



Auscultação Geodésica em Torres Eólicas Onshore: Definição do Sistema de Referência e de Medição para o Monitoramento

Geodetic Auscultation on Onshore Wind Towers: Definition of Reference System and Measurement for Monitoring

Luiz Filipe Campos do Canto ¹ e Andréa de Seixas ²

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, Brasil. luizfilipecc@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2439-9429>

² Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, Brasil. adeseixas7@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5879-4902>

Recebido: 09.2019 | Aceito: 03.2020

Resumo: A auscultação geodésica em torres eólicas *onshore* e a escassez de metodologias geodésicas/topográficas de medição, nestas estruturas, incentivou a elaboração deste trabalho. O monitoramento geodésico pode indicar o risco de movimentos nos componentes estruturais da torre, que de acordo com a indicação do projetista ultrapassem as tolerâncias preestabelecidas em projetos, podendo assim, minimizar acidentes e danos à torre e seu entorno. Este trabalho foi realizado nas torres eólicas Gravatá 01 e 02 do Parque Eólica Gravatá Geradora de Energia S.A., localizado no município brasileiro de Gravatá-PE, para definir uma metodologia para averiguar deslocamentos de pontos-objeto localizados na torre e na base da fundação. Para avaliar possíveis movimentos horizontais na torre foram implantados marcos de concreto, hastes metálicas e folhas refletivas, observados por meio dos métodos de posicionamento GNSS, poligonação com centragem forçada, irradiação tridimensional e método de medição das bordas, que por meio de uma configuração geométrica apropriada e discutida neste trabalho, permitiu a detecção do centro virtual das seções transversais circulares ao longo da torre, possibilitando o cálculo do ângulo de deflexão da mesma. Para avaliar possíveis movimentos verticais foram implantados pinos, nas bases das torres, medidos por meio de nivelamento geométrico de altíssima precisão, estabelecendo-se neste trabalho a medição zero de referência.

Palavras-chave: Torres eólicas *onshore*. Métodos geodésicos/topográficos. Auscultação geodésica.

Abstract: The geodetic auscultation in onshore wind towers and the scarcity of geodetic/topographic measurement methodologies, in these structures, encouraged the elaboration of this work. Geodetic monitoring can indicate the risk of power generation problems, which, according to the designer's indication, exceeds pre-established design tolerances, thus minimizing accidents and damage to the tower and its surroundings. This work was carried out in the Gravatá 01 and 02 wind towers of the Gravatá Geradora de Energia S.A., located in the Brazilian municipality of Gravatá-PE, to define a methodology for ascertaining displacements of object points located in the tower and at the base of the foundation. In order to evaluate possible horizontal movements in the tower, concrete landmarks, metal rods and reflective sheets were implanted, observed by means of the GNSS positioning methods, traverse with forced centering, three-dimensional irradiation and edge measurement method, which through an appropriate geometric configuration and discussed in this work, it allowed the detection of the virtual center of the circular cross sections along the tower, allowing the calculation of its deflection angle. To evaluate possible vertical movements, pins were implanted at the base of the towers, measured by means of high precision geometric leveling of very high precision, establishing in this work the zero reference measurement.

Keywords: Onshore Wind Towers. Geodetic/Topographic Methods. Geodetic Auscultation.

1 INTRODUÇÃO

As pesquisas mundiais relacionadas ao monitoramento em torres eólicas e seus componentes são poucas, comparadas ao crescimento da capacidade de geração eólica e ao número de acidentes registrados entre o período de 1996 a 2017 (PARQUE EÓLICO CAITHNESS, 2018).

Estudos envolvendo o uso de métodos geodésicos em torres eólicas são poucos. Podem-se destacar os trabalhos de Dragomir, Negrilă e Sărăcin (2014), que realizaram o monitoramento da torre eólica essencialmente por métodos geodésicos e fizeram um comparativo com resultados obtidos por inclinômetros eletrônicos, colocados em posições e lugares especiais dispostos radialmente dentro da torre. Os resultados do trabalho comprovaram que o uso dos métodos geodésicos para o monitoramento de torres eólicas adiciona mais informações em comparação com o monitoramento usando sensores de inclinação, ressaltando o emprego dos métodos geodésicos para a determinação de deslocamentos e deformações destas estruturas.

Do ponto de vista nacional, ressalta-se que não foram encontradas pesquisas e trabalhos envolvendo monitoramento em torres eólicas, ainda que o país venha apresentando crescimentos que se destacam na América Latina e também no *ranking* mundial em capacidade instalada de energia eólica.

Devido ao considerável crescimento no número de torres eólicas *onshore*, necessita-se de pesquisas envolvendo locação, controle dimensional (controle posicional) e monitoramento destas torres. Com a auscultação geodésica é possível determinar a posição de elementos estruturais das torres eólicas, por meio de coordenadas cartesianas obtidas por meio de técnicas de levantamentos geodésicos, com o propósito de determinar a posição de seus elementos estruturais, possibilitando também a análise multitemporal dos possíveis deslocamentos e/ou deformidades das mesmas (CANTO, 2018).

Com a falta de acompanhamento do comportamento destas estruturas, verifica-se a necessidade da aplicação de procedimentos para o monitoramento da verticalização e estabilidade das torres eólicas. A proposta deste trabalho foi de desenvolver uma metodologia para a definição de um Sistema de Referência de Medição (SRM) estável com emprego de equipamentos geodésicos do tipo estação total e nível digital para detectar movimentos verticais e horizontais a partir de pontos-objeto localizados na base da fundação e na torre, respectivamente.

2 TORRE EÓLICA ONSHORE

A torre eólica é composta por *nascelle*, as pás, o cubo do rotor e a torre. Na Figura 1 estão representados esses componentes. A Torre é a estrutura de apoio da turbina eólica instalada na altura apropriada ao seu funcionamento, a *nascelle* é a carcaça montada sobre a torre, onde se situam o gerador e todo o sistema de controle e as pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico ao centro do rotor, onde o cubo do rotor é responsável pela fixação das pás CEPEL/CRESESB (2008). A fundação estrutural é outro componente importante da torre eólica sendo responsável por sua fixação no terreno. Esse alicerce sustenta toda a estrutura da torre e necessita de soluções específicas para a sua construção.

Figura 1 – Partes integrantes da torre eólica: (a) *Nascelle*, (b) Cubo do rotor, (c) Pá eólica e (d) Torre.



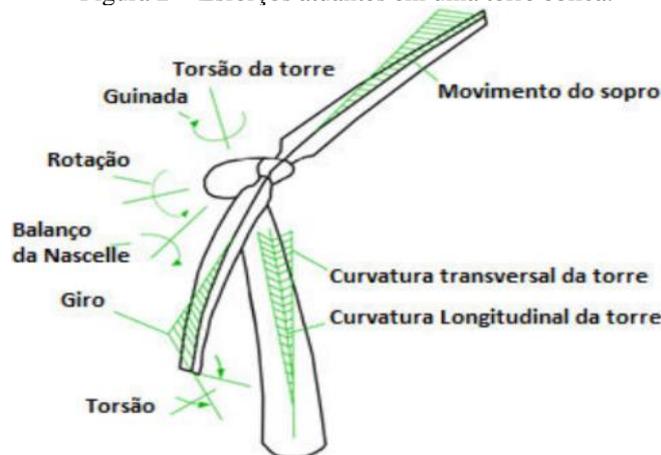
Fonte: (a) VESTAS (2018), (b), (c) e (d) Os autores (2020).

2.1 Estática nas Estruturas Eólicas

De acordo com Widderski e Kurałowicz (2009), inúmeros esforços, como forças horizontais, resistência do rotor, forças torcionais da própria torre à força do vento, dentre outros, geram vibrações e causam um

desequilíbrio funcional na torre eólica. A Figura 2 ilustra os graus de liberdade nas pás eólicas (flexão, giro e torção), na torre e na *nascelle* (curvatura, torção e deslocamento no plano horizontal). Para maiores especificações dos graus de liberdade ilustrados, consultar Hau (2000).

Figura 2 – Esforços atuantes em uma torre eólica.



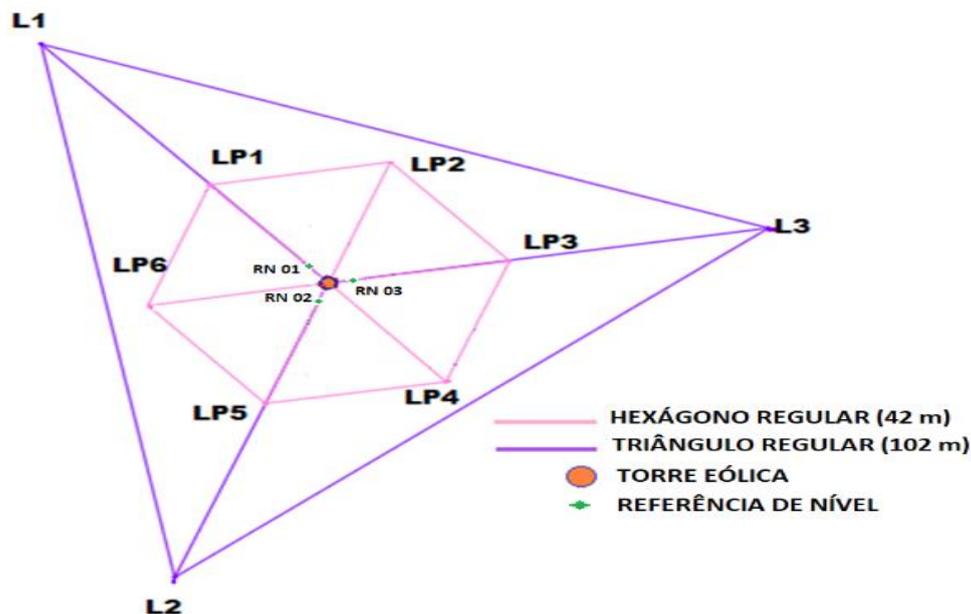
Fonte: Adaptada HAU (2000).

3 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA E DE MEDIÇÃO

Para monitorar uma estrutura eólica é necessário definir uma rede geodésica que atenda padrões de acurácia posicional adequados para detectar possíveis deslocamentos e deformações na estrutura da torre (objeto de estudo). A rede geodésica configurada adequadamente a estrutura a ser monitorada realiza assim um Sistema de Referência de Medição adequado (KAHMEN, 2006; NIEMEIER, 2002).

A fim de dispor visadas com o mínimo de três direções da torre, foram projetadas duas configurações para a distribuição dos pontos de referência (Figura 3). Na primeira, os pontos de referência para a medição com estação total estão dispostos em um triângulo equilátero (L1, L2 e L3) e na segunda os pontos de referência estão dispostos em um hexágono regular (LP1, LP2, LP3, LP4, LP5 e LP6). Ambas configurações (triângulo e hexágono) possuem o centro de simetria coincidente com o centroide da torre eólica. No item 4.4.2 é discutido o método de medição de bordas, utilizado para se determinar o centro da seção circular transversal da torre.

Figura 3 – Configuração geométrica para a distribuição dos pontos de referência no entorno da torre eólica.



Fonte: Os autores (2020).

A partir dos vértices do triângulo equilátero é possível observar em um mesmo alinhamento formado entre o vértice e o centro da torre pontos-objeto localizados verticalmente nas diferentes seções circulares da torre. Para a observação dos pontos-objeto sem a utilização de ocular de cotovelo, determinou-se a distância mínima (Figura 11) entre os vértices do triângulo e a torre através de cálculo trigonométrico, considerando a altura da torre e do máximo ângulo zenital possível de ser observado na estação total sem a utilização da ocular de cotovelo. Neste trabalho a dimensão projetada entre os vértices do triângulo e o centro da torre foi de 102 metros.

A segunda configuração, em forma de hexágono regular e mais próxima a torre, foi implantada para satisfazer os seguintes propósitos: garantir observações na base da torre e nos pontos-objeto mais próximos, uma vez que os vértices do triângulo estão posicionados em locais com desnível acentuado no entorno da torre; possibilitar intervisibilidade entre a torre e os pontos de referência perfilados do triângulo (L1, L2 e L3), onde os vértices do hexágono estão localizados no mesmo alinhamento dos vértices do triângulo equilátero a torre, dispondo acréscimo de viabilidade para o monitoramento da *nascelle* e demais componentes em diferentes épocas conforme a orientação do rotor em relação ao vento; possibilitar mais observações das seções transversais circulares no entorno da torre; e mostrar como os pontos altos poderiam ser determinados com a ocular de cotovelo. Para o hexágono, a dimensão projetada foi de 42m, considerando observações nas primeiras seções circulares da torre, e o dobro de pontos-objeto a serem observados no seu entorno.

Com respeito às Referências de Nível (RRNN), estas foram posicionadas na base da torre no mesmo alinhamento entre os vértices do triângulo, vértices do hexágono e a torre (Figura 3). Assim, as RRNN foram posicionadas em alinhamentos com 120° em relação ao centroide da torre.

Os estudos para as implantações das redes foram realizados posteriormente ao reconhecimento da área e ao estudo e elaboração do projeto geométrico. Os vértices dos triângulos foram implantados por meio do método polar, baseado nas informações obtidas no reconhecimento de campo, onde foram medidas direções horizontais e determinadas as distâncias planas a serem utilizadas nos cálculos remanescentes. Com estes valores foi possível indicar a posição dos pontos de interesse e realizar a materialização (cf. item 4.3).

4 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE REFERÊNCIA E DE MEDIÇÃO

Em conformidade com as justificativas e necessidades para o monitoramento de torre eólica, foi desenvolvido um fluxograma com os passos realizados nos procedimentos para a implantação dos pontos de referência, levando em consideração o levantamento planialtimétrico da área no entorno das torres (cf. itens 4.3.1 e 4.3.2), assim como a locação (cf. item 4.3) e o levantamento dos pontos de referência.

A Figura 4 ilustra o fluxograma da metodologia empregada, considerando-se: a análise geoespacial da área, a definição dos pontos de referência, utilizando-se métodos de posicionamento por satélites e métodos terrestres de medição com estação total e respectiva verificação instrumental com respeito aos limbos horizontal e vertical e erro de índice. Em seguida os pontos-objeto localizados nas bases e no corpo da torre das estruturas eólicas foram medidos, considerando-se também anteriormente a verificação instrumental da estação total e do nível digital, este último verificado com respeito ao erro de colimação. Após a aquisição de cada conjunto de dados foram realizados os respectivos processamentos, ajustamentos pelo MMQ e análises.

Figura 4 – Fluxograma operacional seriado desenvolvido.

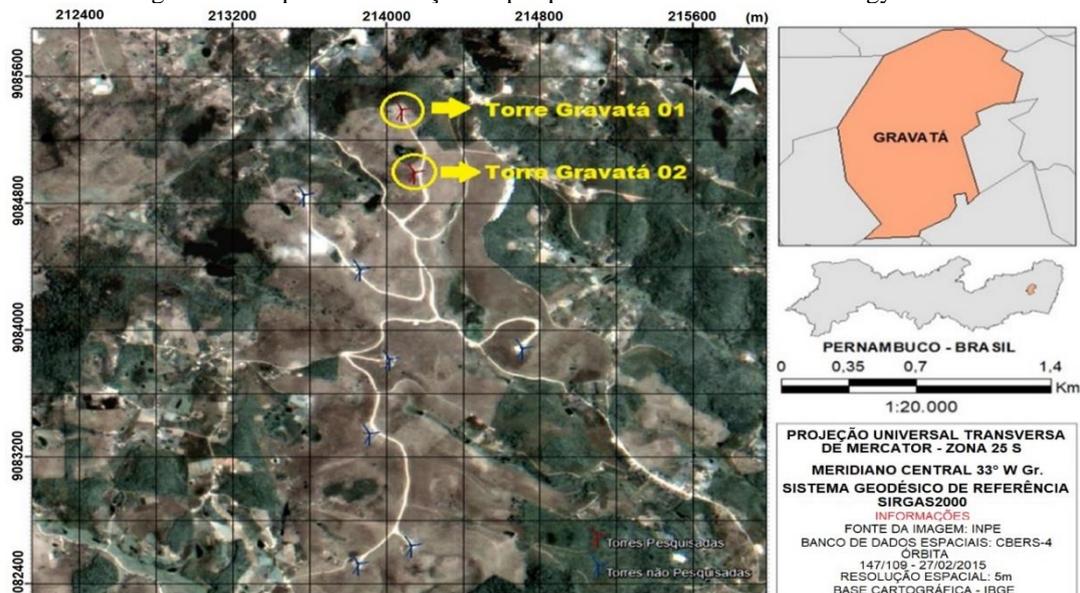


Fonte: Os autores (2020).

4.1 Área de Estudo e Torre Eólica Investigada

O empreendimento pertence a Eólica Technology Ltda. e está localizado no agreste do estado de Pernambuco nas altas altitudes do município de Gravatá, sendo responsável pelo primeiro parque eólico localizado no estado. O Parque Eólica Gravatá Geradora de Energia S.A. (Figura 5) é composto por nove aerogeradores da marca Vestas modelo V82. As torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02 investigadas estão representadas em cor vermelha.

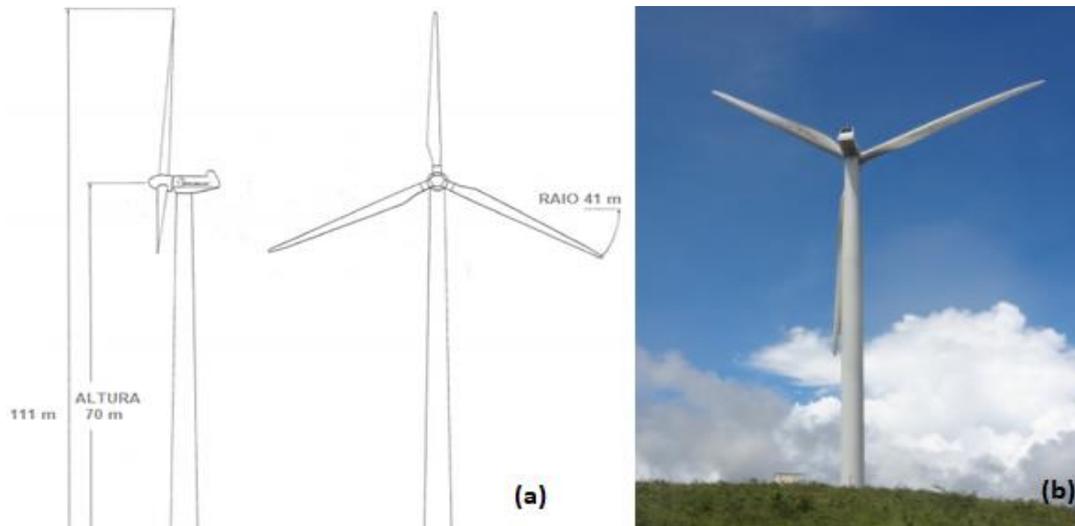
Figura 5 – Mapa de localização do parque eólico da Eólica Technology Ltda.



Fonte: CANTO (2018).

O objeto de pesquisa consiste em uma torre de aço tubular de forma cônica constituída por um número de seções pré-fabricadas. Segundo Vestas (2018), a torre da área de estudo possui 70 m de altura da base ao cubo do rotor, variando o diâmetro linear ao longo de seu comprimento, e pás com comprimento de 40 m. A Figura 6 ilustra as descrições da torre eólica.

Figura 6 – Torre eólica investigada: (a) Especificações dimensionais da torre eólica e (b) Torre eólica monitorada.



Fonte: (a) Modificada de Vestas (2018) e (b) Os autores (2020).

4.2 Recursos Tecnológicos

Os recursos tecnológicos utilizados no desenvolvimento do trabalho são: receptores GNSS: modelo Hiper V Topcon de dupla frequência (L1/L2), rádio com alcance de até 2 km, precisão horizontal nominal de $3\text{mm} + 0,5\text{ ppm}$ e vertical de $5\text{mm} + 0,5\text{ ppm}$ para levantamentos estáticos e rápido-estáticos e horizontal de $10\text{mm} + 1\text{ ppm}$ e vertical de $15\text{mm} + 1\text{ ppm}$ para levantamentos cinemáticos e RTK (TOPCON, 2012), Estação Total Topcon modelo GPT 3200 N/NW (precisão da medição de uma direção nas posições direta e inversa da luneta $\pm 5''$ e precisão linear $\pm (5\text{mm} + 5\text{ppm})$ classificada pela NBR 13133 (ABNT, 1994) como estação total de precisão média, Nível Digital Leica DNA – 03 (precisão $\pm 0,3\text{mm/km}$, 1km duplo nivelado) classificado pela ISO 17123-parte 2 (ISO, 2001) como nível de precisão altíssima e mira de invar, marca Leica, de 2m de comprimento e gravada com códigos de barras. Para o processamento foram utilizados os *softwares* QGIS 2.8.1, MAPGEO2015 (Versão 1.0), MATLAB (versão R2015a), Excel (versão 2013), AstGeoTop (GARNÉS, 2017), AutoCad 2010 e Topcon Tools (versão 8.2).

4.3 Materialização e Implantação dos Pontos de Referência

Para definição e implantação da configuração geométrica dos pontos de referência, foram empregados os seguintes métodos planialtimétricos: poligonação com centragem forçada, nivelamento trigonométrico e posicionamento por satélites GNSS por meio do método relativo estático (SILVA E SEGANTINE, 2015; MONICO, 2008).

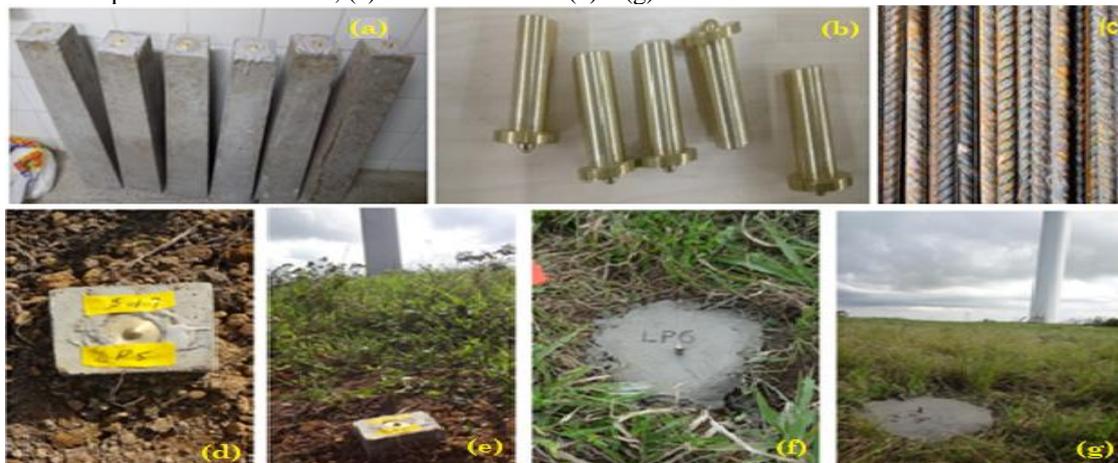
A materialização dos Pontos de Referência foi realizada da seguinte forma (Figura 7):

- a) Marcos de concreto: peças de concreto em forma de tronco de pirâmide, com 10 cm de aresta na face superior e 12 cm na inferior, altura de 60 cm, confeccionados com um traço 1x3x3 (cimento, areia e pedra) e pedra britada (Figura 7a). No centro do topo do marco foi fixado um pino com superfície semiesférica de 1 cm de diâmetro com 6 cm de comprimento (Figura 7b);
- b) Hastes de ferro com 0,50 m de comprimento (Figura 7c).

A materialização dos vértices pertencentes à geometria posicional do triângulo equilátero (L1, L2 e

L3) foi efetuada por meio de marcos de concreto. Os vértices do hexágono regular (LP1, LP3 e LP5) tiveram o mesmo alinhamento com os vértices do triângulo equilátero (Figura 3). Estes foram também materializados com marcos de concreto, enquanto os demais (LP2, LP4 e LP6) por meio de hastes de ferro (Figura 7).

Figura 7 – Formas de materialização e pontos de referência materializados: a) Marcos de concreto, (b) Pinos com superfície semiesférica, (c) Haste de ferro e (d) a (g) Pontos de referência materializados.



Fonte: Os autores (2020).

4.3.1 LEVANTAMENTO, PROCESSAMENTO DOS PONTOS DE REFERÊNCIA DETERMINADOS COM O POSICIONAMENTO GNSS RELATIVO ESTÁTICO E DEFINIÇÃO DO SISTEMA GEODÉSICO LOCAL (SGL)

As coordenadas referenciadas ao Sistema Geodésico de Referência SIRGAS2000 para o georreferenciamento dos pontos de referência foram obtidas por meio do levantamento GNSS aplicando-se o método de posicionamento estático (Figura 8). Para o georreferenciamento foram utilizados 02 receptores GNSS de dupla frequência (L1/L2) com precisões nominais descritas no item 3.2, configurados com máscara de elevação com 5°, taxa de gravação de 5 segundos e nível de confiança de 95%. Os receptores foram posicionados sobre os pontos de referência (L1, L2, L3 e LP3) com tripés, bases nivelantes e adaptadores base-receptor. As antenas foram horizontalizadas e orientadas aproximadamente para o Norte Geográfico a fim de diminuir o erro de fase da antena, segundo recomendação descrita em Monico (2008).

Figura 8 – Campanha do levantamento GNSS. Data (30/01/2018).



Fonte: Os autores (2020).

O tempo de rastreamento em cada vértice encontra-se na Tabela 1, seguindo as orientações do IBGE (2008) para definir de forma confiável o tempo de rastreamento das observações em função do comprimento da linha de base e do tipo de equipamento utilizado. A época da coleta dos dados utilizados foi 30 de janeiro de 2018, semana GPS 1986.

Tabela 1 – Tempo de rastreamento.

Vértice	Duração (horas)
L1	08:22:45
L2	04:01:30

Vértice	Duração (horas)
L3	01:59:35
LP3	01:34:30

Fonte: CANTO (2018).

A melhor precisão das coordenadas foi obtida com a utilização das estações de referência da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) RECF (Recife), PBCG (Campina Grande) e PBJP (João Pessoa). Os dados foram processados com efemérides precisas devido às linhas de base longas e necessidade de maior precisão, conforme IBGE (2017). As coordenadas geocêntricas, coordenadas geodésicas resultantes e respectivos desvios padrão provindos do processamento e ajustamento encontram-se, respectivamente, na Tabela 2.

Tabela 2 – Coordenadas Cartesianas Geocêntricas e respectivos desvios padrão dos vértices L1, L2, L3 e LP3 – Método de posicionamento GNSS relativo estático – SIRGAS2000.

Vértice	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)	Z (m)	σ_z (m)
L1	5.133.456,643	0,006	-3.674.473,946	0,007	-911.476,527	0,017
L2	5.133.509,684	0,006	-3.674.445,698	0,007	-911.310,516	0,017
L3	5.133.404,350	0,006	-3.674.582,229	0,007	-911.347,215	0,017
LP3	5.133.440,518	0,006	-3.674.537,942	0,007	-911.366,323	0,017

Fonte: CANTO (2018).

Para a transformação de coordenadas geodésicas em coordenadas no SGL (Tabela 3), por rotações e translações, na mesma escala (TORGE, 2001; GARNÉS, 1998 e GARNÉS, SIQUEIRA e CACHO, 2005), foi utilizado o vértice L1 como origem do SGL ($X_0 = 150.000,000$ m e $Y_0 = 250.000,000$ m), esta última respeitando a NBR 14166 (ABNT,1998).

Tabela 3 – Valores das coordenadas no SGL em SIRGAS2000.

Vértice	X (m)	Y (m)	h (m)
L1	150.000,000	250.000,000	775,428
L2	149.987,395	250.168,124	777,962
L3	149.881,512	250.130,916	777,120
LP3	149.938,576	250.112,529	783,463

Fonte: CANTO (2018).

Os pontos e vértices do triângulo foram determinados pelo método de posicionamento GNSS relativo estático, pois a torre eólica está localizada no topo de uma elevação e os pontos localizados a 102m do centro da torre não são intervisíveis entre si. Enquanto que os vértices do hexágono possibilitam intervisibilidade para os vértices do triângulo e para a realização de uma poligonal (Figura 3). Para a integração e compatibilização de observações GNSS e dos métodos terrestres de medição com estação total foi assim necessário definir um SGL para a área de estudo. Além disso, os pontos de referência vinculados ao SGB trarão benefícios para a área do parque eólico.

4.3.2 LEVANTAMENTO E DETERMINAÇÃO PLANIALTIMÉTICA DOS PONTOS DE REFERÊNCIA COM ESTAÇÃO TOTAL

O levantamento com estação total foi realizado pelo método da poligonização 3D com centragem forçada nos vértices do hexágono regular, pelo caminhamento. Para a realização da centragem forçada, considera-se a utilização de pelo menos três tripés instalados em vértices consecutivos da poligonal a ser implantada, três bases nivelantes, dois adaptadores base-prisma, dois prismas e uma estação total. Neste método considera-se a troca da alidade e do conjunto adaptador base-prisma para a realização das observações (KAHMEN, 2006). Ao passo que foi percorrido o trajeto definido pelos vértices formadores do hexágono regular, foram medidas as distâncias inclinadas e ângulos verticais entre os vértices e as direções horizontais entre os alinhamentos de ré e vante da poligonal. Os dados foram coletados em 2 séries de medições na posição direta e inversa da luneta.

Os dados da medição foram processados, ajustados pelo Método dos Mínimos Quadrados por meio do

software MATLAB e controlados no *software* AstGeoTop e Excel, e em seguida analisada a qualidade. A Tabela 3 apresenta as particularidades da poligonal, a qual de acordo com a NBR 13133 (ABNT, 1994) foi classificada como IP, em um perímetro de 251,907 m, apresentando um erro angular de 3,3", precisão relativa de 1/20.244, erro linear horizontal de 0,012 m ($\Sigma\Delta X=0,012$ m e $\Sigma\Delta Y=-0,002$ m) e erro altimétrico de -0,024m.

As Tabelas 4 e 5 apresentam as observações planimétricas ajustadas pelo MMQ através do modelo paramétrico. Os desvios padrão angulares, das coordenadas ajustadas e o controle de qualidade do ajustamento com 1σ , através do Teste Global Qui-Quadrado (χ^2), utilizando o teste bilateral e ao nível de significância de 5%, com grau de liberdade igual a 3 com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,22 < \chi^2 < 9,35$.

Tabela 4 – Coordenadas dos vértices da poligonal ajustada por MMQ – Modelo Paramétrico.

Estação	X (m)	σ_x (m)	Y (m)	σ_y (m)
LP1	149.987,407	0,012	0,013	0,013
LP2	149.947,428	0,010	0,013	0,013
LP3	149.938,576	0,010	0,011	0,011
LP4	149.969,727	0,011	0,012	0,012
LP5	150.009,645	0,012	0,013	0,013
LP6	150.018,505	0,012	0,014	0,014

Fonte: CANTO (2018).

Tabela 5 – Elementos da poligonal ajustados por MMQ – Modelo Paramétrico.

Estação	Ponto Visado	Ângulo Hz	Azimute	σ_{Angular}	Distância Plana (m)	$\sigma_{\text{Distância}}$ (m)
LP3	LP2	120°02'35,5"	167°49'02,3"	0,7"	41,945	0,007
LP3	L3	239°33'05,7"	107°48'04,0"	0,7"	59,948	0,007
LP2	LP1	119°58'39,0"	107°47'41,4"	0,7"	41,988	0,007
LP1	LP6	120°03'59,1"	47°51'40,5"	0,7"	41,939	0,007
LP6	LP5	119°57'59,0"	347°49'39,4"	0,7"	42,021	0,007
LP5	LP4	120°04'06,1"	287°53'45,5"	0,7"	41,948	0,007
LP5	L2	239°51'43,7"	227°41'23,1"	0,7"	59,761	0,007
LP4	LP3	119°52'41,3"	227°46'26,8"	0,7"	42,067	0,007

Fonte: CANTO (2018).

A qualidade posicional na ordem de um centímetro está condizente com o levantamento poligonal executado e utilização da estação total empregada com centragem a LASER. Para procedimentos de monitoramento de estruturas de grande porte do tipo barragens, por exemplo, são utilizados pilares materializados em estrutura em forma de pilar de concreto e instalação de equipamentos de medição nos dispositivos de centragens fixados no topo do pilar.

4.4 Procedimentos para o Monitoramento da Torre Eólica

A realização do monitoramento geodésico tem como objetivo identificar variações de coordenadas de uma amostra de pontos em um determinado período. Os resultados atingidos sinalizam se os pontos tiveram suas coordenadas modificadas, indicando provável deslocamento.

Para a verificação de movimentos verticais na base da torre e a verificação de movimentos horizontais ao longo da torre, foram propostos métodos geodésicos com emprego do nível digital e estação total (cf. item 4.4.1).

4.4.1 PROCEDIMENTOS PARA VERIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS VERTICAIS NA BASE DA TORRE

A proposta para o monitoramento de deslocamento vertical das bases das torres eólicas consiste na realização do nivelamento geométrico e contranivelamento de altíssima precisão ou do nivelamento geométrico com caminhamento duplo, ou seja, nivelar simultaneamente dois caminhamentos com auxílio de quatro sapatas, duas para leitura ré e duas para leitura vante.

4.4.1.1 Determinação Altimétrica das RRNN no Entorno das Torres - Medição Zero de Referência

As altitudes niveladas dos pontos implantados nas bases das torres eólicas Gravata 01 e 02 foram determinadas por nivelamento geométrico e contranivelamento realizados no entorno das torres e entre as torres (Figura 9). Para isso foi empregado o nível digital Leica DNA-03 e mira de invar (cf. item 4.2).

Figura 9 – Nivelamento geométrico realizado no entorno das torres Gravata 01 e 02 (20/04/2018): a) Medições na torre Gravata 02, (b) Caminhamento entre as duas torres e (c) Medições na torre Gravata 01.

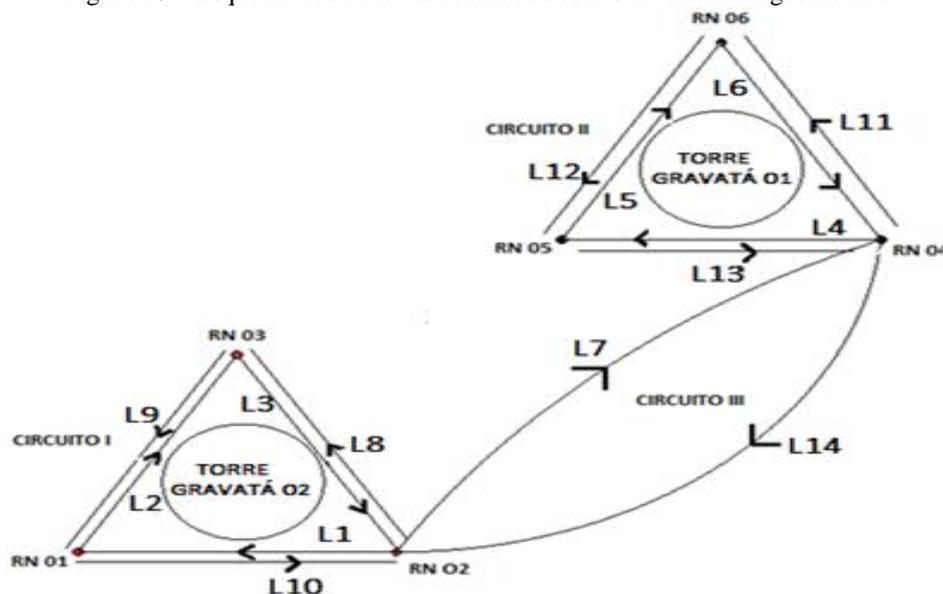


Fonte: Os autores (2020).

No monitoramento de estruturas são consideradas duas situações: na primeira é analisado o comportamento dos pontos-objeto entre si (monitoramento relativo) e na segunda é analisado o comportamento dos pontos-objeto em relação a uma referência estável (monitoramento absoluto) (PELZER, 1978). Neste trabalho o sistema de referência altimétrico das RRNN implantadas está fixado na RN02 localizada na torre eólica Gravata 02 (Figura 9a). Para esta RN foi fixada uma cota arbitrada de 1000,00000m, uma vez que a RN da RAAP mais próxima está localizada a 5,52 km de distância das torres e para o monitoramento de recalques nas bases das torres não se faz necessária esta vinculação ao Datum Vertical Brasileiro (DVB). Neste contexto, pode-se afirmar a partir das medições de nivelamento realizadas o comportamento relativo entre as RRNN observadas nas bases das torres. Para o estudo do comportamento absoluto, recomenda-se a interligação da rede altimétrica a afloramentos rochosos próximos as Torres. O que vem sendo realizado em pesquisa em andamento.

O nivelamento geométrico foi realizado no dia 20/04/2018. Este envolveu uma rede altimétrica composta por 6 (seis) RRNN, 3 (três) fixadas no entorno da torre eólica Gravata 02 (RN02, RN01 e RN03) e 3 (três) fixadas no entorno da torre eólica Gravata 01 (RN04, RN05 e RN06). O nivelamento geométrico dos pontos fixados nas bases das torres foi executado partindo do referencial altimétrico definido pela RN02, perfazendo no total 3 (três) circuitos nivelados e contranivelados, compostos por 14 (quatorze) linhas de nivelamento geométrico, 7 linhas niveladas e 7 linhas contraniveladas. Sendo o percurso do circuito I definido pelas linhas niveladas L1, L2 e L3 e pelas linhas contraniveladas L8, L9 e L10 entre os pinos com superfícies semiesféricas implantados na estrutura da base da torre eólica monitorada Gravata 02, o circuito II definido pelas linhas niveladas L4, L5 e L6 e pelas linhas contraniveladas L11, L12 e L13 entre os pinos implantados na estrutura da base da torre Gravata 01 e o circuito III definido pela linha nivelada L7, partindo da RN02 até a RN04, e pela linha contranivelada L14, partido da RN04 e voltando para a RN02. A Figura 10 ilustra os circuitos descritos.

Figura 10 – Esquema dos circuitos realizados com o nivelamento geométrico.



Fonte: Os autores (2020).

O nivelamento realizado com mira de ínvar de 2m percorreu os circuitos descritos utilizando o método de visadas iguais e pontos auxiliares com apoio de sapatas. O nível foi programado para leitura de série de 4 observações. O valor médio da série foi aceito, quando a amplitude entre as 4 observações obteve um valor menor ou igual a 0,06mm. Para cada visada a ré e a vante foram executadas pelo menos duas séries de observações. A Tabela 6 apresenta o erro de fechamento e o perímetro para cada circuito formado. Todos os erros de fechamento resultantes do nivelamento e contranivelamento no entorno e entre as torres alcançaram a tolerância admissível (cf. item 4.4.1.2) e precisão (Eq. 1) segundo Jordan (1944):

$$S = \sqrt{\frac{(E)^2}{2k}} \tag{1}$$

Sendo E, a diferença entre o somatório das leituras de ré e somatório das leituras de vante (erro de fechamento) em mm e k o perímetro em quilômetros.

Tabela 6 – Erros de fechamento, perímetros, tolerâncias dos circuitos e precisões dos nivelamentos realizados no entorno da torre Gravata 02, entre as RN02 e RN04 e no entorno da torre Gravata 01.

Circuito	Erro de Fechamento (m)	Perímetro (km)	Tolerância (km)	Precisão do Nivelamento (mm/km)	Datas de Leituras
I	-0,00009	0,030	±0,00052	±0,01043	20/04/2018
I	-0,00001	0,031	±0,00053	±0,00063	20/04/2018
II	-0,00003	0,031	±0,00053	±0,00311	20/04/2018
II	0,00003	0,029	±0,00051	±0,00302	20/04/2018
III	-0,00113	0,902	±0,00095	±0,75812	20/04/2018

Fonte: CANTO (2018).

4.4.1.2 Ajustamento das Observações e Análise da Qualidade

Segundo Torge (2001), a tolerância admissível no nivelamento geométrico de alta precisão deve ser melhor que $1\text{mm}\sqrt{K}$, sendo K, o perímetro do circuito durante a medição, em km, para levantamento de primeira ordem. Neste trabalho, adotou-se o valor de $0,3\text{mm}\sqrt{K}$, admitindo-se a quinta classificação de níveis da ISO 17123-parte 2 (ISO, 2001).

Para o ajustamento da rede de nivelamento utilizou-se como observações as diferenças de nível (ΔH) apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados das linhas, número de lances, desníveis brutos e distâncias do nivelamento e contranivelamento dos circuitos.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L1	RN02	RN01	1	0,01302	8,420
L2	RN01	RN03	1	-0,00252	8,490
L3	RN03	RN02	1	-0,01058	13,140
L8	RN02	RN03	1	0,01058	13,200
L9	RN03	RN01	1	0,00254	8,580
L10	RN01	RN02	1	-0,01311	9,560
L4	RN04	RN05	1	0,00267	9,380
L5	RN05	RN06	1	-0,00022	12,310
L6	RN06	RN04	1	-0,00247	9,340
L11	RN04	RN06	1	0,00249	9,230
L12	RN06	RN05	1	0,00030	11,430
L13	RN05	RN04	1	-0,00276	8,520
L7	RN02	RN04	15	12,66766	450,555
L14	RN04	RN02	17	-12,66943	451,255

Fonte: CANTO (2018).

As coordenadas altimétricas foram ajustadas utilizando-se o Método dos Mínimos Quadrados - modelo paramétrico, ao nível de 95% de confiança. Para maiores detalhes das equações de observação utilizadas no ajustamento, consultar Canto (2018). Foram realizados através do Teste Global Qui-Quadrado (χ^2), utilizando o teste bilateral e ao nível de significância de 5%, com grau de liberdade igual a 2 com hipóteses não rejeitadas no intervalo $0,051 < \chi^2 < 7,378$, onde o resultado do χ^2 obtido no ajustamento foi de 2,271.

Os desníveis dos circuitos foram ajustados através do MMQ-modelo paramétrico (GEMAEL, 1994) e os resultados referentes ao ajustamento das linhas, desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito I, circuito II e circuito III estão apresentados nas Tabelas 8 a 10.

Tabela 8 – Resultados do ajustamento por MMQ dos desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito I.

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN02	RN01	0,01304	$\pm 0,00003$
RN01	RN03	-0,00250	$\pm 0,00003$
RN03	RN02	-0,01054	$\pm 0,00003$
RN02	RN03	0,01058	$\pm 0,00000$
RN03	RN01	0,00253	$\pm 0,00001$
RN01	RN02	-0,01311	$\pm 0,00001$

Fonte: CANTO (2018).

Tabela 9 – Resultados do ajustamento por MMQ dos desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito II.

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN04	RN05	0,00268	$\pm 0,00003$
RN05	RN06	-0,00021	$\pm 0,00003$
RN06	RN04	-0,00247	$\pm 0,00003$
RN04	RN06	0,00248	$\pm 0,00001$
RN06	RN05	0,00029	$\pm 0,00001$
RN05	RN04	-0,00277	$\pm 0,00001$

Fonte: CANTO (2018).

Tabela 10 – Resultados do ajustamento por MMQ dos desníveis ajustados e desvios padrão do nivelamento e contranivelamento do circuito III.

Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Desvio padrão (m)
RN02	RN04	12,66766	$\pm 0,00024$
RN04	RN02	12,66943	$\pm 0,00007$

Fonte: CANTO (2018).

O maior desvio padrão apresentado entre os circuitos I, II e III foi na L7 com $\pm 0,00024$ m e o menor desvio padrão na L8 com $\pm 0,00000$ m. A Tabela 11 apresenta a cota média ajustada e seu respectivo desvio padrão.

Tabela 11 – Cotas médias ajustadas por MMQ e seus respectivos desvios padrão obtidos no nivelamento e contranivelamento – Medição zero.

Pinos	Cota Média (m)	Desvio Padrão (m)
RN01	1000,01306	±0,00004
RN03	1000,01055	±0,00004
RN04	1012,66810	±0,00031
RN05	1012,67080	±0,00032
RN06	1012,67057	±0,00032

Fonte: CANTO (2018).

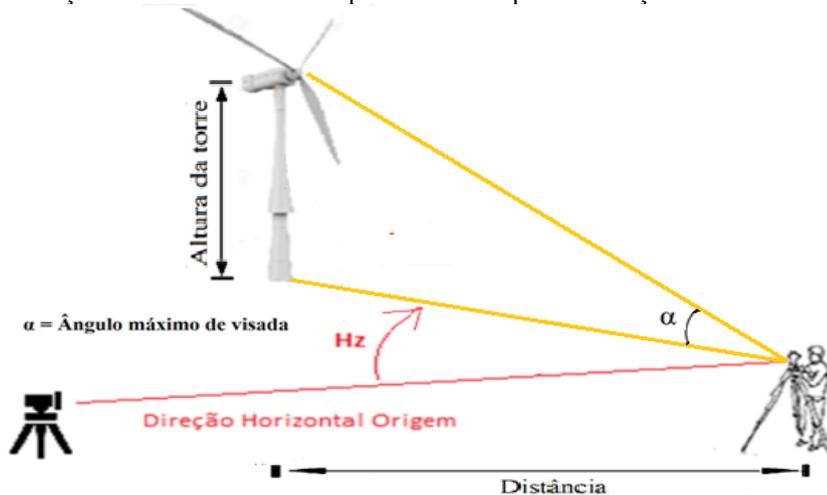
Os resultados apresentados na Tabela 9 mostram menores desvios padrão nos pinos da torre Gravatá 02, na casa do centésimo de milímetro, e máximos nos pinos da Torres Gravatá 01, com resultado em décimos de milímetros. As cotas médias ajustadas nesta campanha de medição foram definidas como padrão de referência para as futuras medições.

4.4.2 PROCEDIMENTOS PARA VERIFICAÇÃO DE MOVIMENTOS HORIZONTAIS DA TORRE

As medições dos pontos-objeto ao longo da torre foram realizadas com o emprego de estações totais instaladas nos pontos de referência, vértices do triângulo e do hexágono, conforme item 3.3. Em Canto e Seixas (2018) são propostos os métodos da irradiação tridimensional e medição de bordas para a determinação dos pontos-objeto.

Os procedimentos das medições indiretas de cada ponto-objeto com o uso do método da irradiação tridimensional são realizados com a abertura do ângulo horizontal até o alinhamento referência de medição, fixação do movimento horizontal e movimento vertical da luneta até o ponto-objeto e por meio dos parafusos micrométricos, faz-se um ajuste fino. A Figura 11 ilustra os procedimentos.

Figura 11 – Determinação da distância mínima e procedimentos para a medição das soldas transversais.



Fonte: Os autores (2020).

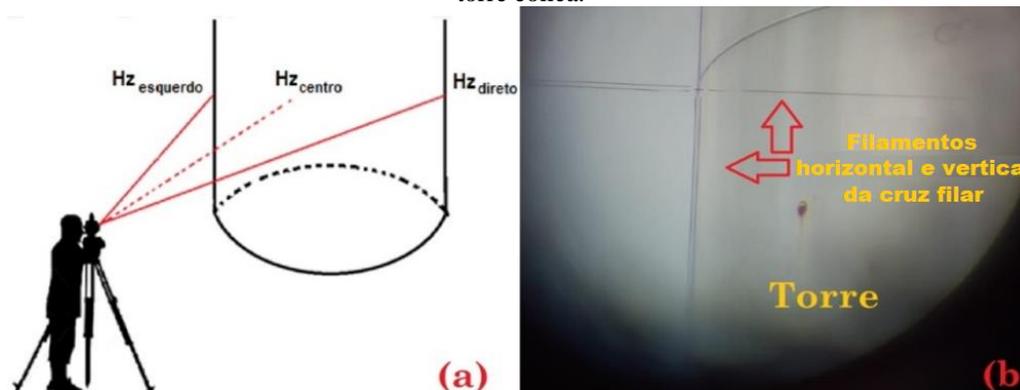
O método de medição de bordas consiste na determinação da direção horizontal do eixo de uma seção circular transversal da torre. O valor médio das observações de direções horizontais ($H_{z\text{esquerdo}}$ e $H_{z\text{direito}}$) realizadas nas bordas da torre com a estação total (Figura 12a) representa a direção horizontal do eixo da torre ($H_{z\text{médio}}$) em uma seção circular transversal da mesma (Eq. 2).

$$H_{z\text{médio}} = \frac{H_{z\text{esquerdo}} + H_{z\text{direito}}}{2} \tag{2}$$

Os procedimentos para as medições da torre com o método da medição de bordas são feitos através da definição da direção origem de leitura dos ângulos horizontais, abertura do ângulo horizontal até a borda esquerda definida como ponto-objeto, tornando coincidentes os filamentos horizontal e vertical da cruz filar da luneta da estação total com o ponto-objeto identificado na seção circular transversal na borda da torre

(Figura 12b). Após isso, efetua-se a medição de direção horizontal. Finalizada esta etapa, realizam-se os mesmos procedimentos na borda direita.

Figura 12 – Auscultação geodésica: (a) Método de medição de bordas e (b) Procedimento para a medição de bordas da torre eólica.



Fonte: Os autores (2020).

Para a determinação do raio do centro virtual de cada seção circular transversal é proposta neste trabalho a utilização do ajustamento pelo MMQ - modelo combinado. Para determinar as coordenadas do centro de cada seção circular transversal é proposta neste trabalho a utilização do MMQ - modelo paramétrico.

No ajustamento pelo MMQ - modelo combinado, o modelo matemático utilizado para o cálculo do raio é expresso pela equação da circunferência (Eq. 3), que envolve as coordenadas medidas em cada seção circular transversal entre os pontos de referência e a torre, as coordenadas do centro e o raio da circunferência. O ajustamento da circunferência da seção circular transversal requer técnicas de otimização por meio de processos numéricos iterativos para conseguir a solução, em virtude de ser um modelo não-linear. Para maiores detalhes sobre o ajustamento de observações utilizando o Método dos Mínimos Quadrados por meio do modelo combinado, consultar Gemael, Machado e Wandresen (2015).

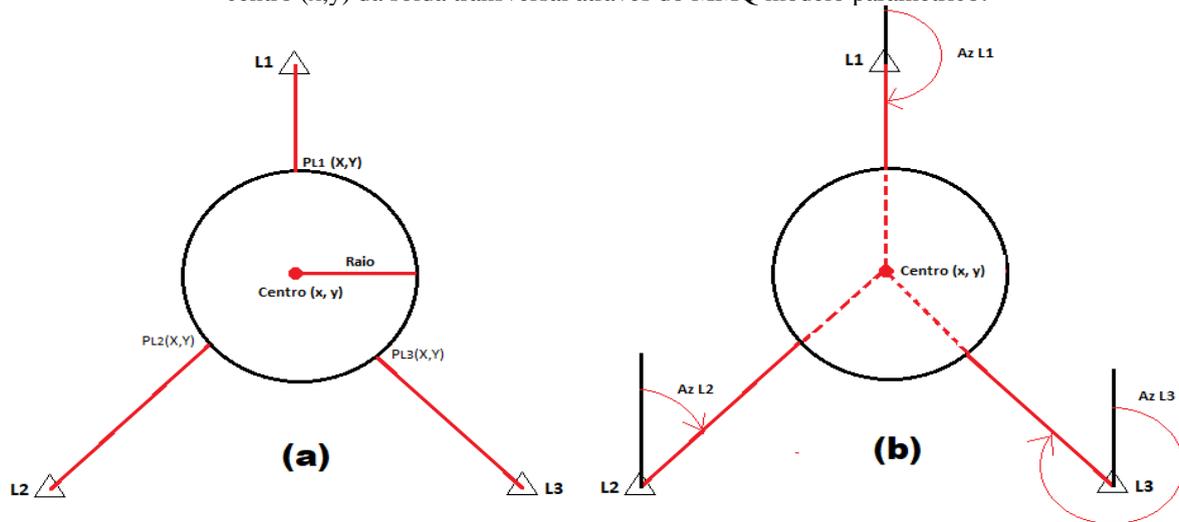
$$(x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2 - R^2 = 0 \quad (3)$$

Onde x_1, y_1 = coordenadas medidas; x_c, y_c = coordenadas do centro e R = raio da solda transversal.

A Figura 13a exemplifica o método. As coordenadas do centro (x, y) e raio da seção circular são determinadas a partir das medições das coordenadas (x, y) do círculo sobre os alinhamentos dos pontos de referência. Neste modelo se tem três incógnitas e o mínimo de quatro equações, o que permite proceder ao ajustamento. Para verificar maiores detalhes, consultar Canto e Seixas (2018).

As coordenadas (x, y) do centro das seções circulares podem ser determinadas por meio do ajustamento MMQ - modelo paramétrico e baseado no método da interseção à vante, que segundo Kahmen e Faig (1988) e Kahmen (2006), consiste em determinar as coordenadas de um determinado ponto de um objeto sobre duas ou mais estações de coordenadas conhecidas. Consultar Gemael, Machado e Wandresen (2015) para informações referentes ao ajustamento de observações MMQ - modelo paramétrico e o ajustamento utilizado é baseado em um caso que está descrito em Kahmen e Faig (1988, p. 229). Para verificar uma exemplificação da metodologia, consultar Canto (2018). A Figura 13b ilustra a metodologia de aquisição de dados e aplicação do método da interseção à vante. Neste caso, x, y = coordenadas do centro circular da solda transversal e Az_{L1C}, Az_{L2C} e Az_{L3C} = azimutes.

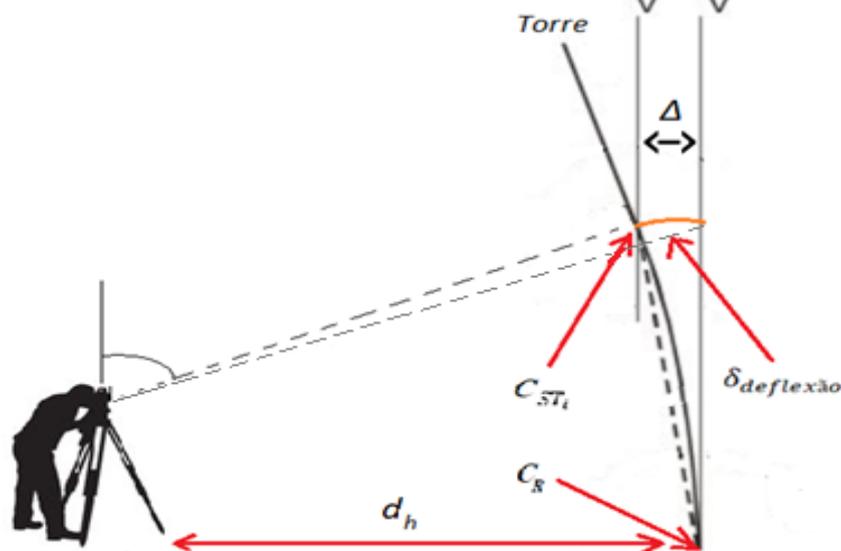
Figura 13 – Ajustamento pelo MMQ: (a) Exemplo da determinação das coordenadas do centro (x, y) e raio da seção circular da solda transversal através do MMQ modelo combinado e (b) Exemplo da determinação das coordenadas do centro (x,y) da solda transversal através do MMQ modelo paramétrico.



Fonte: Os autores (2020).

Para a análise da verticalidade da torre é proposto neste trabalho o cálculo do ângulo de deflexão, definido como o ângulo plano formado entre a projeção de um alinhamento origem e de um determinado alinhamento apontado, ou seja, ângulo medido entre o deslocamento de qualquer ponto e o alinhamento vertical de referência. Considera-se que uma torre ideal (não sujeita a esforços) com seções circulares, as posições planimétricas dos centros de cada solda transversal encontram-se na mesma posição planimétrica. Se este não for o caso, é necessário aplicar um ajuste geométrico para considerar o plano em que se encontram as seções transversais, em função de suas curvaturas. A Figura 14 ilustra o exemplo do procedimento de medição do ângulo de deflexão em uma torre eólica.

Figura 14 – Exemplo de ângulo de deflexão em uma torre eólica.



Fonte: Os autores (2020).

Em que $\delta_{deflexão}$ = ângulo de deflexão; V = alinhamento vertical de referência; d_h = distância horizontal; Δ = diferença linear entre os respectivos centros geométricos; C_R = origem ajustada do alinhamento vertical de referência e C_{STi} = centro geométrico ajustado de uma solda transversal i.

A Eq. (4) foi aplicada para determinar deflexões dos centros específicos de cada solda transversal ao longo do ponto definido como a origem do alinhamento de referência.

$$\delta_{\text{deflexão}} = \text{tg}^{-1} \frac{\Delta}{dh} \quad (4)$$

Neste trabalho é definido como alinhamento de referência o centro geométrico da seção circular da solda transversal inferior.

5 CONCLUSÕES

A proposta deste trabalho foi de apresentar uma metodologia para a definição de um Sistema de Referência de Medição (SRM) estável para detectar movimentos verticais e horizontais a partir de pontos-objeto localizados na base da fundação e na torre, respectivamente, empregando-se técnicas geodésicas/topográficas, difundindo assim, a importância e a necessidade do monitoramento apropriado em torres eólicas *onshore*. Para tal fim, foi apresentada uma metodologia para a definição das configurações geométricas e materialização dos pontos de referência no entorno da torre eólica *onshore* (cf. item 4), para o estabelecimento do Sistema de Referência de Medição, com a interligação ao Sistema Geodésico Brasileiro por meio do levantamento GNSS (cf. item 4.3.1) e para a definição dos procedimentos de medição para o monitoramento da base da fundação e da torre (cf. item 4.4).

As configurações geométricas definidas para os pontos de referência tiveram a finalidade de observar em um mesmo alinhamento, todos os pontos-objeto nas diferentes alturas da torre sem o emprego de ocular de cotovelo, a partir da configuração dos pontos de referência do triângulo “equilátero” e garantir observações na base e nos pontos-objeto mais próximos e ter uma abrangência posicional para o monitoramento da torre eólica com o auxílio de ocular de cotovelo, a partir da configuração dos pontos de referência do hexágono regular.

As propostas para a medição dos pontos-objeto, primeiramente para a avaliação de movimentos verticais na fundação, se basearam em medições na sua base, empregando o nivelamento geométrico de altíssima precisão (cf. item 4.4.1), definindo-se neste trabalho a medição zero como padrão de referência altimétrica (cf. item 4.4.1.2). Para a avaliação dos movimentos horizontais da torre foram utilizados métodos de medição das bordas e irradiação tridimensional (cf. item 4.4.2). Neste trabalho estão propostos procedimentos de medição e modelos de ajustamento pelo MMQ para a determinação do centro virtual das seções circulares ao longo da torre (cf. item 4.4.2). Por intermédio dos métodos citados pode ser realizada a análise geral da verticalidade da torre a partir do ângulo de deflexão do alinhamento vertical de referência e determinação do alinhamento da deflexão da torre.

Por meio da metodologia apresentada para o Sistema de Referência de Medição estável, são assegurados o controle posicional e acompanhamento temporal da verticalidade da torre e comportamento da base, por meio dos métodos geodésicos e instrumentos de precisão adequados.

Agradecimentos

Os autores são gratos a Eólica Tecnologia pela autorização da pesquisa nas torres do parque eólico em Gravatá-PE e por oferecer suporte e apoio técnico. A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), através do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PPGCGTG), por disponibilizar o Laboratório de Geodésia (LAGEO) e Laboratório de Topografia (LATOP), assim como a concessão dos equipamentos e acessórios. Para o professor Dr. Sílvio Jacks dos Anjos Garnés por proporcionar o uso do *software* AstGeoTop e aos alunos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PPGCGTG), Leonardo Carlos Barbosa, Priscilla Heliênay Oliveira do Nascimento Pestana e Welisson José dos Santos, e o aluno em Engenharia Eletrônica da Universidade de Pernambuco, Italo Garcia Campos do Canto, que contribuíram com os levantamentos geodésicos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pelo apoio financeiro. Ao Projeto de Pesquisa Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis - LITPEG/CTG/UFPE processos nº 3076.040512/2015-15 e nº 23076.016133/2018-57.

Contribuição dos Autores

Os autores elaboraram a metodologia e participaram de todos os experimentos e coleta de dados, sendo o primeiro autor responsável pelo processamento e ajustamento dos dados, assim como a redação textual. O segundo autor foi responsável pela coordenação do processamento e análise dos dados, revisão e redação textual.

Conflitos de Interesse

Os autores expressam que não há conflitos de interesse.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13133**: Normas Técnicas para a Execução de Levantamento Topográfico. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14166**: Rede de Referência Cadastral Municipal – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.
- CANTO, L. F. C. **Metodologia para o Monitoramento Geodésico em Torres Eólicas Onshore**. 250 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- CANTO, L. F. C.; SEIXAS, A. Geodésia Aplicada para o Estudo de Verticalidade em Torres Eólicas Onshore. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO (SIMGEO), 7., 2018, Recife. **Anais...** Recife: Editora UFPE, 2018. p. 619-628.
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA (CEPEL); CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO (CRESESB). **Tipos de aerogeradores para geração de energia elétrica**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231>. Acesso em: 18 jul. 2018.
- DRAGOMIR, P. I.; NEGRILĂ, A.F.C.; SĂRĂCIN, A. Geodesic techniques used to monitoring the wind turbines towers. **RevCAD - Journal of Geodesy and Cadastre**, Alba Iulia, v. 16, n. 405, p. 56-63, Oct. 2014. DOI. n/d
- GARNÉS, S. J. A. Sistema de Projeção e Orientação das Plantas Topográficas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO (COBRAC), 3., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1998. p. 1-17.
- GARNÉS, S. J. A.; SIQUEIRA, V. P.; CACHO, J. P. Definição para implantação do sistema topográfico local de Campo Grande-MS e análise das fórmulas da NBR-14.166. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS (CBCG), 4., 2005, Curitiba. **Anais...** Curitiba: CPGCG, 2005. p. 14-28.
- GARNÉS, S. J. A. Programa AstGeoTop. **Software de cálculo**. Universidade Federal de Pernambuco - Recife, Brasil. Versão 2017.
- GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações geodésicas**. 1ª edição, Curitiba: Editora UFPR, 1994.
- GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 2ª edição. Curitiba. Editora UFPR, 2015.
- HAU, E. **Wind turbines fundamentals, technologies, application, economics**. 2ª edição. Heidelberg: Springer, 2000.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Recomendações para**

Levantamentos Relativos Estáticos – GPS. Rio de Janeiro, 2008.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro.** Rio de Janeiro, 2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. (ISO). **ISO 17123-1 Part 2: Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instrument: Levels.** Suíça, 2001
- JORDAN, W. **Tratado general de topografia.** 1ª edição. Barcelona: Editora Gustavo Gili, 1944.
- KAHMEN, H. **Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde.** 20ª edição. Einbeck: Editora De Gruyter, 2006.
- KAHMEN, H.; FAIG, W. **Surveying.** Berlin, New York: Editora De Gruyter, 1988.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações.** 2ª edição. São Paulo: Editora Unesp, 2008.
- NIEMEIER, W. **Ausgleichsrechnung: Eine Einführung für Studierende und Praktiker des Vermessungs - und Geoinformationswesens.** Berlin, New York: Editora De Gruyter, 2002.
- PARQUE EÓLICO CAITHNESS. **Boletim anual de geração de eólica: Summary of Wind Turbine Accident.** Disponível em: <<http://www.caithnesswindfarms.co.uk/AccidentStatistics.htm>>. Acesso em: 01 out. 2018.
- PELZER, H. Geodätische Überwachung dynamischer Systeme. IN: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DEFORMATION MEASUREMENTS, 2., 1978, Bonn. **Anais...** Bonn: Editora Konrad Wittwer, 1978. p. 296-311.
- SILVA, I.; SEGANTINE, P.C.L. **Topografia para Engenharia: Teoria e Prática de Geomática.** 1ª edição. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2015.
- TOPCON. **HiPer V: Dual-Frequency GNSS Receiver.** Disponível em: <https://www.topcon.co.jp/en/positioning/products/pdf/HiPerV_E.pdf>. Acesso em: 15 out. 2018.
- TORGE, W. **Geodaesie.** 3ª edição. Lehrbuch: Ed. Gruyter, 2001.
- VESTAS. **V82-1.65 MW: Creating more from less.** Disponível em: <<https://www.edprnorthamerica.com/wp-content/uploads/2014/04/V82.pdf>>, Acesso em: 20 jan. 2018.
- WIDERSKI, T.; KURAŁOWICZ, Z. Geodesic Monitoring of Tower and Mast Structures. **Reports on Geodesy**, Varsóvia, v. 87, n. 1, p. 411–417, 2009. DOI. 10.1515/rgg-2016-0002.

Biografia do autor principal

Luiz Filipe Campos do Canto nasceu em Recife, capital do estado de Pernambuco. É bacharel em Engenharia Cartográfica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação pela UFPE. Realiza pesquisas sobre Geodésia, Geofísica, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.