especificamente as menores a nível molecular, estas moléculas ficam excitadas e energizadas, e então, rerradiam esta energia. Porém, uma parte desta energia é transformada em calor, reduzindo o valor energético do fóton emitido. Portanto ao comprimento de onda rerradiada é maior. Neste processo, dizemos que a molécula absorveu a energia. É o processo de absorção.

Cada molécula, devido à sua natureza, absorve uma determinada gama de comprimentos de onda, portanto, cada composto pertencente à atmosfera terá suas bandas de absorção e a atmosfera terá a sua própria, que seria a soma das absorções de seus principais componentes, tais como a água (H₂O), o dióxido de carbono (CO₂), o oxigênio (O₂), o ozônio (O₃) e o óxido nitroso (N₂O). Como podemos ver na figura 2.3.

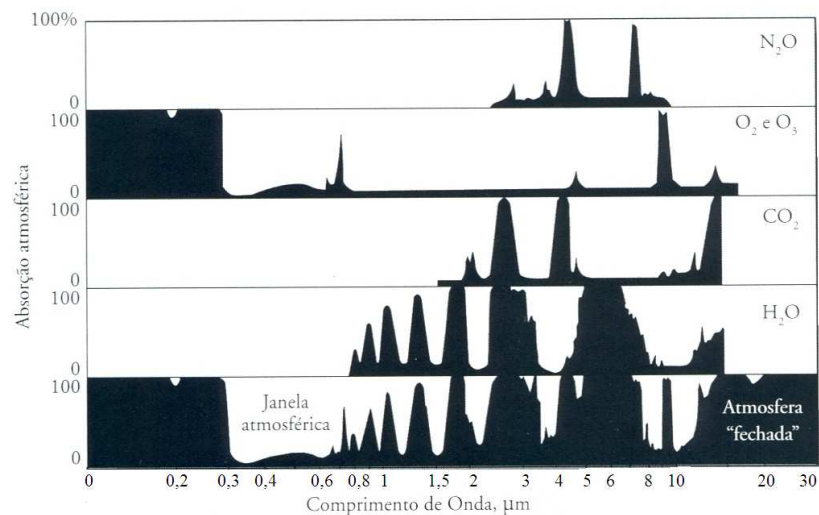


Figura 2. 3: Absorção da atmosfera de acordo com o comprimento de onda. (Fonte: Jensen, 2011)

2.1.4. REFLECTÂNCIA DA ATMOSFERA

Reflectância é o processo de rerradiação da radiação eletromagnética, sendo importantíssima no estudo dos alvos na superfície, ela também ocorre na atmosfera principalmente no topo das nuvens que juntos com outros elementos da atmosfera devolvem para o espaço uma grande parcela da energia vinda do sol e do próprio espaço.

2.2. INTERAÇÃO COM ALVOS NA SUPERFÍCIE

Os efeitos da atmosfera sobre a radiação eletromagnética são importantes para efeito de mitigação dos mesmos, porém, o que de fato interessa são os alvos na superfície e a interação dos mesmos com a radiação eletromagnética. Trata-se dos terrenos, vegetação, corpos d'água, construções e outros alvos que pretendemos estudar. Sendo importante conhecer suas características e comportamentos na presença da radiação eletromagnética.

Para tal utilizamos uma grandeza chamada reflectância, sendo estudadas para cada tipo de material, para todo o espectro eletromagnético, desenhando assim um perfil espectral, desenhado na figura 2.4. Como podemos ver, estas curvas são bem características e servem no sensoriamento remoto para identificar o alvo.

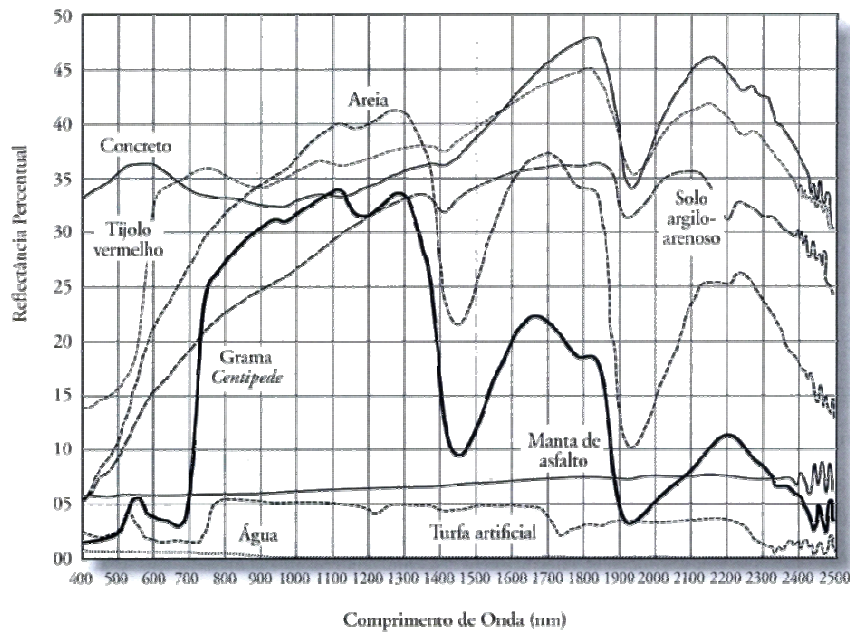


Figura 2. 4: Perfil espectral típico de alguns alvos. (Fonte: Jensen, 2011)

Podemos perceber que, por exemplo, a grama tem alta reflectância para radiações com ondas de comprimento entre 750 e 1350nm tendo uma queda brusca antes e depois desta faixa.

Podemos classificar os alvos quanto à forma como eles refletem a energia eletromagnética, por exemplo, a água apresenta uma baixa reflectância em todo espectro, principalmente em radiações com maior comprimento de onda e, portanto, menos energéticas. Isto se dá devido ao caráter especular da água. Isto significa que, praticamente toda radiação eletromagnética que incide na água lisa, será refletida no mesmo ângulo de incidência, a estes corpos que assim refletem a radiação chamamos de Refletores espaciais perfeitos.

O contrário de um Refletor especular perfeito seria um Refletor difuso perfeito que refletiria a radiação em todas as direções possíveis. Porém, na natureza, dificilmente encontraríamos refletores que estariam no extremo. Alguns apenas podem ser considerados como tal, como no caso a água, mas o mais comum é encontrarmos variações entre eles, aos quais chamamos de Refletor especular quase-perfeito e Refletor difuso quase-perfeito. A figura 2.5 mostra o esquema destes refletores.

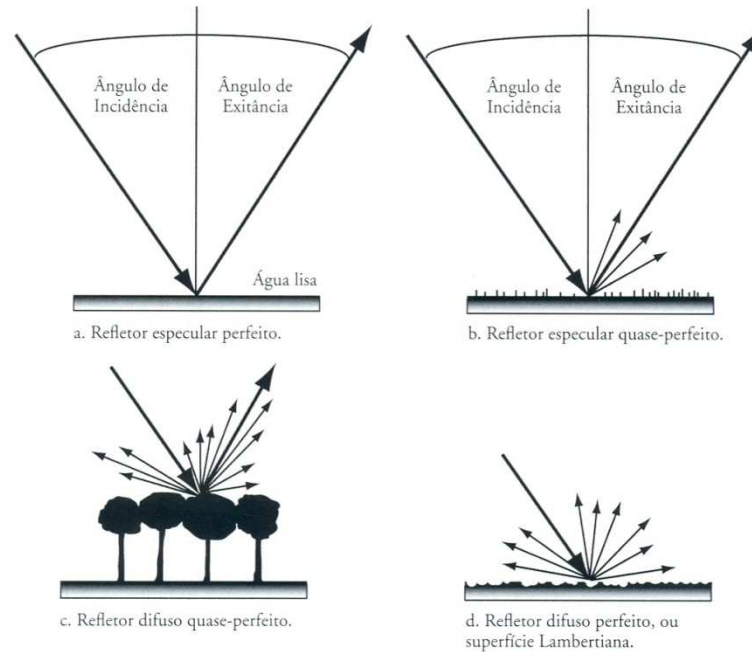


Figura 2. 5: Tipos de refletores. (Fonte: Jensen, 2011)

2.3. SATÉLITES E SENSORES

Os satélites são hoje a principal fonte de dados para o sensoriamento remoto, embora existam outros veículos para transporte dos sensores, tais como aviões, aprofundaremos o estudo nos satélites e suas características. Conceitualmente, um satélite é um corpo que orbita um planeta, obviamente, nossos objetos de estudo serão os satélites artificiais, os quais foram colocados em órbita pelo homem com objetivos específicos.

O modo como cada satélite orbita a terra difere entre eles. Mas, podemos classificar os satélites em relação à órbita como satélites Geossíncronos ou geoestacionários que observam sempre a mesma região do globo, pois giram na mesma velocidade da rotação da terra, sendo em sentido contrário. A altitude da órbita é da ordem dos 36.000 km para que o período da órbita seja de 24 h. Para exemplificar temos: satélites de observação meteorológica METEOSAT, GOES. Também temos os satélites heliossíncronos, com órbita quase polares para cobrir toda a superfície terrestre, e assegurar as mesmas condições de iluminação para a mesma zona. São exemplos destes os satélites de observação da terra como Landsat, SPOT, NOAA, etc.

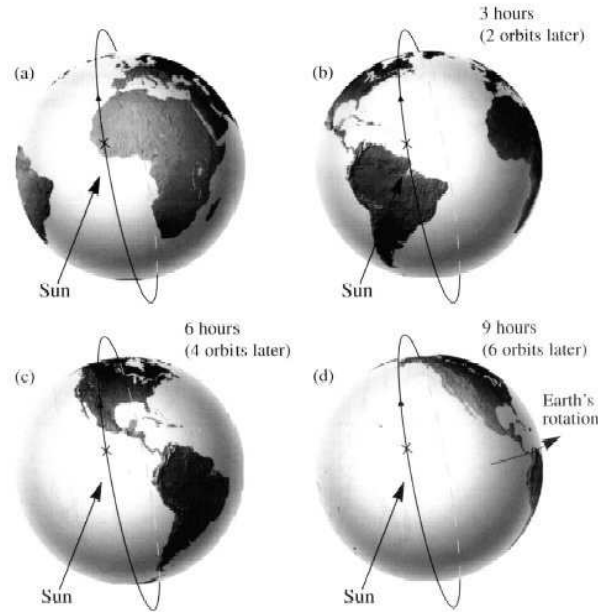


Figura 2. 6: Órbita Geossíncrona. (Fonte: Accioly, 2011)

Para o processo de aquisição destes dados são colocados sensores nos satélites. Os sensores são dispositivos capazes de detectar a energia eletromagnética considerando uma determinada faixa do espectro eletromagnético para cada sensor. Então o sensor irá transformá-las em um sinal elétrico podendo, então, estas informações serem armazenadas e transmitidas em tempo real ou em lotes de informação.

Podemos classificar os sensores quanto à fonte de energia excitante do mesmo, sendo eles classificados como sensores passivos ou sensores ativos. Os primeiros usam uma fonte de energia externa como a do sol, por exemplo, que é rerradiada pelos objetos na superfície da terra. Já os sensores ativos possuem sua própria fonte de energia, é o caso dos radares.

Os sensores são ainda classificados entre sensores imageadores e os não imageadores. Sendo os não imageadores aqueles que detectam a energia de um único ponto enquanto que os imageadores detectam a energia de uma matriz de pontos. Os sensores não imageadores são utilizados em laboratórios, ou no campo para levantamento de curvas espectrais de alvos, enquanto que os imageadores são amplamente utilizados para a criação imagens digitais dos alvos, são os sensores presentes nos satélites.

Dentre as características dos sensores destacam-se as resoluções dos mesmos, delas dependem a escolha de cada sensor para cada aplicação.

A resolução espacial é o tamanho da menor área passível de ser registrada por um dado sensor. Tecnicamente é o diâmetro do círculo definido no terreno pelo campo de visada

instantâneo do sensor (IFOV = Instantaneous Field of View), que depende da altitude da plataforma e do cone angular de visibilidade do sensor. Por simplicidade é tomada como uma das dimensões espaciais de um píxel de uma imagem de satélite como exemplo, podemos citar o Landsat com resolução de 30 m. Ou seja cada pixel cobre uma área de 30m por 30m.

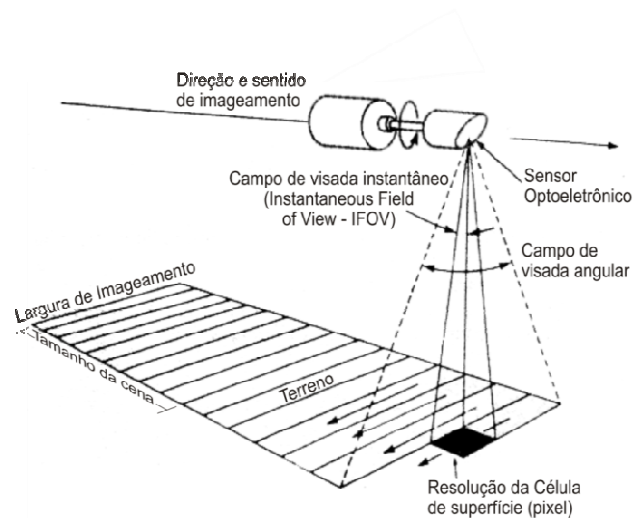


Figura 2. 7: Campo de visada instantâneo (IFOV) e outras características da geração de uma imagem por um sensor optico-elétrico. (Fonte: Accioly, 2011)

Para melhor exemplificação, podemos ver na Figura 2.8 uma imagem de um mesmo local com sensores de diferentes resoluções espaciais.

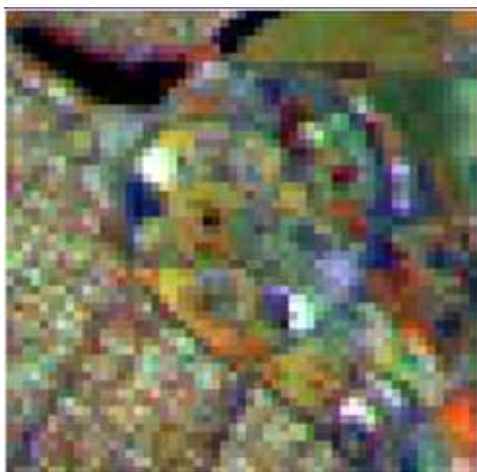


Figura 2.8a: Landsat-TM, Resolução de 30m. Imagem de 1984.



Figura 2.8b: SPOT-Pan, Resolução de 10m. Imagem de 1986.



Figura 2.8c: Ikonos-Pan, Resolução de 1m. Imagem de 2000.



Figura 2.8d: QuickBird-Pan+MS, Resolução de 65cm. Imagem de 2002.

Figura 2. 8: Exemplos de imagens de diferente resolução espacial. (Fonte: Accioly, 2011)

A resolução espectral diz respeito ao número de bandas e a largura das bandas dentro de um intervalo de comprimento de onda. Ou seja, é a resolução responsável pela determinação do perfil espectral do alvo, portanto, quanto maior a resolução espectral, mais detalhado será este perfil, melhorando as chances de classificar o alvo remotamente.

Classificamos a imagem quanto à sua resolução espectral em três tipos:

- Pancromáticas: uma só banda
- Multiespectrais: várias bandas em regiões espectrais distintas
- Hiperespectrais: inúmeras bandas (dezenas ou centenas) formando um contínuo espectral

Na Figura 2.9 Vemos exemplos das bandas de alguns sensores:

A resolução radiométrica é relativa aos níveis diferentes de sinal que o sensor pode discriminar. Devido à ascensão digital usa-se bits para medir a resolução radiométrica . Se o sensor tiver a capacidade de distinguir N níveis radiométricos do sinal, então a resolução é o número inteiro imediatamente superior a $\log_2(N)$. Sendo a resolução radiométrica mais comum a de 8 bits ou 256 níveis. Podemos ver na figura 2.10 os efeitos da resolução radiométrica sobre as imagens.

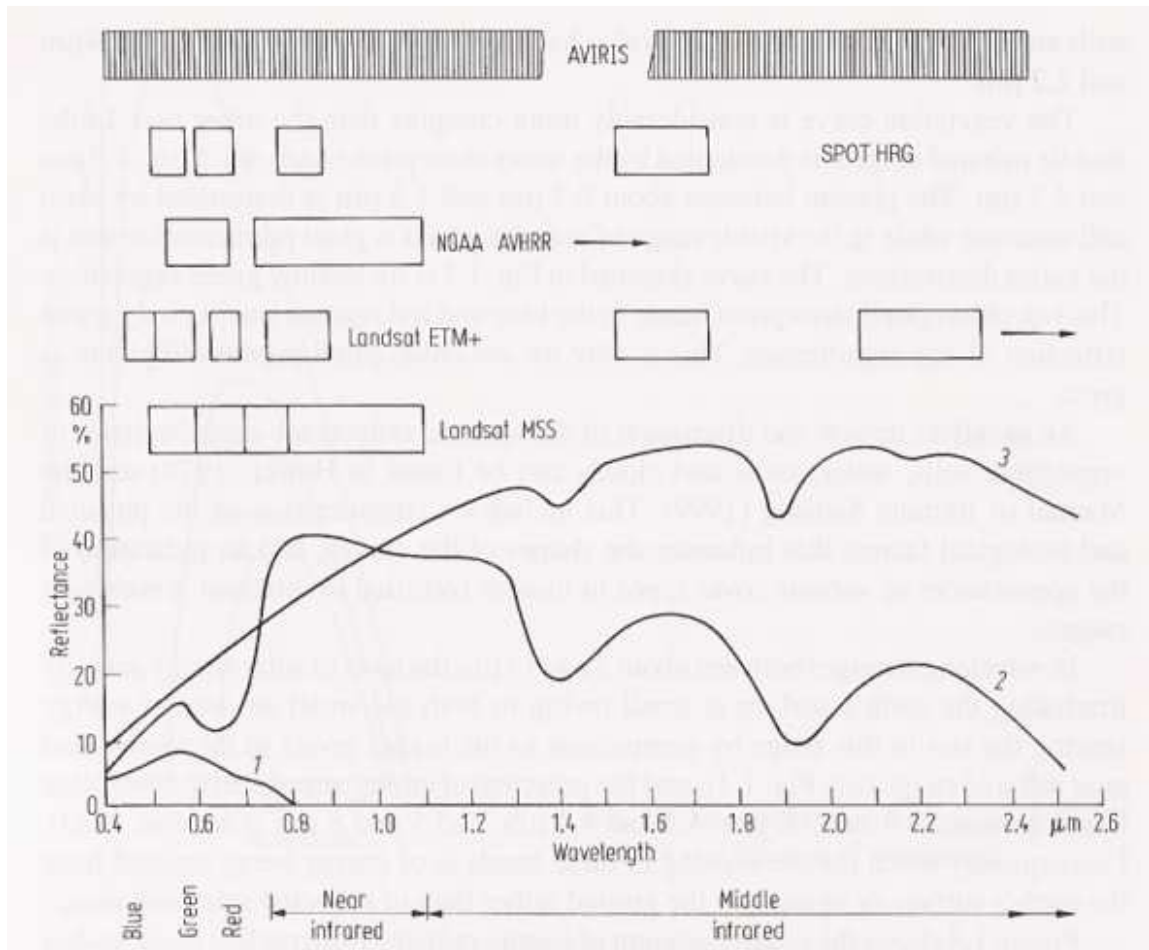


Figura 2. 9: Resolução espectral de alguns sensores e suas correspondências com curvas espectrais de amostras de solo (a), vegetação (b) e água (c). (Fonte: Accioly, 2011)



Figura 2.10a: 1 bits = $2^1 = 2$ Níveis de Cinza (NC); Valor mínimo = 0; Valor máximo = 1



Figura 2.10b: 2 bits = $2^2 = 4$ Níveis de Cinza (NC); Valor mínimo = 0; Valor máximo = 3



Figura 2.10c: 3 bits = $2^3 = 8$ Níveis de Cinza (NC); Valor mínimo = 0; Valor máximo = 7



Figura 2.10d: 8 bits = $2^8 = 256$ Níveis de Cinza (NC); Valor mínimo = 0; Valor máximo = 255

Figura 2. 10: Exemplo de imagens de diferente resolução radiométrica. (Fonte: Accioly, 2011)

Como dito antes, existem diversos programas espaciais com objetivo de imagear a superfície da terra, alguns como o CBERS e o LANDSAT têm suas imagens disponibilizadas gratuitamente e outros como o QuickBird têm de ter suas imagens adquiridas através de seus representantes em cada país. Sendo os dois primeiros amplamente utilizados no Brasil pelo fato de serem disponibilizados no site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e pelo auto custo das imagens de programas como o QuickBird.

A seguir, nas tabelas 2.1 e 2.2, um resumo dos principais programas espaciais de imageamento da superfície da terra através de satélites

Tabela 2. 1: Resumo Landsat e CBERS

| Satélite | Landsat | | | CBERS | | | |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|----------|----------|
| | Sensor | MSS | TM | ETM+ | CCD | IR-MSS, | WFI |
| Largura de Imageamento (km) | 185 | 185 | 185 | 113 | 120 | 890 | 27 |
| Operacional desde | 1972 | 1984 | 1999 | 1999 | 1999 | 1999 | 2004 |
| Número de Bandas | 4 | 7 | 8 | 5 | 4 | 2 | 4 |
| Faixa do Espectro | VIS, IVP, | VIS, IVP, IVC, IVT | VIS, IVP, IVC, IVT | VIS, IVP | VIS, IVP, IVC, IVT | VIS, IVP | VIS, IVP |
| Resolução espacial (m) | 79 | 30 e 120 | 15, 30 e 60 | 20 | 80 | 260 | 2,7 |
| Resolução radiométrica (bits) | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Resolução temporal (dias) | 18 | 16 | 16 | 26 nadir e 3 fora do nadir | 26 | 3 a 5 | 130 |
| Situação atual | Não operacional | Em operação | Não operacional | CBERS 2B | CBERS 2 | CBERS 2B | CBERS 2B |

Fonte: ACCIOLY (2011)

Tabela 2. 2: Resumo dos principais programas espaciais de Imageamento

| Satélite | SPOT | | | | | | EOS-A | MODIS | NOAA | EO-1 | Quick bird | Ikonos |
|-------------------------------|----------|---------------|---------------|------|---------------|---------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|------------|---------------|
| Sensor | HRV | HRVIR | HRG | HRS | VGT | VGT-2 | ASTER | PFM e FM | AVHRR | Hyperion | | HRV |
| Largura de Imageamento (km) | 60 | 60 | 60 | 120 | 2250 | 2250 | 60 | 2330 | 2700 | 7,2 | 16,5 | 11 |
| Operacional desde | 1986 | 1998 | 2002 | 2002 | 1998 | 2002 | 1998 | 1999 | 1978 | 2000 | 2001 | 2000 |
| Número de Bandas | 4 | 5 | 5 | 1 | 4 | 4 | 14 | 36 | 5 | 242 | 5 | 4 |
| Faixa do Espectro | VIS, IVP | VIS, IVP, IVM | VIS, IVP, IVM | VIS | VIS, IVP, IVM | VIS, IVP, IVM | VIS, IVP, IVC, IVM, IVT | VIS, IVP, IVC, IVM, IVT | VIS, IVP, IVM, IVT | VIS, IVP, IVC, IVM | VIS, IVP | VIS, IVP, IVC |
| Resolução espacial (m) | 10, 20, | 10, 20 | 5, 10 | 10 | 1165 | 1165 | 15, 30, 90 | 250, 500, 1000 | 1100 x 1100 e 2400 x 6900 | 30 | 2,44 | 1 e 4 |
| Resolução radiométrica (bits) | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 e 12 | 12 | 10 | 16 | 16 | 11 |
| Resolução temporal (dias) | 26 | 26 | 26 | 26 | 1 | 1 | 16 | 1 a 2 | 0,5 | 16 | 1 e 3,5 | 2,9 e 1,5 |
| Situação atual | OP | OP | OP | OP | OP | OP | OP | OP | OP | OP | OP | OP |

Fonte: ACCIOLY (2011)

2.3.1. PROJETO LANDSAT

Desde 1972, o programa LANDSAT, Gerenciado pela NASA e pelo *U.S. Geological Survey*, tem feito imagens da superfície da terra através de satélites. Ao todo foram lançados 6 satélites tendo havido uma falha de lançamento do Landsat 6 em 1993. A seguir segue na figura 2.11 vemos a linha temporal do projeto com os anos de lançamento e desativação dos satélites com

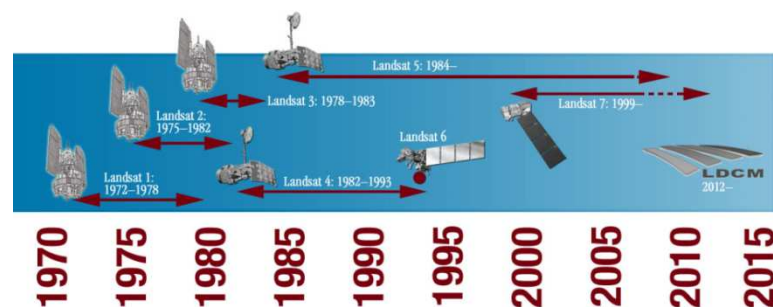


Figura 2. 11: Linha temporal do Projeto Landsat. (Fonte: NASA, 2011)

Tabela 2. 3: Bandas dos sensores ET e ETM+ e aplicações

| Bandas Espectrais do Landsat 5 TM e Landsat 7 ETM+ | Comprimento de Onda (μm) | Aplicação |
|--|---------------------------------------|---|
| Banda 1 – Azul | 0,45 - 0,52 | Mapeamento batimétrico, distinção entre solo e vegetação, e entre vegetação decidual e conífera |
| Banda 2 – Verde | 0,52 - 0,60 | Mapeamento da vegetação, determinação do vigor da vegetação |
| Banda 3 – Vermelho | 0,63 - 0,69 | Absorção da clorofila. Diferenciação de espécies vegetais |
| Banda 4 – Infravermelho Próximo | 0,77 - 0,90 | Levantamento da biomassa, delineamento de corpos d'água, mapeamento geomorfológico |
| Banda 5 – Infravermelho de Ondas Curtas | 1,55 - 1,75 | Discriminação da umidade do solo e vegetação, diferenciação entre nuvens e neve |
| Banda 6 – Infravermelho Termal | 10,40 - 12,50 | Mapeamento de propriedades termais e estimativa da umidade do solo |
| Banda 7 – Infravermelho de Ondas Curtas | 2,09 - 2,35 | Mapeamento de rochas alteradas hidrotermicamente, associadas a depósitos de minerais |
| Banda 8 – Pancromática (Apenas Landsat 7) | 0,52 - 0,90 | 15 metros de resolução, maior definição na imagem |

Fonte: ACCIOLY (2011)

Podemos ver na imagem, retirada do site do projeto, a presença do LDCM (Landsat Data Continuity Mission) que prevê um lançamento de mais um satélite em dezembro de 2012.

Como visto na figura 2.11 ainda temos em operação o Landsat 5 e com Landsat 7, este com problemas técnicos desde 2003, cujos sensores são o ET e o ETM+ respectivamente, para os programas anteriores foram utilizados os sensores MISS. Acima temos a tabela 2.3, que apresenta a resolução espectral destes sensores e suas aplicações com destaque para a banda pancromática cuja resolução espacial é maior.

2.3.2. PROJETO CBERS

O CBERS (China-Brazil Earth-Resources Satellite) ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres é uma parceria entre Brasil e China fechada em 1988.

O CBERS-1 foi lançado em 14 de outubro de 1999 com três sensores imageadores: O CCD que é uma Câmera Imageadora de Alta Resolução; O IRMSS-Imageador por Varredura de Média Resolução e o WFI-Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada.

O CBERS-2 foi lançado em 21 de outubro de 2003 com os mesmos três sensores do CBERS-1 e parou de funcionar em 15 de janeiro de 2009 após totalizar 27 mil órbitas completas. O CBERS-2B foi lançado em 19 de setembro de 2007 com a substituição do sensor IRMSS por um sensor HCR que é uma Câmera Pancromática de Alta Resolução.

O lançamento dos CBERS-3 e CBERS-4 está previsto para o final de 2011 com uma participação de 50% do Brasil cuja participação anterior era de 30%.

Abaixo, nas figuras 2.12 a 2.15 seguem tabelas com as características dos sensores CBERS.

| Características do Imageador de Amplo Campo de Visada WFI | |
|---|--|
| Bandas espectrais | 0,63 - 0,69 μm (vermelho) 0,77 - 0,89 μm (infra-vermelho) |
| Campo de Visada | 60° |
| Resolução espacial | 260 x 260 m |
| Largura da faixa imageada | 890 km |
| Resolução temporal | 5 dias |
| Frequência da portadora de RF | 8203,35 MHz |
| Taxa de dados da imagem | 1,1 Mbit/s |
| Potência Efetiva Isotrópica Irradiada | 31,8 dBm |

Figura 2. 12: Características técnicas do Sensor WFI nos satélites CBERS-1, 2 e 2B. (Fonte: CBERS, 2011)

| Características da Câmera Imageadora de Alta Resolução CCD | |
|--|---|
| Bandas espectrais | 0,51 - 0,73 μm (pan) 0,45 - 0,52 μm (azul) 0,52 - 0,59 μm (verde) 0,63 - 0,69 μm (vermelho) 0,77 - 0,89 μm (infravermelho próximo) |
| Campo de Visada | 8,3° |
| Resolução espacial | 20 x 20 m |
| Largura da faixa imageada | 113 km |
| Capacidade de apontamento do espelho | $\pm 32^\circ$ |
| Resolução temporal | 26 dias com visada vertical (3 dias com visada lateral) |
| Frequência da portadora de RF | 8103 MHz e 8321 MHz |
| Taxa de dados da imagem | 2 x 53 Mbit/s |
| Potência Efetiva Isotrópica Irradiada | 43 dBm |

Figura 2. 13: Características técnicas do Sensor CCD nos satélites CBERS-1, 2 e 2B. (Fonte: CBERS, 2011)

| Características do Imageador por Varredura de Média Resolução IRMSS | |
|---|--|
| Bandas espectrais | 0,50 - 1,10 μm (pancromática) 1,55 - 1,75 μm (infravermelho médio) 2,08 - 2,35 μm (infravermelho médio) 10,40 - 12,50 μm (infravermelho termal) |
| Campo de Visada | 8,8° |
| Resolução espacial | 80 x 80 m (160 x 160 m termal) |
| Largura da faixa imageada | 120 km |
| Resolução temporal | 26 dias |
| Frequência da portadora de RF | 8216,84 MHz |
| Taxa de dados da imagem | 6,13 Mbit/s |
| Potência Efetiva Isotrópica Irradiada | 39,2 dBm |

Figura 2. 14: Características técnicas do Sensor IRMSS nos satélites CBERS-1 e 2. (Fonte: CBERS, 2011)

| Características da Câmera Pancromática de Alta Resolução - HRC | |
|--|--|
| Banda espectral | 0,50 - 0,80 μm (pancromática) |
| Campo de Visada | 2,1° |
| Resolução espacial | 2,7 x 2,7 m |
| Largura da faixa imageada | 27 km (nadir) |
| Resolução temporal | 130 dias na operação proposta |
| Taxa de dados da imagem | 432 Mbit/s (antes da compressão) |
| Quantização | 8 bits |

Figura 2. 15: Características técnicas do Sensor HCR presente apenas no satélite CBERS-2B. (Fonte: CBERS, 2011)

3. IMPACTO DO TERRENO NO VENTO

Para avaliar o uso da energia eólica em um determinado local, ou região, é necessário o estudo detalhado das características desse local.

O terreno é fundamental no projeto e implantação da fazenda eólica, Uma vez que suas características topográficas e orográficas afetam o comportamento do vento e, conseqüentemente, a produção de energia elétrica a partir deste. O espaço disponível é um fator que pode limitar o seu uso para a implantação de parques eólicos.

Quando se pretende estudar a possibilidade de uso da energia eólica em uma região, deve-se levar em consideração várias características desta região. Entre elas, as características topográficas e orográficas, assim como suas características de cobertura e uso do solo que definem as características de vento local. Porém, para determinar a característica de vento da região temos o conceito da camada limite atmosférica.

3.1. CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

Chamamos camada limite atmosférica a parcela da atmosfera acima de uma determinada altura onde se torna desprezível o atrito do ar com a superfície da terra e seus efeitos de retardo do fluxo nas proximidades do solo. Nesta camada existe o balanço de forças sem o atrito e se estabelece o fluxo de ar com a velocidade do vento de gradiente ao longo das isóbaras. A Figura 3.1 ilustra esse comportamento do vento, mostrando a camada limite atmosférica. A atmosfera acima da camada limite é chamada de atmosfera livre. A camada limite atmosférica pode apresentar centenas de metros de altura acima do solo. Como exemplo do efeito da rugosidade do solo sobre a velocidade final do vento próximo à superfície, esta pode alcançar em torno de 40% vento de gradiente, ou vento geostrófico, enquanto que sobre a água chega a 70%. O vento geostrófico é um resultado do balanço entre a força de gradiente de pressão e a força de Coriolis e está na atmosfera livre. Acima da camada limite atmosférica.

Como podemos ver na figura 3.1 os ventos na atmosfera livre também aumentam acima do limite superior da camada limite, mas agora de forma quase linear, até chegar à tropopausa, onde começa a diminuir novamente.

A mudança de altura muda também a direção do vento, até que a mesma seja igual à das isóbaras. Entretanto, próximo ao solo a variação da direção do vento é praticamente imperceptível, sendo tratada como constante, exceto em terrenos muito complexos, sendo direção uma função da topografia. Podemos então, para os estudos relacionados ao uso da

energia eólica como fonte para produção de eletricidade, considerar a direção do vento constante em função da altura.

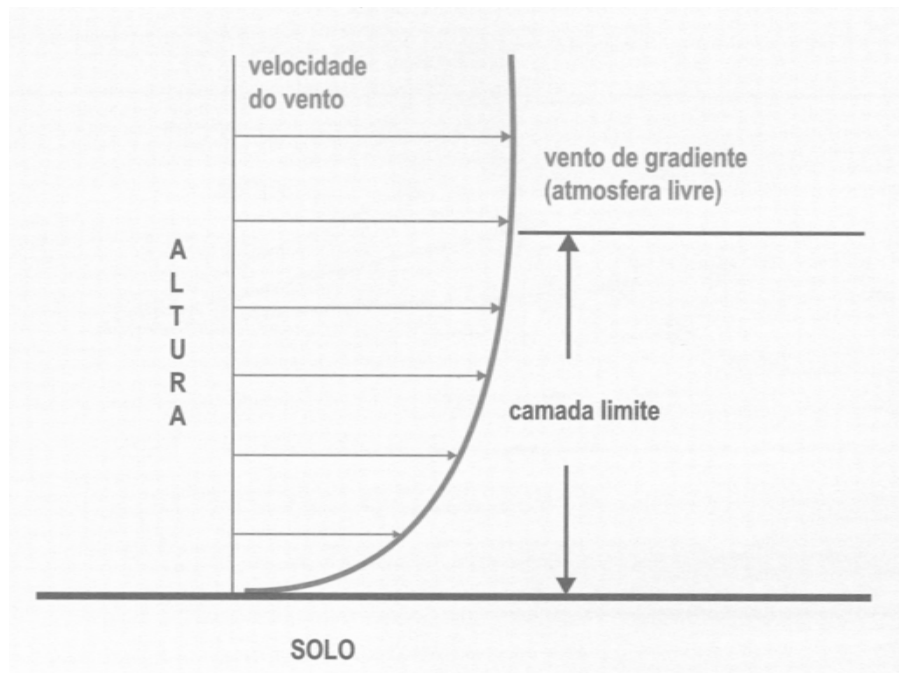


Figura 3. 1: Camada limite atmosférica. (Fonte: Custódio, 2007)

Analisando mais atentamente a camada limite atmosférica, esta pode ser dividida em três faixas. A camada limite planetária, a camada limite da superfície e a camada sub-laminar sendo que a camada limite planetária alcança alturas de 1000 a 2000 m, enquanto que a camada limite da superfície chega a alturas entre 50 e 150 m. A camada sub-laminar é muito estreita (milímetros ou centímetros) e o vento tem velocidade nula ou quase. Portanto é muito importante a compreensão e o estudo do comportamento vertical do vento na camada limite da superfície que é a camada alvo das turbinas eólicas.

3.2. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO COM A ALTURA

Analisando-se a camada limite superficial, observa-se que nesta camada, a velocidade do vento tem um comportamento aproximado por uma função logarítmica ou por uma função exponencial. Gerando assim dois modelos de análise: o perfil logarítmico e o perfil exponencial.

O perfil logarítmico é dado pela expressão abaixo:

$$V = \frac{v^*}{K} \ln\left(\frac{h}{Z_0}\right) \quad (1)$$

Onde:

v^* = velocidade de atrito [m/s];

K = constante de Von Karman ($K=0,4$) [adimensional];

h = altura acima do solo (m);

Z_0 = comprimento de rugosidade do solo [m].

O comprimento de rugosidade Z_0 é a altura média das saliências do solo responsáveis pela força de atrito que se opõe ao movimento da massa de ar, resultando em redução da velocidade do vento próximo à superfície do solo.

A velocidade de atrito v^* representa a tensão de cisalhamento da camada sub-laminar, ou seja, da primeira camada de ar, junto ao solo. A tensão de cisalhamento trata-se da força de atrito oferecida pela rugosidade do solo ao movimento do ar.

Usando-se artifícios matemáticos e o comportamento logarítmico da velocidade do vento podemos determinar a velocidade do vento numa determinada altura, quando temos a velocidade em outra altura, utilizando-se a expressão abaixo:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\ln\left(\frac{h_1}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_2}{Z_0}\right)} \quad (2)$$

Onde:

h_1 = altura do solo do ponto 1 [m];

h_2 = altura do solo do ponto 2 [m];

v_1 = velocidade do vento no ponto 1 [m/s];

v_2 = velocidade do vento no ponto 2 [m/s];

Z_0 = comprimento de rugosidade no local [m].

O perfil exponencial consiste em outra forma de determinação da velocidade do vento em alturas diferentes, dada por:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (3)$$

Onde:

h_1 = altura do solo do ponto 1 [m];

h_2 = altura do solo do ponto 2 [m];

v_1 = velocidade do vento no ponto 1 [m/s];

v_2 = velocidade do vento no ponto 2 [m/s];

α = expoente de potência no local [adimensional].

O expoente α varia de $\alpha = 0,06$, para locais lisos, como o mar, até $\alpha = 0,6$, para locais com alta rugosidade, como cidades.

Este método, mesmo sendo um modelo simplificado, é vastamente usado para análises preliminares ou sem a necessidade de grande precisão. Para estudos genéricos onde o terreno não é especificado, o valor $\alpha = 1/7$ (0.14) é frequentemente usado, refletindo um terreno plano e com poucos arbustos.

A tabela 3.1 mostra alguns exemplos de terrenos com seus respectivos comprimentos de rugosidade Z_0 e expoentes de potência α .

Tabela 3. 1: Valores aproximados para o comprimento de rugosidade e para o expoente de potência em alguns terrenos típicos

| Terreno | Z_0 [m] | α |
|----------------|-----------|----------|
| Subúrbios | 1,500 | 0,32 |
| Plantações | 0,050 | 0,19 |
| Campos | 0,030 | 0,13 |
| Áreas com neve | 0,003 | 0,10 |

O comportamento logarítmico do perfil de velocidade do vento perde precisão para alturas maiores que 50 m devido à importância que o fluxo quente da superfície adquire. Assim, devemos adequar a expressão do perfil da velocidade do vento, para a equação (3), acrescentando um termo que compense esses efeitos, que é a função ψ , que é chamada de função de correção, porque faz a correção da influência do fluxo de calor do solo no comportamento da camada limite atmosférica. Esta função além de variar com a altura