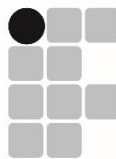


**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA**
Departamento Acadêmico da Construção Civil
Curso Técnico em Agrimensura

MÉTODOS DE LEVANTAMENTO POR SATÉLITES

SÉRIE: TOPOGRAFIA E AGRIMENSURA PARA
CURSOS TÉCNICOS

Prof. Ivandro Klein
Prof. Matheus Pereira Guzatto



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Florianópolis-SC
2018

Curso Técnico em Agrimensura:

Av. Mauro Ramos, 950, Centro, Florianópolis - Santa Catarina

CEP: 88020-300

Telefone: (48) 3321-6061

<http://agrimensura.florianopolis.ifsc.edu.br>

Reitoria:

Rua 14 de Julho, 150, Coqueiros, Florianópolis - Santa Catarina

CEP: 88075-010

Telefone: (48) 3877-9000 / Fax: (48) 3877-9060

www.ifsc.edu.br

Reprodução total ou parcial dessa obra autorizada pelos autores e pela
instituição para fins educativos e não comerciais.

Catálogo na fonte pelo Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC
Reitoria

K641m

Klein, Ivandro

Métodos de levantamento por satélites: topografia e agrimensura para
cursos técnicos [recurso eletrônico] / Ivandro Klein, Matheus Pereira Guzzatto
– Florianópolis: IFSC, 2018.

1 Livro digital.

61 p.: il.

Inclui referências.

ISBN 97885XXXXXXX

1. Levantamento geodésico. 2. Sistemas GNSS. I. Guzzatto, Matheus
Pereira. II. Título.

CDD 526.98

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Câmpus Florianópolis
Catalogado por: Edinei Antonio Moreno CRB 14/1065

SUMÁRIO

1. TIPOS DE POSICIONAMENTO GNSS E O POSICIONAMENTO POR PONTO SIMPLES (SPP).....	4
1.1. Tipos de posicionamento GNSS	4
1.2. Posicionamento por ponto simples (SPP)	6
1.3. Exemplo de posicionamento por ponto simples (SPP)	9
2. GNSS DIFERENCIAL (DGNSS)	13
2.1. Correções DGNSS nas observáveis e nas coordenadas	15
2.2. WADGNSS ou DGNSS em rede	17
2.3. Posicionamento cinemático em tempo real (RTK)	20
2.4. Posicionamento RTK em rede	22
3. POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO (PPP).....	26
3.1. Serviços de PPP on-line	29
3.2. Serviços IBGE-PPP e RT_PPP Online	31
3.3. PPP em tempo real (RT-PPP)	34
4. POSICIONAMENTO RELATIVO (PR)	37
4.1. PR estático	38
4.2. PR estático-rápido	46
4.3. PR semi-cinemático (<i>stop and go</i>)	47
4.4. PR cinemático	48
4.5. Serviços gratuitos de posicionamento relativo <i>on-line</i>	50
5. SOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES.....	52
5.1. Técnicas de solução das ambiguidades	55
5.2. Validação do vetor das ambiguidades	58
5.3. Exemplo de solução e validação das ambiguidades pelo método LAMBDA	59

1. TIPOS DE POSICIONAMENTO GNSS E O POSICIONAMENTO POR PONTO SIMPLES (SPP)

Posicionamento diz respeito à determinação da posição de objetos em relação a um referencial, usualmente expresso em um sistema de coordenadas. O posicionamento GNSS é realizado em um referencial terrestre, e, portanto, é dito “georreferenciado”, pois permite a localização do objeto (receptor GNSS) na superfície terrestre em âmbito global (Figura 4.1).

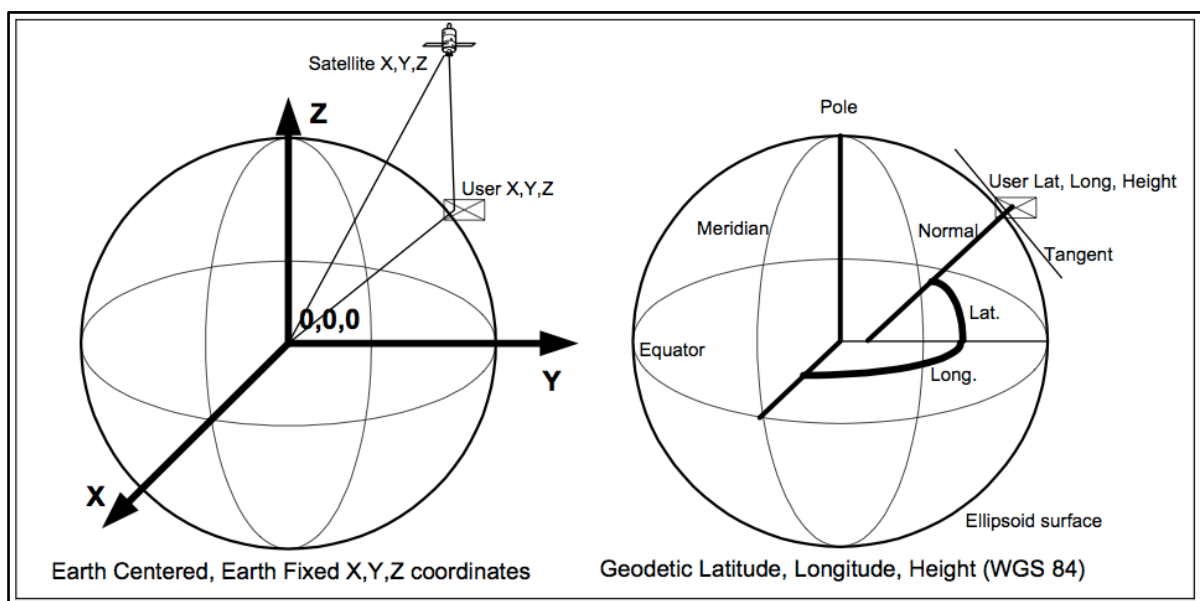


Figura 1.1 – Sistemas de coordenadas envolvidos no posicionamento por GNSS.

1.1. Tipos de posicionamento GNSS

No caso dos sistemas GNSS, o posicionamento pode ser classificado em posicionamento absoluto (ou por ponto), quando as coordenadas de um único receptor estão associadas diretamente ao geocentro (centro de massa da Terra), ao redor do qual os satélites GNSS orbitam; posicionamento relativo, quando é determinada a posição (distância) relativa entre dois receptores em um dado referencial; ou ainda DGNSS (*Differential GNSS* – GNSS diferencial), quando são adicionadas correções ao posicionamento absoluto de um receptor, determinadas em função de um receptor com coordenadas conhecidas.

O objeto a ser posicionado pode estar em repouso ou em movimento, o que gera um complemento à classificação com respeito ao referencial adotado. No primeiro caso, trata-se do posicionamento estático, enquanto o segundo diz respeito ao posicionamento cinemático. No posicionamento estático, diferentes épocas de rastreamento

são combinadas em uma única solução, uma vez que o receptor permanece em repouso, enquanto no posicionamento cinemático, cada época de rastreamento resulta em uma nova solução, uma vez que o receptor está em movimento.

No posicionamento por ponto ou absoluto (ou ainda autônomo), quando se utilizam as efemérides transmitidas, a posição do ponto é determinada no referencial vinculado ao sistema de coordenadas dos satélites, que no caso do GPS, por exemplo, é o WGS-84 G1762, no caso do GLONASS, é o PZ-90.11, no caso do *Galileo*, é o GTRF14v01 e etc. Quando são utilizadas as efemérides precisas, tem-se o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Nesse caso, o referencial do ponto será o ITRF vigente (atualmente ITRF2014).

No posicionamento relativo, a posição de um ponto é determinada com relação à de outro, cujas coordenadas são conhecidas. As coordenadas do ponto conhecido (estação base) devem ser relativas ao referencial adotado, por exemplo, WGS-84 G1762, ou em um sistema compatível a esse, como por exemplo, SIRGAS2000, ITRF2008, ITRF2014 e etc. Nesse caso, os elementos que compõem a linha-base (distância relativa entre os dois receptores), são estimados no posicionamento, e, ao serem acrescentados às coordenadas conhecidas da estação base, proporcionam as coordenadas da estação desejada (denominada receptor móvel ou *rover*).

No DGNSS, um receptor GNSS é posicionado em uma estação de referência. Diferenças são calculadas na estação de referência, seja entre as coordenadas estimadas (empregando o posicionamento por ponto simples) e as coordenadas conhecidas da estação de referência, seja entre as pseudodistâncias observadas e as determinadas a partir das posições dos satélites e da posição conhecida da estação de referência, isto é, a distância geométrica “verdadeira”. No primeiro caso, as discrepâncias em coordenadas são transmitidas para o receptor móvel; este realiza o posicionamento por ponto simples e aplica as correções transmitidas às suas coordenadas. No segundo caso, as correções das pseudodistâncias são transmitidas ao receptor móvel, o qual realiza as correções das pseudodistâncias relativas aos mesmos satélites, e, posteriormente, realiza o posicionamento por ponto simples.

O método DGNSS foi desenvolvido para que fossem reduzidos os efeitos advindos da técnica SA. Embora também utilize dois receptores, o conceito do DGNSS é diferente do posicionamento relativo: no DGNSS, aplicam-se correções estimadas na estação base nas coordenadas ou pseudodistâncias do receptor móvel, que realiza posteriormente o posicionamento por ponto simples; no método relativo, se determina

um vetor (linha-base) entre as duas estações e são realizadas subtrações entre as observáveis originais (pseudodistâncias e/ou fases das ondas portadoras), conforme será visto posteriormente.

Independente do método, o posicionamento pode ser em tempo real (obtenção instantânea da posição) ou pós-processado (obtenção da posição por meio de *softwares* de pós-processamento). Dessa forma, temos, por exemplo, posicionamento por ponto simples cinemático em tempo real, posicionamento por ponto preciso estático pós-processado, posicionamento relativo estático pós-processado, posicionamento relativo cinemático em tempo real, DGNSS cinemático em tempo real e etc. No caso do posicionamento relativo e do DGNSS, quando se utilizam duas ou mais estações de referência, tem-se ainda o posicionamento (relativo ou diferencial) em rede. O posicionamento por ponto simples será abordado neste capítulo enquanto os demais métodos de posicionamento serão abordados em capítulos posteriores.

1.2. Posicionamento por ponto simples (SPP)

No posicionamento por ponto simples (SPP – *Single Point Positioning*), necessita-se de apenas um receptor GNSS. É normalmente empregado em navegação de baixa precisão e levantamentos expeditos, com receptores de navegação. A observável utilizada é a pseudodistância advinda do código (em geral, do código C/A no caso do GPS), e sua principal finalidade é o posicionamento cinemático em tempo real (de precisão métrica).

Quando a técnica SA estava ativa (até Maio de 2000), a acurácia planimétrica era de aproximadamente 100 m, com 95% de probabilidade. Com a desativação, melhorou quase 10 vezes, ficando em torno de 13 m, com 95% de probabilidade. É importante ressaltar que o SPP é o método de posicionamento utilizado nos *smartphones*, GPS de automóveis e receptores GNSS de baixo custo em geral. No caso do GPS, as etapas envolvidas no SPP são:

- 1) Calcular o instante de recepção do sinal, em função dos segundos da semana desde o início da semana GPS que ele pertence até o dia que foram gerados os dados de observação, em horas (H), minutos (M) e segundos (S);

- 2) Para cada satélite, calcular o instante de transmissão do sinal GPS em função do instante de recepção do mesmo;
- 3) Calcular o erro do relógio dos satélites com boa aproximação, com base nos coeficientes dos polinômios de grau 2 contidos nas efemérides transmitidas;
- 4) Calcular as coordenadas cartesianas geocêntricas (X,Y,Z) dos satélites para cada instante de transmissão do sinal, por meio dos elementos keplerianos e perturbadores da órbita contidos nas efemérides transmitidas;
- 5) Corrigir as coordenadas cartesianas geocêntricas (X,Y,Z) dos satélites do movimento de rotação da Terra, pois, durante a propagação do sinal, o sistema de coordenadas terrestre (no caso, WGS-84 G1762) rotaciona em relação ao satélite, alterando assim as suas coordenadas (X,Y,Z);
- 6) Calculadas e corrigidas as coordenadas dos satélites para os instantes de transmissão dos sinais, realiza-se o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) para determinar as coordenadas cartesianas geocêntricas (X,Y,Z) e o erro do relógio do receptor (dt_r).

No caso, para cada satélite, forma-se uma equação de pseudodistância (PD_r^s):

$$PD_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2} + c(dt_r - dt^s) + \varepsilon_{PD}$$

onde X^s , Y^s , Z^s são as coordenadas do satélite, obtidas em função das efemérides transmitidas, X_r , Y_r , Z_r são as coordenadas do receptor, isto é, os valores desconhecidos a se determinar, c é a velocidade da luz no vácuo (constante), dt^s é o erro do relógio do satélite, obtido em função das efemérides transmitidas, dt_r é o erro do relógio do receptor, isto é, outro valor desconhecido a se determinar, e ε_{PD} são os demais erros envolvidos, negligenciados no SPP. Para um mesmo instante, tendo quatro pseudodistâncias, ou seja, rastreando quatro satélites visíveis (Figura 4.2), é possível obter uma solução única e exata para as quatro incógnitas do posicionamento (X_r , Y_r , Z_r

e dt_r). Rastreamento cinco ou mais satélites visíveis, para cada instante, é possível fazer um ajustamento pelo MMQ para determinar as quatro incógnitas do posicionamento.

No caso do posicionamento estático, pode-se aumentar a precisão combinando diferentes épocas de rastreio em uma única solução, pois o receptor permanece estático sobre o mesmo ponto. Além disso, embora a posição seja obtida em coordenadas cartesianas geocêntricas, em geral, a mesma é fornecida em um sistema de coordenadas de maior conveniência ao usuário, como coordenadas geodésicas ou de alguma projeção cartográfica (por exemplo, sistema UTM).

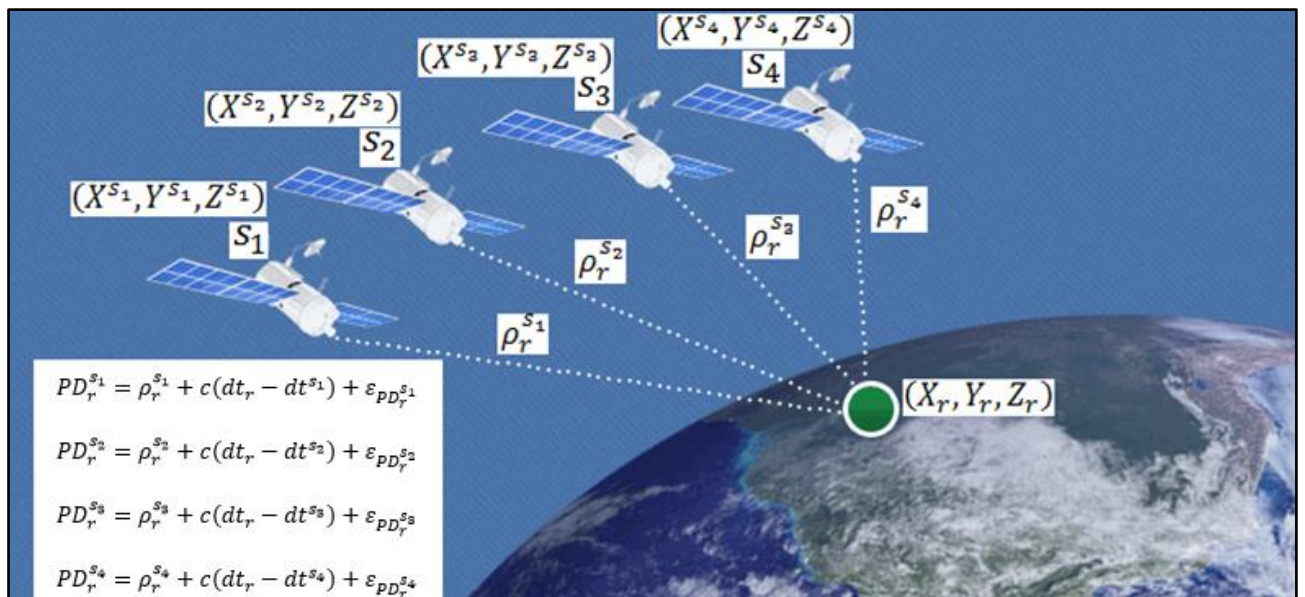


Figura 1.2 – Exemplo de posicionamento por ponto simples rastreamento quatro satélites.

Os únicos erros considerados no SPP são o erro do relógio do satélite; a Relatividade Geral; a rotação da Terra; o erro do relógio do receptor e o erro devido à ionosfera, que é parcialmente corrigido com o uso do Modelo global de Klobuchar, cujos coeficientes também são fornecidos nas efemérides transmitidas, o que permite corrigir entre 50% e 60% deste erro. Todos os demais erros (multicaminho, refração troposférica, erro orbital e etc.) são negligenciados, o que faz com que o SPP apresente precisão e exatidão (acurácia) da ordem de metros ou dezenas de metros.

No caso de outros sistemas GNSS (GLONASS, *Galileo*, *Beidou* e etc.) o princípio é semelhante, inclusive podendo ser realizado o SPP integrado (GPS + GLONASS + *Galileo* + *Beidou*). Entretanto, ao menos quatro satélites de cada sistema GNSS devem ser rastreados, pois o erro do relógio do receptor, em geral, é diferente

para cada sistema GNSS, uma vez que cada sistema possui o seu próprio sistema de tempo.

1.3. Exemplo de posicionamento por ponto simples (SPP)

O SPP pós-processado pode ser realizado gratuitamente no seguinte endereço eletrônico: <http://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/pps-on-line/pps-on-line/>. A partir da próxima versão do sistema operacional *Android* para *smartphones* (denominada *Android N*), será possível armazenar os dados brutos do posicionamento GNSS, possibilitando o pós-processamento dos dados. A seguir (Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 e Tabelas 4.1 e 4.2), é apresentado um exemplo de SPP por meio deste serviço pós-processado, utilizando dados GPS da estação IFSC da RBMC, relativos ao dia 08/04/2016, às 14h59m45s (hora legal de Brasília).

1 - Época a ser processada (2016-04-08 17:59:45).

1.1 - Obtendo a próxima época do arquivo de observação e exibindo apenas satélites GPS.

Dia: 2016-04-08; Hora: 17:59:45; Flag=0; Total de satélites: 19; Total de satélites GPS: 10.

PRN=G10: C1=21393407.172;
PRN=G21: C1=23939439.242;
PRN=G18: C1=23264190.539;
PRN=G14: C1=20447837.094;
PRN=G32: C1=20453799.32;
PRN=G11: C1=25311503.93;
PRN=G16: C1=24295436.344;
PRN=G27: C1=20450752.672;
PRN=G22: C1=23483701.844;
PRN=G08: C1=21702725.781;

Figura 1.3 – Exemplo de SPP: satélites GPS (PRN) e pseudodistâncias do código C/A (C1) para estação IFSC.

1.4 - Iniciando o processo iterativo.

1.4.0 Determinando a solução inicial da época 1

1.4.0.1 - Admitindo como coordenadas aproximadas da estação as contidas no rinex de obs.

X=3745131.617; Y=-4239371.521; Z=-2936760.562.

1.4.0.2 - Definindo o vetor de parâmetros aproximados (coordenadas e erro do relógio do receptor).

$\mathbf{Xo}_{4 \times 1}$
| 3745131.617 |
| -4239371.521 |
| -2936760.562 |
| 0.000 |

Figura 1.4 – Geração de valores aproximados/iniciais para as coordenadas e erro do relógio da estação IFSC.

1.4.0.5 - Interpolando as coordenadas do satélite para a época de observação.

PRN=G10: X=13716774.642609; Y=-6760273.8568232; Z=-21697886.740287
PRN=G21: X=26426547.541043; Y=2828418.9928028; Z=-1804551.2771028
PRN=G18: X=17487902.574741; Y=6763944.5538882; Z=-18374327.068359
PRN=G14: X=21073086.597502; Y=-14288935.130689; Z=-7032414.9727182
PRN=G32: X=20075850.035612; Y=-15680975.97092; Z=-7502035.863386
PRN=G11: X=-12520970.081511; Y=-13632263.446757; Z=-19615534.387471
PRN=G16: X=920220.38319069; Y=-23865674.221963; Z=11088736.329642
PRN=G27: X=9749184.4905991; Y=-22397350.01851; Z=-10248099.263424
PRN=G22: X=-6903189.2835066; Y=-25282421.802238; Z=-3612969.3719287
PRN=G08: X=256926.44778357; Y=-19603998.67774; Z=-17848824.904886

Figura 1.5 – Posições dos satélites no instante de recepção do sinal em função das efemérides transmitidas.

1.4.0.6 - Obtendo as coordenadas dos satélites corrigidas do movimento da Terra.

PRN: G10

Rotação^{G10}_{3x3}	Coordenadas^{G10}_{3x1}	Coordenadas Rotacionadas^{G10}_{3x1}
1.000000 0.000005 0.000000	13716774.643	13716739.461
-0.000005 1.000000 0.000000	-6760273.857	-6760345.242
0.000000 0.000000 1.000000	-21697886.740	-21697886.740

PRN: G21

Rotação^{G21}_{3x3}	Coordenadas^{G21}_{3x1}	Coordenadas Rotacionadas^{G21}_{3x1}
1.000000 0.000006 0.000000	26426547.541	26426563.904
-0.000006 1.000000 0.000000	2828418.993	2828266.110
0.000000 0.000000 1.000000	-1804551.277	-1804551.277

Figura 1.6 – Correção das coordenadas cartesianas geocêntricas em função da rotação da Terra.

1.4.0.9 - Calculando atraso ionosférico pelo Modelo de Klobuchar.	
PRN=G10; Azim=155.43°; Elev=49.28°.	PRN=G10; I=5.24 m.
PRN=G21; Azim=75.75°; Elev=19.89°.	PRN=G21; I=9.12 m.
PRN=G18; Azim=127.07°; Elev=19.73°.	PRN=G18; I=8.65 m.
PRN=G14; Azim=50.76°; Elev=66.43°.	PRN=G14; I=4.54 m.
PRN=G32; Azim=43.39°; Elev=70.62°.	PRN=G32; I=4.43 m.
PRN=G11; Azim=228.11°; Elev=10.13°.	PRN=G11; I=10.80 m.
PRN=G16; Azim=320.57°; Elev=11.59°.	PRN=G16; I=12.01 m.
PRN=G27; Azim=282.48°; Elev=67.90°.	PRN=G27; I=4.51 m.
PRN=G22; Azim=278.92°; Elev=19.93°.	PRN=G22; I=9.48 m.
PRN=G08; Azim=235.00°; Elev=43.99°.	PRN=G08; I=5.76 m.
Mostrando o valor de referência no zênite (Elevação 90 graus):	
I=4.24 m.	

Figura 1.7 – Obtenção do azimute e ângulo de elevação de cada satélite e aplicação do Modelo de Klobuchar.

Tabela 1.1 – Resultados do SPP: coordenadas (X,Y,Z), erro do relógio (dt_r) e respectivos desvios-padrões (σ).

X (m)	σ _X (m)	Y (m)	σ _Y (m)	Z (m)	σ _Z (m)	dt _r (s)	σ _{dt_r} (s)
3745146,934	±3,790	-4239386,982	±4,714	-2936777,114	±4,446	5,571(×10 ⁻⁸)	±1,256(×10 ⁻⁸)

Tabela 1.2 – Diferenças entre as coordenadas obtidas pelo SPP e as coordenadas oficiais da estação IFSC.

ΔX SPP – RBMC OFICIAL (m)	ΔY SPP – RBMC OFICIAL (m)	ΔZ SPP – RBMC OFICIAL (m)
15,317	-15,461	-16,552

Analisando a Tabela 1.1, nota-se que a precisão (desvio-padrão) do posicionamento pelo SPP é de ordem métrica (inferior a 5 metros em cada coordenada cartesiana geocêntrica). Entretanto, analisando a Tabela 1.2, nota-se que a acurácia (exatidão) do posicionamento pelo SPP é de ordem decimétrica (em torno de 15 metros

em cada coordenada cartesiana geocêntrica), em função dos diversos erros sistemáticos negligenciados, além do fato de se utilizar somente dados GPS relativos a uma única época de rastreamento (às 14h 59m 45s do dia 08/04/16).

Em geral, maior precisão é esperada aumentando o número de épocas de rastreamento (dados GNSS) e sistemas GNSS. Um aplicativo gratuito para *smartphones* (com sistema operacional *Android*) que possibilita SPP integrado GPS + GLONASS, combinando ainda diferentes épocas de rastreamento em uma única solução, é o *Mobile Topographer* da *Applicality*. Encerrando este capítulo, a Tabela 1.3 apresenta um resumo do SPP.

Tabela 1.3 – Resumo do método de posicionamento por ponto simples (SPP).

Observáveis utilizadas:	Pseudodistâncias advindas dos códigos (C/A, P ou Y, L2C e etc.)
Erros corrigidos:	Relatividade e rotação da Terra
Erros parcialmente corrigidos:	Ionosfera (Modelo de Klobuchar) e erro do relógio do satélite
Erros minimizados:	Nenhum
Erros estimados:	Erro do relógio do receptor
Erros eliminados/cancelados:	Nenhum
Erros negligenciados:	Todos os demais
Precisão esperada:	Da ordem de metros
Finalidade:	Posicionamento cinemático em tempo real (navegação)

2. GNSS DIFERENCIAL (DGNSS)

O DGNSS (*Differential GNSS* – GNSS diferencial) foi desenvolvido em razão da necessidade de reduzir os efeitos da técnica SA, sendo inicialmente denominado DGPS (*Differential GPS* – GPS diferencial). Seu uso original foi na navegação, mas atualmente pode ser empregado em várias atividades de posicionamento. As observáveis GNSS envolvidas no DGNSS são as pseudodistâncias advindas dos códigos, sendo que o DGNSS pode proporcionar precisão da ordem de decímetros no posicionamento tanto em tempo real quanto pós-processado.

O conceito de DGNSS envolve um receptor estacionário em uma estação de referência com coordenadas conhecidas, rastreando todos os satélites visíveis (estação base). O processamento dos dados GNSS na estação base, por SPP, permite que se calculem correções posicionais, uma vez que as coordenadas da estação base são conhecidas. Essas correções, isto é, diferenças entre as coordenadas obtidas por SPP e as coordenadas conhecidas da estação base, são transmitidas ao receptor móvel (*rover*), que realiza o SPP e aplica então as correções nas coordenadas obtidas pelo SPP (Figura 2.1).

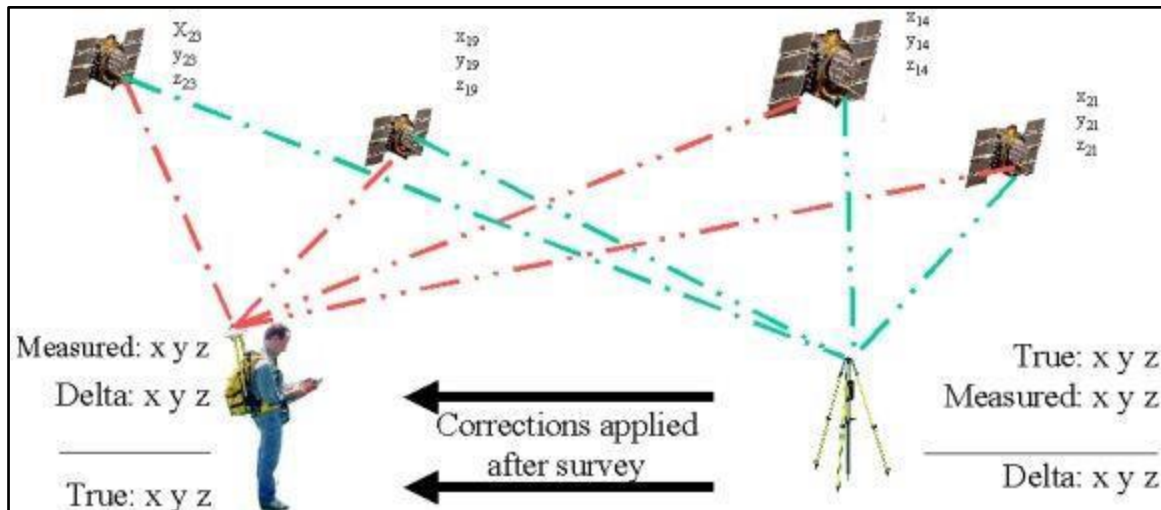


Figura 2.1 – Conceito de GNSS diferencial (DGNSS).

O DGNSS também pode ser realizado no domínio das observáveis, pelo cálculo das correções para as pseudodistâncias pela estação base. O princípio do DGNSS se baseia no fato de que se a estação base estiver próxima do receptor móvel, existe alta correlação dos erros envolvidos, principalmente o erro orbital, o erro do relógio do satélite, e os efeitos da troposfera e da ionosfera. Um aspecto importante no DGNSS é o

intervalo de transmissão das correções e suas variações. Quanto maior o intervalo de transmissão, menor a acurácia da posição corrigida, pois as correlações entre os erros da estação base e do *rover* reduzem-se com o passar do tempo.

Entretanto, a transmissão da variação da correção em função do tempo para o receptor móvel visa reduzir esse problema. Desta forma, se envia para o receptor móvel as correções para uma época t_0 e a taxa de variação destas correções em função do tempo. Estudos antes do desligamento da técnica SA mostram que um atraso de 10 segundos das correções resulta em uma degradação da acurácia da ordem de 0,5 m. Com o desligamento da técnica SA em Maio de 2000, essa situação passou a não ser tão problemática.

O formato largamente utilizado para a transmissão das correções é o RTCM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) SC-104 (*Special Committee 104*), por meio de transmissores via rádio como antenas UHF ou VHF (Figura 2.2). Mais recentemente, as correções também passaram a ser transmitidas via internet, em formato RTCM por meio do protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). É importante ressaltar que a aplicação das correções DGNSS em tempo real exige uma comunicação entre o receptor base e o móvel, ou seja, receptores GNSS com rádio interno ou uso de antena de rádio externa, ou ainda integração com serviços de internet (dados móveis), por meio de *smartphones* e/ou *chips* de operadoras telefônicas. Alguns fabricantes adotam um formato próprio de transmissão.



Figura 2.2 – Receptor GNSS, rádio e antena externa para transmissão das correções via UHF.

2.1. Correções DGNSS nas observáveis e nas coordenadas

No DGNSS no domínio das observáveis, a correção a ser aplicada no receptor móvel na época t_k para a pseudodistância de um satélite específico ($\Delta PD^S(t_k)$) é dada por:

$$\Delta PD^S(t_k) = \Delta PD^S(t_i) + \Delta \dot{PD}^S(t_k - t_i)$$

$$\text{com } \Delta PD^S(t_i) = PD_r^S(t_i) - \rho_r^S(t_i) - c(dt_r - dt^S), \quad \Delta \dot{PD}^S = \frac{\Delta PD^S(t_i) - \Delta PD^S(t_{i-1})}{(t_i - t_{i-1})}$$

onde $\Delta PD^S(t_i)$ é a correção para a pseudodistância relativa aquele satélite na época t_i e $\Delta \dot{PD}^S$ é a variação da correção da pseudodistância relativa aquele satélite em função do tempo. Ambos os termos são calculados na estação base para a época t_i e transmitidos

ao receptor móvel para corrigir o SPP na época t_k , posterior à época t_i . O receptor móvel recebe a correção $\Delta PD^s(t_k)$ e a aplica para corrigir a pseudodistância do satélite na época t_k ($PD_r^s(t_k)$), resultando na pseudodistância relativa ao satélite corrigida ($(PD_r^s)_{corr}$):

$$(PD_r^s)_{corr} = PD_r^s(t_k) - \Delta PD^s(t_k)$$

O mesmo procedimento é feito para todas as pseudodistâncias dos demais satélites na época t_k , e, por meio das pseudodistâncias corrigidas, a estação móvel executa o SPP relativo à época t_k .

No caso do DGNSS no domínio das coordenadas, a estação base realiza o SPP na época t_i e determina correções nas coordenadas em função da diferença entre as coordenadas obtidas pelo SPP e as coordenadas conhecidas da estação, ou seja:

$$\Delta X_{(t_i)} = X_{(t_i)}^{PPS} - X_{BASE}, \quad \Delta Y_{(t_i)} = Y_{(t_i)}^{PPS} - Y_{BASE}, \quad \Delta Z_{(t_i)} = Z_{(t_i)}^{PPS} - Z_{BASE}$$

Estas correções são transmitidas ao receptor móvel, que realiza o SPP na época t_k (posterior à época t_i), e aplica as correções para a época t_k , em função das correções para a época t_i e da variação das correções entre a época t_i e a época imediatamente anterior (t_{i-1}), ou seja:

$$X_{(t_k)} = X_{(t_i)}^{PPS} - \Delta X_{(t_k)}, \quad Y_{(t_k)} = Y_{(t_i)}^{PPS} - \Delta Y_{(t_k)}, \quad Z_{(t_k)} = Z_{(t_i)}^{PPS} - \Delta Z_{(t_k)}$$

$$\Delta X_{(t_k)} = \Delta X_{(t_i)} + \frac{\Delta X_{(t_i)} - \Delta X_{(t_{i-1})}}{(t_i - t_{i-1})}, \quad \Delta Y_{(t_k)} = \Delta Y_{(t_i)} + \frac{\Delta Y_{(t_i)} - \Delta Y_{(t_{i-1})}}{(t_i - t_{i-1})}, \quad \Delta Z_{(t_k)} = \Delta Z_{(t_i)} + \frac{\Delta Z_{(t_i)} - \Delta Z_{(t_{i-1})}}{(t_i - t_{i-1})}$$

Estudos mostram que se a latência das correções for de até 10 segundos e a distância de até 50 km, a precisão posicional será decimétrica (Figura 2.3). Além disso, a aplicação do DGNSS fica limitada à comunicação entre o receptor base e o receptor móvel, em função da distância e/ou das obstruções de sinal. Áreas com grandes obstruções de sinal como cânions urbanos, regiões montanhosas e/ou com baixa cobertura de sinal de operadoras telefônicas limitam a aplicação do DGNSS em tempo real. A própria altura da antena emissora e da antena receptora influenciam no alcance da transmissão (quanto maior a altura de instalação melhor).

Desta forma, um método que visa reduzir a limitação do DGNSS quanto à decorrelação espacial e/ou a limitação da transferência das correções é o WADGPS (*Wide Area DGNSS*), também conhecido por DGNSS em rede, por envolver correções obtidas de duas ou mais estações bases no posicionamento do receptor móvel (*rover*).

Error Source	Stand-alone (hand-held) GPS (m)	DGPS (m)
Satellite Clocks	3.0	0.0
Orbit Errors	2.7	0.0
Ionosphere	8.2	0.4
Troposphere	1.8	0.2
Receiver Noise	0.3	0.3
Multipath	0.6	0.6
User Equivalent Range Error	±9.4	±0.9

Figura 2.3 – Exemplo de magnitude dos erros no SPP (coluna central) e no DGPS (coluna a direita).

2.2. WADGNSS ou DGNSS em rede

Para explorar todo o potencial do DGNSS, as separações entre as estações de referência não devem ultrapassar cerca de 200 km. Portanto, centenas de estações DGNSS deveriam ser estabelecidas para atender aos mais diversos tipos de usuários de uma área mais abrangente.

O WADGNSS (ou DGNSS em rede) foi desenvolvido para que fossem reduzidas as deficiências inerentes ao DGNSS, sem a necessidade de estabelecer um grande número de estações. Enquanto o DGNSS produz uma correção escalar para cada uma das pseudodistâncias, um sistema de WADGNSS proporciona um vetor de correções composto dos erros orbitais e do relógio para cada satélite, além de parâmetros dos efeitos ionosféricos e troposféricos. Este conjunto de correções, estimados com base em uma rede de estações de referências, são transmitidos ao receptor móvel no formato RTCM SC-104, por exemplo, por meio de um satélite geoestacionário (Figura 2.4) ou via protocolo NTRIP.

Importante ressaltar que no caso do DGNSS em rede, o usuário necessita dispor somente de um receptor GNSS (receptor móvel), uma vez que múltiplas estações GNSS ativas formam uma rede de estações base para obtenção e transmissão das correções em tempo real.

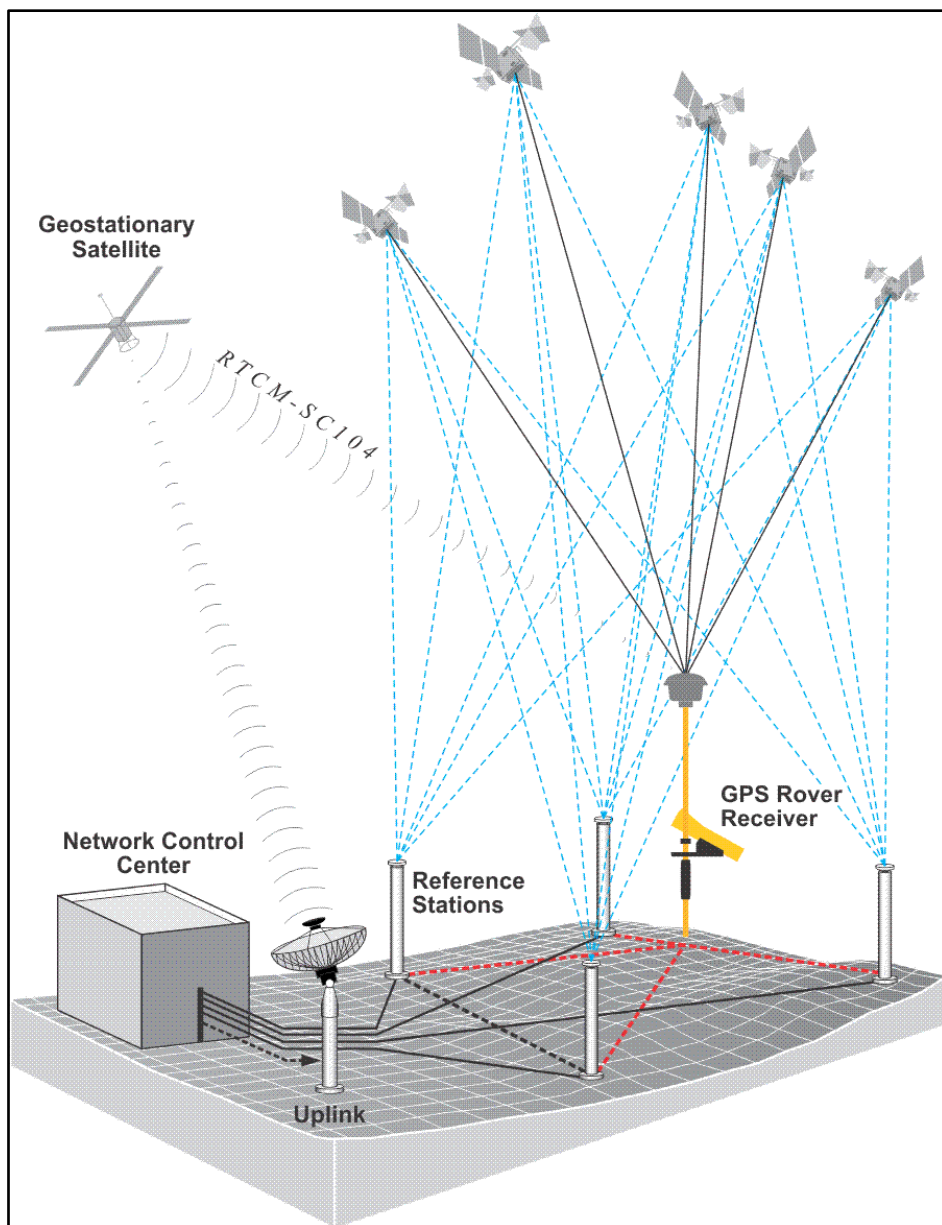


Figura 2.4 – Conceito do WADGNSS (múltiplas estações bases).

Na composição de um sistema de WADGNSS, há pelo menos uma estação monitora, estações de referência e o sistema de comunicação. Cada estação de referência é equipada com receptor GNSS de dupla ou tripla frequência. As medidas coletadas em cada estação de referência são enviadas para a estação monitora, a qual estima e analisa o vetor de correções. Normalmente, a observável utilizada é a pseudodistância filtrada pela fase, isto é, uma combinação entre a pseudodistância e a fase da onda portadora, que apresenta maior precisão em relação ao emprego somente da pseudodistância advinda do código. As correções são transmitidas ao usuário

(receptor móvel) por meio de um sistema de comunicação conveniente, como por exemplo, satélites geoestacionários, redes FM, internet e etc.

O sistema WADGNSS pode utilizar ainda a técnica de estação de referência virtual (VRS – *Virtual Reference Station*). A técnica VRS consiste em gerar dados GNSS para uma posição previamente escolhida, sem que ocorra uma ocupação física do local (isto é, uma estação base virtual). Os dados são obtidos por meio de modelos matemáticos que simulam as condições de observação que seriam encontradas no terreno, tomando por base os dados reais das estações de referência com coordenadas conhecidas e interpolando estes valores para a estação base virtual.

Para gerar a VRS para um determinado usuário, a sua localização aproximada (obtida, por exemplo, via SPP) deve ser transmitida para o computador de controle central. Dessa forma, um *link* de comunicação bi-direcional entre o usuário e o controle central deve ser estabelecido. Essa comunicação pode ser realizada, por exemplo, por meio de serviços de telefonia ou internet móvel com *smartphone*. O computador central gera o arquivo de observáveis e correções da estação virtual e o envia para o usuário (receptor móvel), que pode realizar o posicionamento DGNSS utilizando a VRS como se fosse uma estação base nas suas proximidades (Figura 2.5). Estações VRS podem ser simuladas em uma malha regularmente espaçada, por exemplo, a cada 20 km, formando uma rede virtual de referência com distribuição espacial homogênea.

Vários serviços WADGNSS, de caráter comercial, têm sido utilizados no mundo. O JPL da NASA tem desenvolvido um serviço WADGNSS de abrangência global (GDGPS – *Global Differential GPS*). Conforme visto anteriormente, muitos sistemas SBAS utilizam o conceito do WADGNSS, como o norte-americano WAAS, o europeu EGNOS, o japonês MSAS e etc., devendo o usuário utilizar receptores desenvolvidos especialmente para esses serviços, isto é, com sistemas adequados de comunicação e transmissão de dados.

No Brasil, os serviços mais populares oferecidos pelo mercado são o *Omnistar* do grupo Fugro e o *Starfire* do grupo John Deere. O *Omnistar* utiliza oito satélites geoestacionários para transmissão dos dados visando disponibilidade global, necessita de receptores específicos para a recepção das correções, e geralmente fornece precisão decimétrica para receptores de simples frequência e em torno de 15 cm para receptores de dupla frequência. Atualmente, há uma grande quantidade de receptores no mercado que possibilitam a aquisição de sinal WADGNSS, incluindo o WAAS e o EGNOS.

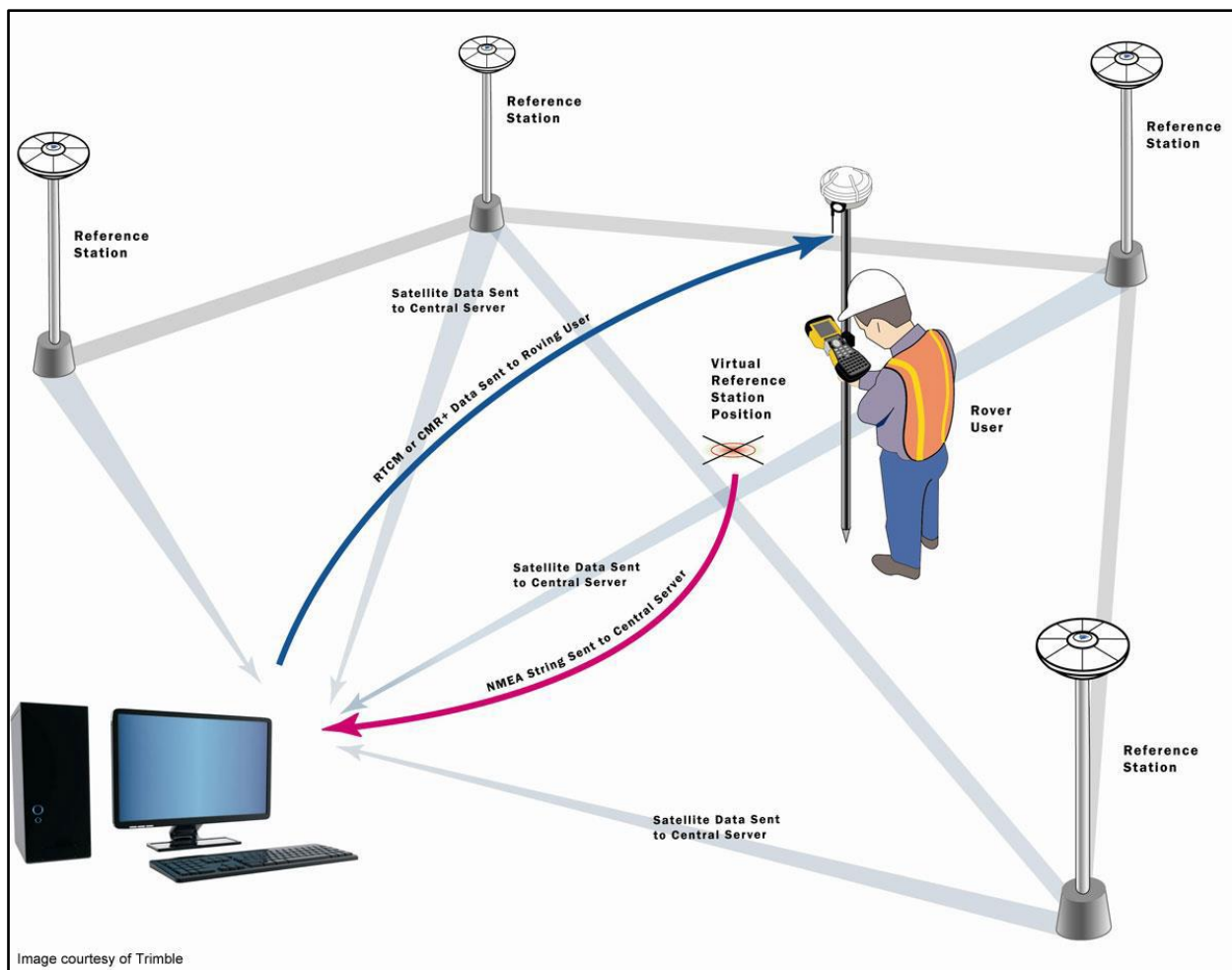


Figura 2.5 – WADGNSS utilizando estação de referência virtual (VRS).

2.3. Posicionamento cinemático em tempo real (RTK)

O posicionamento cinemático em tempo real (RTK – *Real Time Kinematic*) é um método bastante similar ao DGNSS em tempo real. Porém, enquanto o DGNSS aplica correções no posicionamento por meio de pseudodistâncias, o RTK aplica correções no posicionamento por meio da fase da onda portadora, sendo denominado “DGNSS preciso” (Figura 2.6). Após a solução das ambiguidades e em condições normais, se nenhum imprevisto ocorrer, o RTK pode atingir a acurácia de poucos centímetros.

Os receptores RTK empregam métodos de solução rápida (praticamente instantânea) da ambiguidade, como por exemplo, o método LAMBDA, que será visto no Capítulo 8. Dessa forma, o usuário realiza um posicionamento em tempo real com precisão centimétrica, poucos segundos após iniciar os dois receptores GNSS.

No método RTK, ao invés da obtenção de correções para a fase da onda portadora por meio da estação base e transferência destas correções para a estação

móvel; pode-se transmitir os dados brutos GNSS da estação base para a estação móvel, possibilitando o posicionamento relativo em tempo real entre a estação base e o receptor móvel. Esta técnica também pode apresentar acurácia centimétrica.

O profissional deve estar atento quanto aos métodos de posicionamento possíveis na técnica RTK (transferência de correções para o DGNSS preciso e/ou transferência dos dados brutos GNSS para realização do posicionamento relativo), consultando o manual de operação fornecido pelo fabricante. Em geral, o posicionamento relativo apresenta melhor precisão, porém, o DGNSS preciso é mais utilizado no posicionamento cinemático, pois possui menor tempo de latência (devido ao menor volume de dados e menor tempo de processamento envolvido), além do fato que as correções diferenciais apresentam menor taxa de variação em função do tempo do que as observáveis GNSS originais (no caso, fases das ondas portadoras).

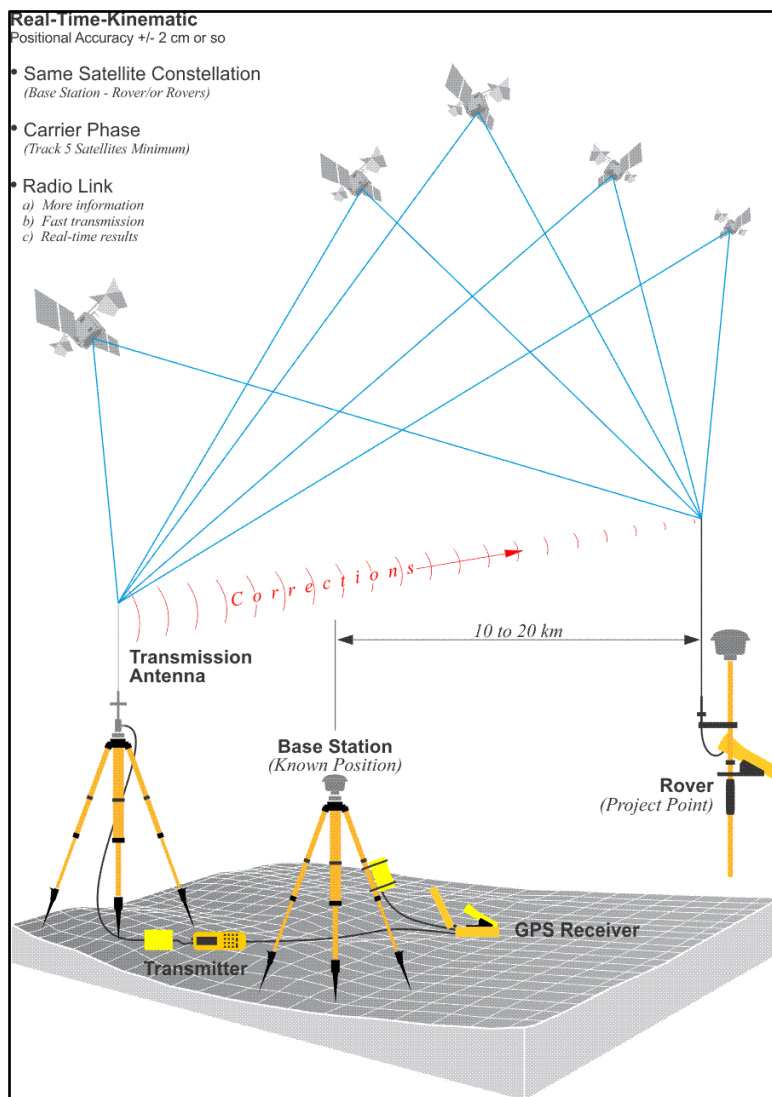


Figura 2.6 – Posicionamento cinemático em tempo real (RTK ou DGNSS preciso).

Tal como no DGNSS, o formato de transmissão dos arquivos é definido pelos padrões recomendados pela RTCM SC-104: formato RTCM 18/19 para as observáveis GNSS originais (fase(s) da(s) portadora(s) e pseudodistâncias, respectivamente) e formato RTCM 20/21 para as correções diferenciais (para as fases da(s) portadora(s) e pseudodistâncias, respectivamente).

O emprego da técnica RTK, tanto no DGNSS preciso quanto no posicionamento relativo, é limitado para linhas-base de 15 km, em função do alcance da transmissão de dados via rádio por meio do enlace VHF (*very high frequency*) ou UHF (*ultra high frequency*). Desta forma, uma das limitações de receptores RTK é a obstrução da comunicação entre a base e o *rover* devido a obstáculos naturais ou artificiais como morros e prédios, por exemplo. Nestes casos, pode-se utilizar antenas repetidoras em locais altos como topos de morros e prédios para manter a comunicação entre a base e o *rover* por dezenas de quilômetros. No caso da transmissão dos dados e correções via protocolo NTRIP, a aplicação fica limitada a áreas com cobertura de sinal de operadoras telefônicas ou acesso à internet por *Wifi*. Para a redução deste problema, são desenvolvidos sistemas RTK em rede, tal como o WADGNSS ou DGNSS em rede.

2.4. Posicionamento RTK em rede

O RTK em rede, tal como o DGNSS em rede (WADGNSS), utiliza estações de referência para geração e transmissão das correções (e/ou observáveis GNSS originais) ao receptor móvel, via protocolo NTRIP (transferência via internet) ou satélite geoestacionário (transferência via onda de rádio). Muitos serviços WADGNSS também oferecem serviços de RTK em rede, ou seja, fornecem correções tanto para o posicionamento utilizando pseudodistâncias quanto para o posicionamento utilizando a fase da onda portadora, podendo empregar ainda o conceito de estação virtual de referência (Figura 2.5) para o RTK em rede (ou seja, estimar correções e/ou observáveis GNSS para uma estação “base” virtual, “próxima” ao receptor móvel do usuário).

No Brasil, pode-se citar o exemplo do CEGAT (Centro Geodésico Alezi Teodolini), que atualmente dispõe de dezoito estações GNSS ativas, o que faz com que em grande parte do território do estado de São Paulo a distância até uma estação mais próxima seja de no máximo 70 km. Entretanto, ressalva-se que este serviço é de caráter comercial, e, portanto, não gratuito. Uma vantagem do RTK em rede, tal como no DGNSS em rede, é o fato de o profissional poder dispor de somente um receptor GNSS

(receptor móvel), uma vez que as estações GNSS ativas formam uma rede de estações base.

Outro exemplo a ser citado, é o sistema RTX (*Real Time eXtended*) do fabricante *Trimble*. O sistema RTX possui uma rede global de estações de referência (estações base), que transmitem as informações para um centro de controle, sendo que o mesmo as envia para satélites geoestacionários, garantindo cobertura global e disponibilidade contínua. Desta forma, o usuário, dispondo apenas de um receptor móvel (*rover*), realiza o posicionamento RTK sem restrições em função de obstáculos para comunicação via rádio entre a estação base e o *rover* e/ou da cobertura de sinal de operadoras telefônicas para comunicação via protocolo NTRIP. Salienta-se que este serviço também é de caráter comercial e não apresenta o mesmo grau de precisão na coordenada altimétrica em relação à técnica RTK convencional. Em contrapartida, o sistema RTX possui melhor desempenho sob efeitos de cintilação ionosférica, devido à rede global de referência.

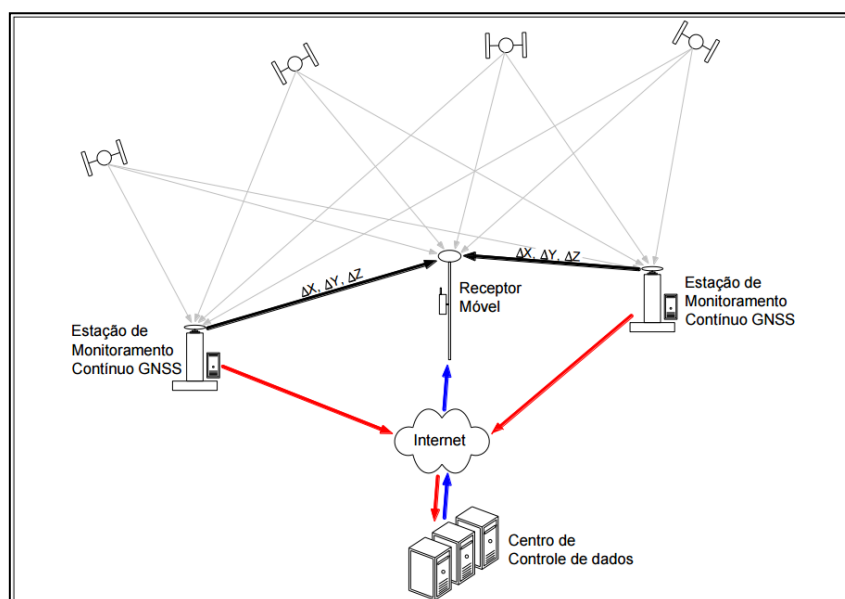


Figura 2.7 – Conceito de RTK (DGNSS preciso) em rede.

Nos últimos anos, o IBGE oferece, gratuitamente, tanto o posicionamento DGNSS quanto o posicionamento RTK (envio de correções e/ou dados brutos GNSS), por meio das estações da RBMC, sendo os dados transmitidos via internet por meio do protocolo NTRIP (Figura 2.8). Para isto, o usuário necessita realizar um cadastro e dispor de comunicação por internet para acessar o serviço denominado RBMC-IP. Entretanto, ressalva-se que o usuário pode acessar somente os dados de uma estação de

sua conveniência por vez, ou seja, não se trata de um sistema DGNSS ou RTK em rede (com múltiplas estações de referência). Finalizando este capítulo, a Tabela 2.1 apresenta um resumo do método DGNSS.

Tabela 2.1 – Resumo do método de posicionamento por GNSS diferencial (DGNSS).

Observáveis utilizadas:	Pseudodistância (<i>ion-free</i> para receptores de dupla frequência) ou fase da onda portadora (DGNSS preciso ou RTK com correções)
Erros corrigidos:	Erro do relógio do satélite, Relatividade, rotação da Terra
Erros parcialmente corrigidos:	-
Erros minimizados:	-
Erros estimados:	Erro do relógio do receptor, erro orbital, efeitos da troposfera e da ionosfera
Erros eliminados/cancelados	Nenhum
Erros negligenciados:	Multicaminho, variação do centro de fase da antena, fase <i>wind-up</i>
Precisão esperada:	Decímetros (DGNSS) ou centímetros (RTK com correções)
Finalidade:	Posicionamento de média (DGNSS) ou alta precisão (RTK) em tempo real

RBMC - SERVIÇO RBMC-IP



Figura 2.8 – Estações da RBMC que transferem dados em tempo real via NTRIP (serviço RBMC-IP).

3. POSICIONAMENTO POR PONTO PRECISO (PPP)

O SPP refere-se à determinação da posição do receptor com base em observações de pseudodistância, derivadas de algum código, obtendo a órbita (posição) e os demais parâmetros dos satélites em função das efemérides transmitidas. Quando se utilizam as observáveis de pseudodistância e/ou fase da onda portadora, coletadas por receptores de simples, dupla, ou tripla frequência, porém, utilizando efemérides precisas para a órbita e erro do relógio dos satélites, se trata do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP, ver Figura 3.1). Este método tem apresentado grande potencialidade para aplicações que exijam alta acurácia, como a geodinâmica, além de apresentar grandes vantagens se comparado com o processamento de redes GNSS (posicionamento relativo), onde há grande dispêndio computacional.

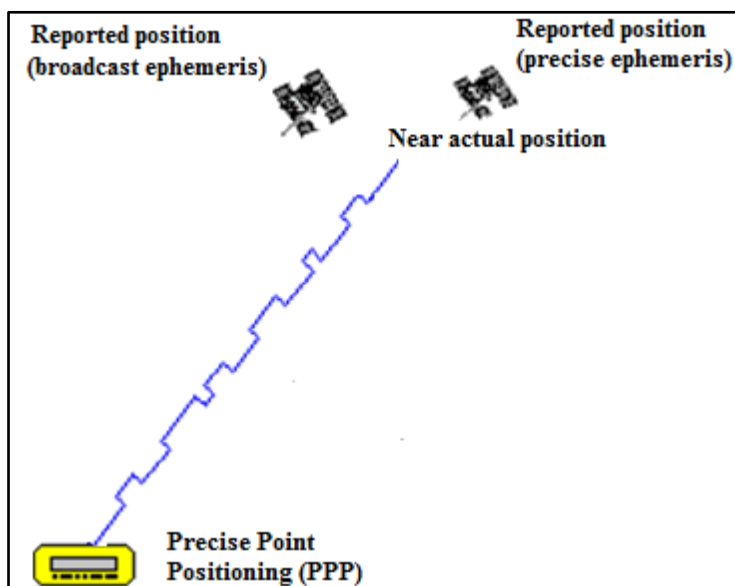


Figura 3.1 – Conceito do posicionamento por ponto preciso (PPP).

Nas efemérides precisas, ou pós-processadas, a órbita (posição) e o erro do relógio (tempo) dos satélites são estimados com alta precisão e disponibilizados por algum meio de comunicação, como por exemplo, a internet. Essas informações têm sido produzidas e disponibilizadas gratuitamente pelo IGS e centros associados. Atualmente, o IGS produz três tipos de efemérides e correções para o relógio dos satélites, denominadas de efemérides IGS, IGR e IGU.

O sistema de referência vinculado ao posicionamento será aquele das efemérides precisas, geralmente o ITRF vigente (atualmente ITRF2014). No PPP, as coordenadas e o erro do relógio do receptor GNSS podem ser considerados os parâmetros locais,

enquanto outros parâmetros como a órbita e o erro do relógio dos satélites, podem ser considerados como parâmetros globais.

Uma rede global de monitoramento GNSS estima os parâmetros globais e resulta nas efemérides precisas, o que permite ao usuário solucionar os parâmetros locais (coordenadas do receptor) por meio do PPP para cada época de observação (Figura 3.2). Para receptores de dupla ou tripla frequência, deve-se utilizar como observável GNSS no processamento, a combinação linear livre dos efeitos da ionosfera (*ion-free*), e para receptores de simples frequência, deve-se minimizar estes efeitos com emprego de algum modelo da ionosfera disponível (por exemplo, Modelo de Klobuchar).

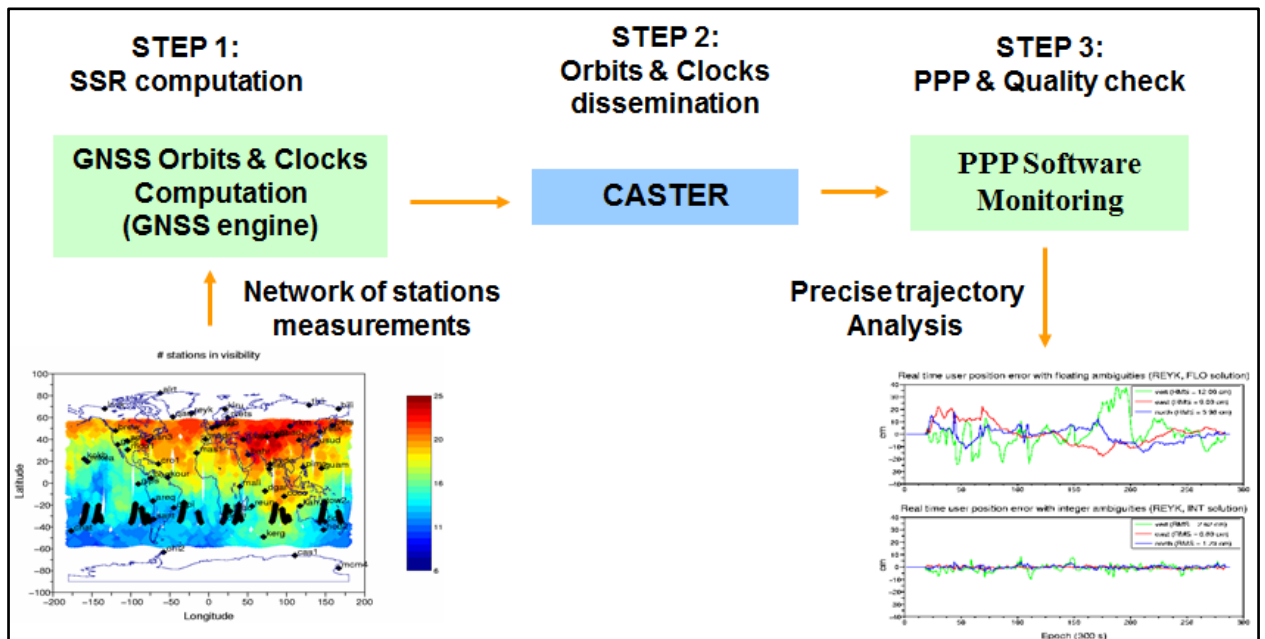


Figura 3.2 – Estrutura de funcionamento de um serviço de PPP.

Os modelos matemáticos envolvidos no PPP, para a pseudodistância *ion-free* ($PD_{r(IF)}^s$) e para a fase da onda portadora *ion-free* ($\varphi_{r(IF)}^s$), são dados respectivamente por:

$$PD_{r(IF)}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_{r0}^s + dT_z \cdot m(E)$$

$$\varphi_{r(IF)}^s = \frac{f_1}{c} \cdot \rho_r^s + f_1(dt_r - dt^s) + N_{IF} + \frac{f_1}{c} \cdot T_{r0}^s + \frac{f_1}{c} \cdot dT_z \cdot m(E)$$

onde:

- ρ_r^s é a distância geométrica entre o satélite e o receptor;

- dt_r é o erro do relógio do receptor e dt^s é o erro do relógio do satélite,
- N_{IF} é a ambiguidade da observável *ion-free*;
- T_{r0}^s é o atraso troposférico aproximado por algum modelo disponível;
- dT_z é o atraso troposférico zenital residual a ser estimado no modelo do PPP;
- $m(E)$ é a função de mapeamento em função do ângulo de elevação (E) do satélite;
- c é a velocidade da luz no vácuo (constante);
- f é a frequência da observável *ion-free* (no caso do GPS, igual à da portadora L1).

As incógnitas envolvidas no PPP são as coordenadas X,Y,Z do receptor, presentes na distância geométrica entre o satélite e o receptor; o erro do relógio do receptor; o atraso troposférico zenital residual e o vetor de ambiguidades para a fase da portadora *ion-free*. As coordenadas do satélite, também presentes na distância geométrica; e o erro do relógio do satélite, são fornecidos nas efemérides precisas; enquanto o atraso troposférico aproximado é dado por algum modelo disponível, como por exemplo, o Modelo de Hopfield. Outros parâmetros podem ainda ser considerados no modelo matemático, como por exemplo, variação do centro de fase da antena do satélite e do receptor, marés terrestres, cargas oceânicas, efeitos relativísticos, efeitos de segunda ordem da ionosfera, fase *wind-up* e tendência inter-frequência dos satélites e receptor, dependendo do *software* de processamento utilizado.

Para receptores de dupla ou tripla frequência, o PPP fornece, normalmente, precisão centimétrica no modo de posicionamento estático, e decimétrica no modo de posicionamento cinemático. O período de convergência, isto é, o intervalo de tempo requerido para iniciar um posicionamento com precisão centimétrica é de geralmente 30 minutos, podendo tornar-se significativamente mais longo antes da solução convergir para um posicionamento com precisão milimétrica (Figura 3.3).

Explorando a aplicação de técnicas de solução rápida das ambiguidades, o PPP tem potencial para reduzir o tempo de convergência da solução de minutos para segundos, tal como no posicionamento cinemático em tempo real (RTK). Entretanto, tais métodos de solução rápida das ambiguidades no PPP ainda estão em desenvolvimento e estudo.

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)				
Tipo de Receptor	Uma frequência		Duas frequências	
	Planimétrico	Altimétrico	Planimétrico	Altimétrico
Após 1 hora	0,450	1,000	0,030	0,050
Após 2 horas	0,300	0,800	0,015	0,025
Após 4 horas	0,200	0,500	0,006	0,015
Após 6 horas	0,180	0,400	0,004	0,010

Figura 3.3 – Precisão esperada em um posicionamento estático por meio do PPP (Fonte: IBGE).

3.1. Serviços de PPP on-line

O PPP tem sido empregado, principalmente pela comunidade científica, desde a década de 90, limitado basicamente aos usuários com acesso a programas computacionais de processamento de dados de caráter mais científico, como por exemplos, os *softwares Bernese* e *Gipsy-OASIS*. Porém, a partir dos anos 2000, o PPP ganhou um impulso significativo em popularização devido principalmente ao surgimento de serviços gratuitos de processamento *on-line*. As principais organizações que têm disponibilizado esse tipo de serviço são: o JPL da NASA (serviço APPS – *Automatic Precise Point Positioning*), a UNB (serviço GAPS – *GPS Analysis and Positioning software*), a GMV (serviço *magicPPP*) e o NRCan (serviço CSRS-PPP – *Canadian Spatial Reference System-Precise Point Positioning*).

Em geral, estes serviços de PPP são gratuitos, exigindo apenas um cadastramento do usuário no sistema, a exceção do GAPS, que também é gratuito, mas não exige um pré-cadastramento do usuário. Em geral também, estes serviços processam dados de receptores de dupla frequência, seja no modo estático, seja no modo cinemático, ambos de maneira pós-processada. Entretanto, o serviço de PPP do JPL da NASA, por exemplo, também oferece processamento de dados em tempo real, porém, em caráter comercial (não gratuito). O CSRS-PPP do NRCan está disponível *on-line* desde novembro de 2003, processando dados GLONASS desde 4 de Outubro de 2011.

Para utilizar os serviços, o usuário, após o cadastramento, simplesmente envia o arquivo de dados GNSS no formato RINEX pela internet na página eletrônica do serviço, informando se a ocupação é estática ou cinemática. Após pouco tempo o *link* com o resultado do processamento é enviado para o *e-mail* do usuário, cadastrado previamente (Figura 3.4). O sistema de referência adotado pelos serviços, em geral, é o ITRF vigente no dia que as efemérides precisas foram processadas (atualmente ITRF2014, anteriormente ITRF2008, ou ainda antes ITRF2005).

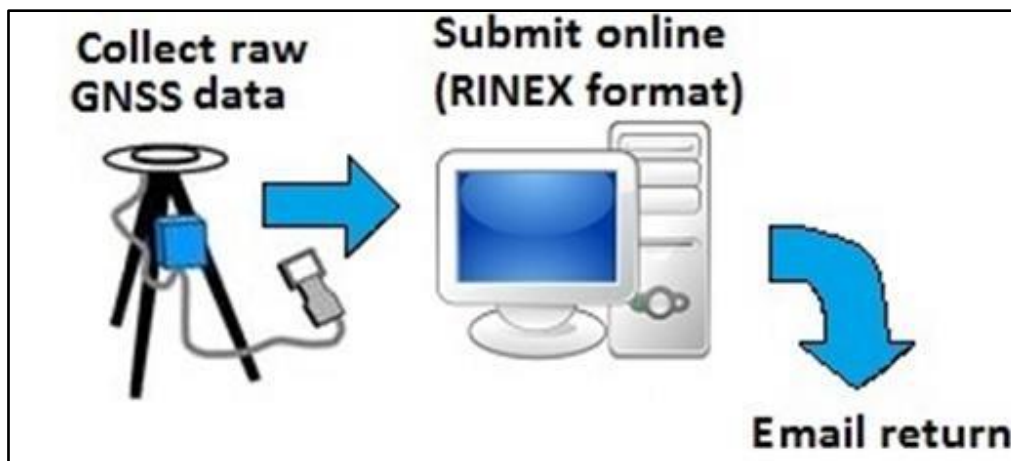


Figura 3.4 – Funcionamento de um serviço on-line de PPP.

Para o usuário do Brasil, é interessante notar que o sistema de referência oficial do país é o SIRGAS2000, compatível, em termos práticos, com o ITRF2000. A época relacionada às coordenadas estimadas pelo PPP é referente ao dia do arquivo de dados GNSS. Dessa forma, o usuário deve estar atento, pois, se necessário, qualquer atualização à outra época fica sobre sua responsabilidade. Por exemplo, no caso do SIRGAS2000, a época de referência é Maio de 2000 ou 2000,4. Para isto, pode-se utilizar as velocidades das coordenadas obtidas por algum modelo de velocidades disponível, como o VEMOS2009 (*VE*locity *MO*del for *SIRGAS* – modelo de velocidades para o SIRGAS, disponível em: <http://www.sirgas.org/index.php?id=54>).

É importante ressaltar que o fabricante, modelo e altura da antena do receptor GNSS devem estar no cabeçalho do arquivo de dados que foi submetido, pois, o serviço irá aplicar as correções e reduções do centro de fase da antena buscando automaticamente esses dados no arquivo RINEX.

O GAPS da UNB (*University of New Brunswick/Canada*) processa gratuitamente dados GPS de dupla frequência no formato RINEX, no modo estático ou cinemático, em ITRF2000, sem necessidade de pré-cadastramento do usuário, usando efemérides do IGS (página do serviço: <http://gaps.gge.unb.ca/>). O APSS do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration/EUA*) processa gratuitamente dados GPS de dupla frequência no formato RINEX, no modo estático ou cinemático, no ITRF vigente, bastando fazer um pré-cadastramento do usuário, usando efemérides da rede GDGPS (*Global Differential GPS*) do JPL (página do serviço <http://apps.gdgps.net/>). O serviço também processa, em caráter comercial, o PPP em tempo real, seja na superfície terrestre ou em voos. O

magicPPP da *GMV Innovation e Solutions* (Espanha), processa gratuitamente dados GPS e GLONASS de dupla frequência (GPS somente, GLONASS somente, ou GPS + GLONASS), no formato RINEX, no modo estático ou cinemático, em ITRF2008 ou ETRS89, bastando fazer um pré-cadastramento do usuário, usando efemérides do IGS (página do serviço: <http://magicgnss.gmv.com/ppp/>). O CSRS-PPP do NRCAn (*Natural Resources Canada*) processa gratuitamente dados GPS e GLONASS de simples e dupla frequência, no formato RINEX, no modo estático ou cinemático, no ITRF vigente ou em NAD-83, bastando fazer um pré-cadastramento do usuário, usando efemérides do IGS e do NRCAn (página do serviço <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php?locale=en>).

3.2. Serviços IBGE-PPP e RT_PPP Online

O IBGE também disponibiliza gratuitamente o serviço do CSRS-PPP (IBGE-PPP, disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/default.shtm>). Uma facilidade em utilizar o IBGE-PPP em relação aos demais serviços *online* de PPP é que as coordenadas do ponto são fornecidas em SIRGAS2000, isto é, o próprio serviço converte as coordenadas da data do levantamento GNSS para o sistema de referência oficial do país em sua época de referência (Maio de 2000), utilizando o modelo de velocidades VEMOS2009.

O IBGE-PPP processa dados GPS e GLONASS de simples ou dupla frequência, tanto no modo estático quanto cinemático. As efemérides precisas utilizadas são as produzidas pelo IGS (fora do território brasileiro) ou NRCAn (dentro do território brasileiro). A Figura 3.5 apresenta a disponibilidade e precisão das efemérides precisas do NRCAn.

Produto NRCAN				
Órbitas / Intervalo	Relógios / Intervalo	Constelação	Quando o IBGE-PPP irá utilizar?	Precisão da órbita
Ultra-Rápida (EMU) 15 minutos	EMU 30 segundos	GPS	a partir de 1h30m-2h30m após o fim do rastreo até a disponibilidade das órbitas EMR	± 15 cm
Rápida (EMR) 15 minutos	EMR 30 segundos	GPS e GLONASS	a partir de 12-36 horas após o fim do rastreo até a disponibilidade das órbitas EMF	± 5 cm
Final (EMF) 15 minutos	EMF 30 segundos	GPS e GLONASS	a partir de 11-17 dias após o fim do rastreo	± 2 cm

Figura 3.5 – Disponibilidade e precisão das efemérides precisas do NRCAn.

O serviço IBGE-PPP utiliza a observável *ion-free* para receptores de dupla frequência ou o modelo global da ionosfera do IGS (IONEX) para receptores de simples frequência; aplica as correções e variações do centro de fase da antena do receptor e dos satélites fornecidas pelo IGS; o modelo de cargas oceânicas FES2004; o modelo meteorológico GPT (*Global Pressure and Temperature*); o modelo da Troposfera de Davis (componente hidrostática) e de Hopfield (componente úmida) com a função de mapeamento GMF (*Global Map Function*); além da correção inter-frequência dos satélites e receptor.

Para utilizar o serviço, basta preencher algumas informações (a altura da antena, quando informada, deve ser pela medição vertical e não inclinada), enviar arquivos no formato RINEX e um *e-mail* válido para receber os resultados (Figura 3.6). Mais detalhes podem ser obtidos no relatório do serviço: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf.

Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão | Destaques do governo

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBGE
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ORDEM E PROGRESSO

Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

!!ALERTA!! Um dos fatores que influencia a qualidade das coordenadas é o número de observações processadas. **!!ALERTA!!**
!!ALERTA!! Deste modo recomenda-se que este número seja maior que das observações rejeitadas. **!!ALERTA!!**
!!ALERTA!! Estas informações são apresentadas no item 3.2 do arquivo SUM. Consultar **INFORMAÇÕES IMPORTANTES** para maiores detalhes. **!!ALERTA!!**

Seja um colaborador do Sistema Geodésico Brasileiro!
Prezado usuário, caso tenha feito o levantamento em uma estação geodésica do IBGE (VT, RN ou SAT), a sua colaboração será de grande valia para a atualização das informações do Sistema Geodésico Brasileiro - SGB, fornecendo-nos o código estampado na chapa da estação no campo abaixo: (por exemplo: 1120R)
 Esta opção não é obrigatória. Caso não esteja fazendo o levantamento em um marco do SGB deixe em branco.

Selecione um arquivo RINEX: Nenhum arquivo selecionado

Selecione o Modo de Processamento:
☒ Estático ☐ Cinemático

OS VALORES SELECIONADOS AQUI SERÃO ADOTADOS PARA TODOS OS RINEX QUE ESTEJAM COMPRIMIDOS EM UM ÚNICO ARQUIVO.
Tipo de Antena:

Altura da antena (m): ☐ O valor para altura da antena somente será adotado se esta caixa estiver marcada.

Concordo que os resultados dos processamentos poderão ser utilizados pelo IBGE para a avaliação de produtos e informações cartográficas e geodésicas, bem como para a avaliação do próprio serviço IBGE-PPP ☒

E-mail válido do usuário. (não pode conter espaços ou tabs!):

Nota: O processamento iniciará após a transferência do arquivo, o que pode demorar alguns minutos. Caso o resultado não comece a aparecer em 2 horas, por favor reprocesse.

Página Inicial | A Instituição | Atendimento | Estatísticas do Site | Processo de Contas Anuais | Editais e Licitações | Trabalhe conosco

Figura 3.6 – Interface do serviço IBGE-PPP.

Na Tese de Doutorado de Marques (2012), foi desenvolvido um *software* de PPP em tempo real, somente para dados GPS. Entretanto, este *software* também está disponibilizado para posicionamento pós-processado gratuito no seguinte endereço eletrônico (denominado pelos autores de “RT_PPP Online”): <http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/ppp/index.php>. As principais características de processamento deste serviço são apresentadas na Figura 3.7.

Efeito	Estratégia
Ionosfera – 1ª ordem	Combinação <i>ion-free</i>
	Estimativa da ionosfera como processo estocástico
Troposfera	Somente modelo de Hopfield + GPT
	GMF + TZD a partir de dados do CPTEC
	VMF1 + TZD a partir de dados ECMWF
	TZH fixo + TZV estimado (<i>random walk</i>)
Carga de marés oceânicas	Aplicada
Marés de corpos terrestres	Modelos descritos pelo IERS 2003 (McCARTHY; PETIT, 2003)
PCV receptor e satélite	Variação absoluta do centro de fase das antenas (PCO e PCV)
Efemérides precisas	Órbita final IGS
Correção do erro do relógio do satélite	Pós-processado (taxa de 30 segundos)
<i>Differential Code Bias</i> (DCB)	Valores mensais estimados pelo CODE
Ambiguidades	Solução <i>float</i>
Fase <i>wind-up</i>	Aplicado
Efeito de relatividade	Aplicado

Figura 3.7 – Principais características do serviço RT_PPP Online.

Uma vantagem deste serviço é o caráter mais científico, permitindo escolher entre diferentes estratégias de processamento (Figura 3.8). Mais detalhes podem ser obtidos em http://is-cigala-calibra.fct.unesp.br/ppp/manual/Manual_RTPPP_2015-08.pdf.

RT_PPP Online - Posicionamento por Ponto Preciso com dados GPS

1. RINEX

Estação da RBMC: Informe o nome da estação, ano e dia do ano. Os arquivos RINEX serão buscados automaticamente no FTP do IBGE.

Nome da Estação: PPTTE Ano: 2014 Dia do Ano: 100

Observáveis e Precisão

Utilizar observáveis: C/A, P2, L1 e L2

Precisão das Observáveis (metros)

C/A: 0.8 P2: 1 L1: 0.008 L2: 0.01

Órbitas e Relógios dos Satélites

Precisas (sp3): Utilizar correções precisas para os relógios dos satélites: ☒

Ionosfera

Combinação Ion-Free:

Troposfera

Estimar (Random Walk): Precisão (m/hora): 0.005

Delimitação de épocas

Época inicial: Época Final:

Opções da Antena, Correções e Configurações Adicionais

Corrigir variação de Centro de Fase: ☒ Distância do Centro de Fase ao ARP (m): 0

Tipo de Antena: Tentar obter do RINEX

Máscara de Elevação: 10 Modelo de carga oceânica: ☒ DCB: ☒

Coordenadas de Referência: Tentar obter do RINEX

Velocidades (m/ano): Vx: 0 Vy: 0 Vz: 0

Época de Referência: Ex: 2000.4

Modo

Estático:

Dados de Contato

E-mail: fulano@seuemail

Grupo de Estudos em Geodésia Espacial - FCT/Unesp

Figura 3.8 – Diferentes estratégias de processamento disponíveis no serviço RT_PPP Online.

3.3. PPP em tempo real (RT-PPP)

Atualmente, o PPP em tempo real (*Real Time PPP* – RT-PPP) já é uma realidade, por exemplo, por meio do serviço comercial APPS do JPL/NASA. O PPP em tempo real possui grande aplicação no posicionamento cinemático de aeronaves, pois a altitude e velocidade de voo destas limita a aplicação de outros métodos de posicionamento em tempo real como RTK.

No caso, as condições atmosféricas em altas altitudes são diferentes das encontradas na superfície terrestre, onde as estações de referência em geral estão localizadas, além disso, a velocidade de voo das aeronaves (da ordem de centenas de km/h) e suas variações em altitude resultam em variações nos satélites rastreados e nas fontes de erros, reduzindo a eficiência de métodos baseados em correções (DGNSS) ou diferenciação de observáveis assumindo alta correlação de erros (posicionamento relativo), além de exigir alta taxa de transferência de dados.

Desta forma, o PPP em tempo real se mostra uma solução de grande potencial, uma vez que o posicionamento realizado é autônomo e independe de estações de referência (exceto para a geração de parâmetros como as efemérides precisas em tempo real). A transmissão das efemérides precisas e demais parâmetros pode ser realizada via protocolo NTRIP (comunicação por internet) ou satélite geoestacionário (comunicação por onda de rádio).

No caso do Brasil, o IBGE passou a fornecer um serviço gratuito de PPP em tempo real, sendo que já fornecia serviços DGNSS e RTK em tempo real. Para isto, o IBGE tem acesso às efemérides precisas em tempo real produzidas pelo IGS, previstas com base em uma rede mundial de monitoramento em tempo real com centenas de estações, incluindo algumas da RBMC.

Para realizar o PPP em tempo real, com precisão decimétrica, é necessário o cadastro gratuito de acesso ao servidor NTRIP *Caster* do IBGE (Figura 3.7), que também possibilita o posicionamento DGPS e RTK em tempo real via internet com base nas dezenas de estações de monitoramento em tempo real da RBMC. Para mais detalhes, acessar a página do IBGE-PPP, e também ver: http://mundogeoconnect.com/2013/arquivos/palestras/19_jun-i-sonia-alves.pdf.

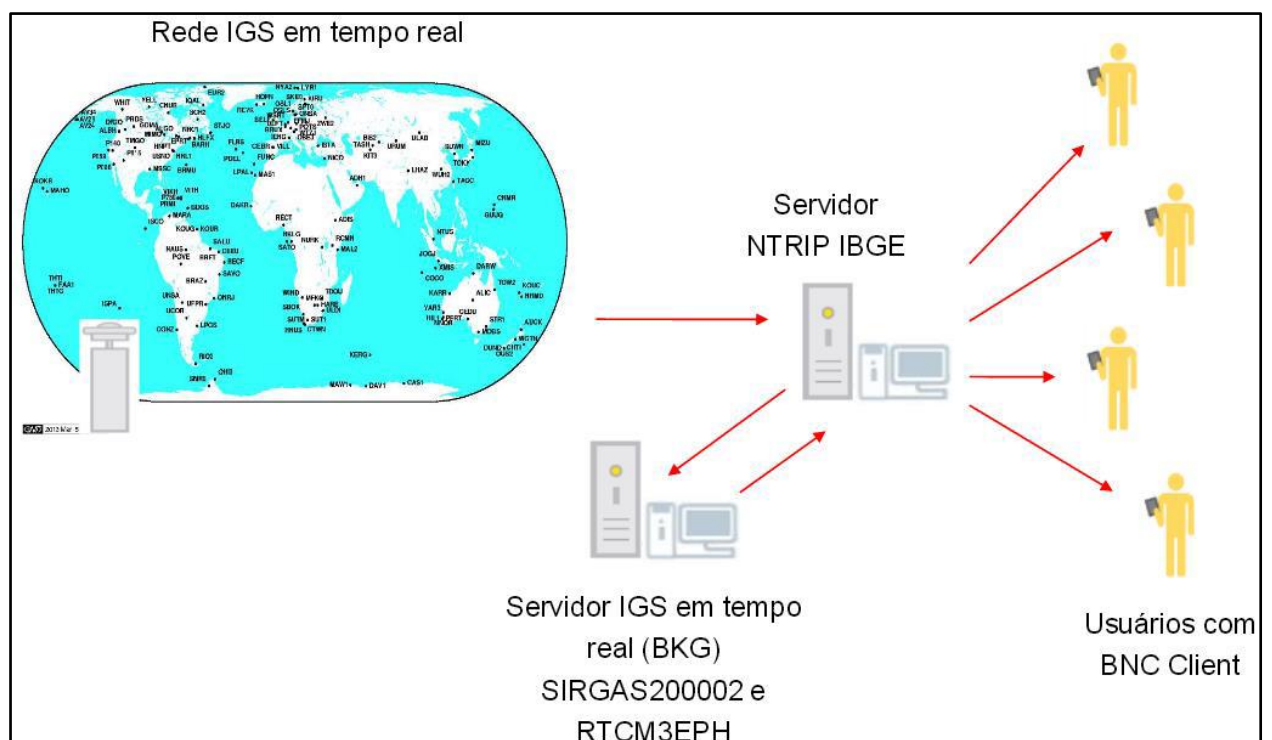


Figura 3.7 – Funcionamento do serviço de PPP em tempo real do IBGE.

Ainda no contexto nacional, na referida Tese de Marques (2012), é desenvolvido e apresentado um *software* de processamento PPP em tempo real, somente para dados GPS. É importante ressaltar que a solução das ambiguidades em tempo real no PPP é um dos maiores desafios atuais no posicionamento GNSS. Em geral, a solução adotada é a solução flutuante, o que resulta em uma precisão decimétrica no posicionamento. A Tabela 3.1 apresenta um resumo do PPP.

Tabela 3.1 – Resumo do método de posicionamento por ponto preciso (PPP).

Observáveis utilizadas:	Pseudodistância ou fase da onda portadora (<i>ion-free</i> para receptores de dupla ou tripla frequência)
Erros corrigidos:	Relatividade, rotação da Terra e erro do relógio dos satélites
Erros parcialmente corrigidos:	-
Erros minimizados:	Erro orbital (efemérides precisas)
Erros estimados:	Erro do relógio do receptor + outros (variável em função do serviço utilizado)
Erros eliminados/cancelados:	Nenhum
Erros negligenciados:	Variável em função do serviço utilizado
Precisão esperada:	De poucos mm (estático pós-processado de longa duração) até alguns dm (cinemático em tempo real)
Finalidade:	Posicionamento estático de alta precisão, posicionamento de aeronaves

4. POSICIONAMENTO RELATIVO (PR)

Para realizar o posicionamento relativo (PR), o usuário deve dispor de dois ou mais receptores GNSS. No entanto, com o advento dos chamados Sistemas de Controle Ativos (SCA), essa realidade mudou, como por exemplo, a RBMC. Desta forma, atualmente, possuindo apenas um receptor, pode-se realizar o PR. Para isto, deve-se acessar os dados de uma ou mais estações pertencentes a um SCA, como por exemplo, acessar os dados da RBMC, cuja disponibilidade é gratuita e diária no site do IBGE (arquivos de 24h de rastreo e taxa de armazenamento de 15s).

No contexto do posicionamento relativo, utilizam-se, em geral, as Duplas Diferenças (DD) como observáveis GNSS fundamentais, podendo ser a DD da fase da onda portadora e/ou a DD das pseudodistâncias. Os resultados são as componentes da linha-base, ou seja, as distâncias relativas (ΔX , ΔY , ΔZ) entre os dois receptores (Figura 4.1), em relação a um referencial cartesiano geocêntrico (no caso do GPS, por exemplo, o WGS-84 G1762). O posicionamento relativo é comumente subdividido em: PR estático, PR estático-rápido, PR semi-cinemático e PR cinemático.

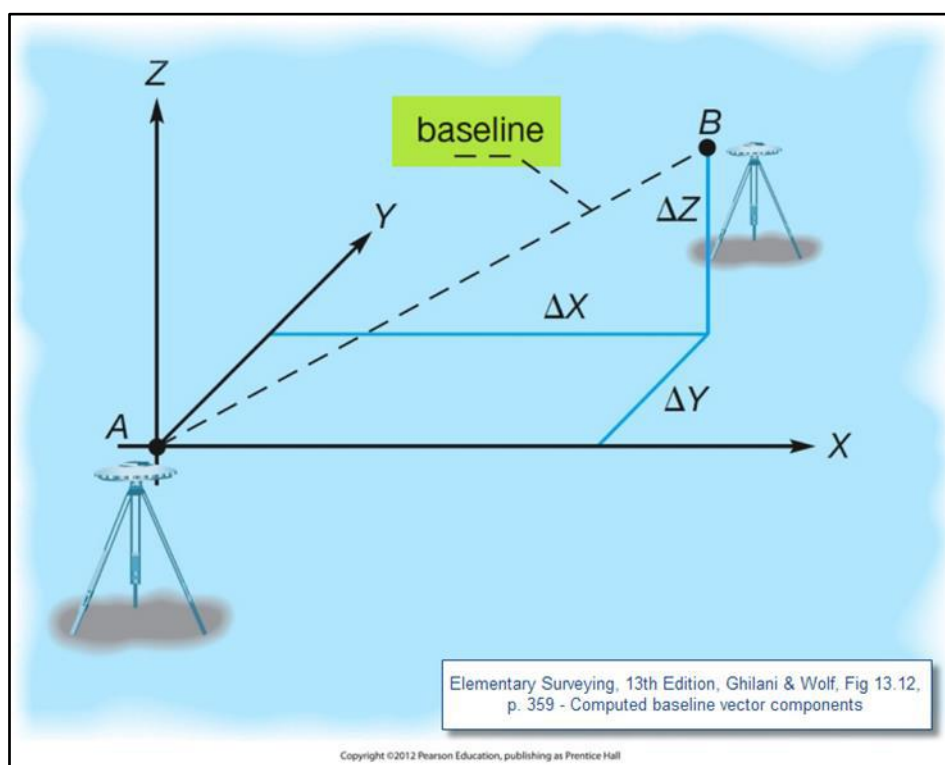


Figura 4.1 – Conceito de posicionamento relativo: Componentes da linha-base entre dois receptores GNSS.

O princípio fundamental do posicionamento relativo é que os dois ou mais receptores envolvidos rastreiem, simultaneamente, pelo menos dois satélites GNSS comuns, ou seja, que ocorra a simultaneidade das observações. Quando se realizam diferenças entre observáveis coletadas simultaneamente, objetiva-se, sobretudo, reduzir alguns tipos de erros. Deve-se então escolher a simultaneidade entre dois instantes: o de recepção do sinal ou o de transmissão do sinal. Sinais que são recebidos no mesmo instante são transmitidos em instantes diferentes, e sinais que são transmitidos no mesmo instante são recebidos em instantes diferentes. Isso só não ocorreria se as distâncias entre os receptores e os satélites fossem exatamente iguais, possibilidade extremamente remota na prática.

Um dos problemas para se determinar com exatidão a simultaneidade são os erros dos relógios dos receptores envolvidos (dt_r), que, em geral, são diferentes. Desta forma, utiliza-se normalmente um pré-processamento por meio do SPP para determinar o erro do relógio dos receptores envolvidos no PR, e assim, melhorar a determinação da simultaneidade entre as observações dos diferentes receptores envolvidos. No caso do instante de recepção do sinal ser escolhido, deve-se considerar que o instante de transmissão do sinal para os receptores é diferente, e, portanto, as coordenadas do satélite também são diferentes, enquanto no instante de transmissão do sinal, as coordenadas do satélite são iguais, embora os instantes de recepção do sinal sejam diferentes nos dois receptores. Desta forma, geralmente, é adotado o instante de transmissão do sinal, devido ao fato das coordenadas do satélite não se alterarem.

4.1. PR estático

Neste tipo de PR, dois ou mais receptores rastreiam simultaneamente, em modo estático (Figura 4.2), os satélites visíveis por um período de tempo de no mínimo 20 minutos, podendo se estender até dezenas de horas.

A fase da onda portadora e a pseudodistância são as observáveis GNSS fundamentais. Entretanto, elas podem ser rearranjadas em uma combinação linear envolvendo observáveis GNSS do mesmo receptor ou de diferentes receptores, como exemplo já visto, cita-se a observável *ion-free* em um mesmo receptor.

Dentre as diversas combinações lineares possíveis envolvendo observáveis de diferentes receptores, uma das mais utilizadas no PR é a observável denominada dupla diferença (DD), que é obtida pela diferenciação entre duas simples diferenças (SD). Uma SD pode ser obtida entre um satélite e dois receptores (Figura 4.3) ou entre dois

satélites e um receptor, uma DD pode ser obtida entre dois satélites e dois receptores (Figura 4.4), enquanto uma tripla diferença (TD) pode ser obtida entre dois satélites e dois receptores em duas épocas diferentes (Figura 4.5).

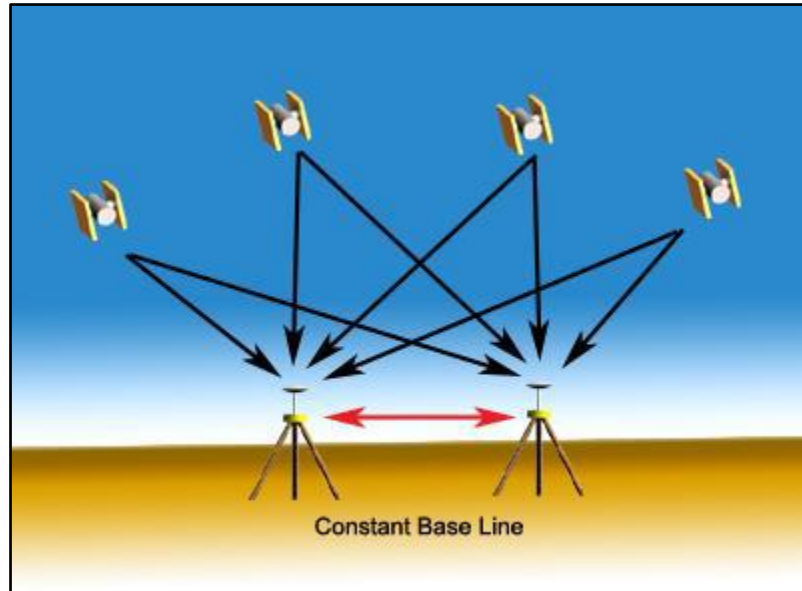


Figura 4.2 – Conceito de PR estático.

As diferenças realizadas entre as observáveis originais, isto é, fase da onda portadora e/ou pseudodistância do código, têm o objetivo de minimizar e eliminar determinados erros sistemáticos envolvidos no posicionamento. Os erros do relógio dos satélites são eliminados na formação das simples diferenças, pois o erro do relógio do satélite é o mesmo para os dois receptores, e os erros dos relógios dos receptores são eliminados na formação da dupla diferença, pois o erro do relógio de um receptor é o mesmo no rastreamento de cada satélite.

Além disso, erros devido a órbita dos satélites e as refrações troposférica e ionosférica são minimizados, em especial para linhas-bases curtas. As DD são formadas para cada época de observação, para um mesmo instante de transmissão do sinal do satélite. Por exemplo, se a taxa de coleta de dados do rastreamento GNSS for de 15 em 15 segundos, serão formadas DDs a cada 15s.

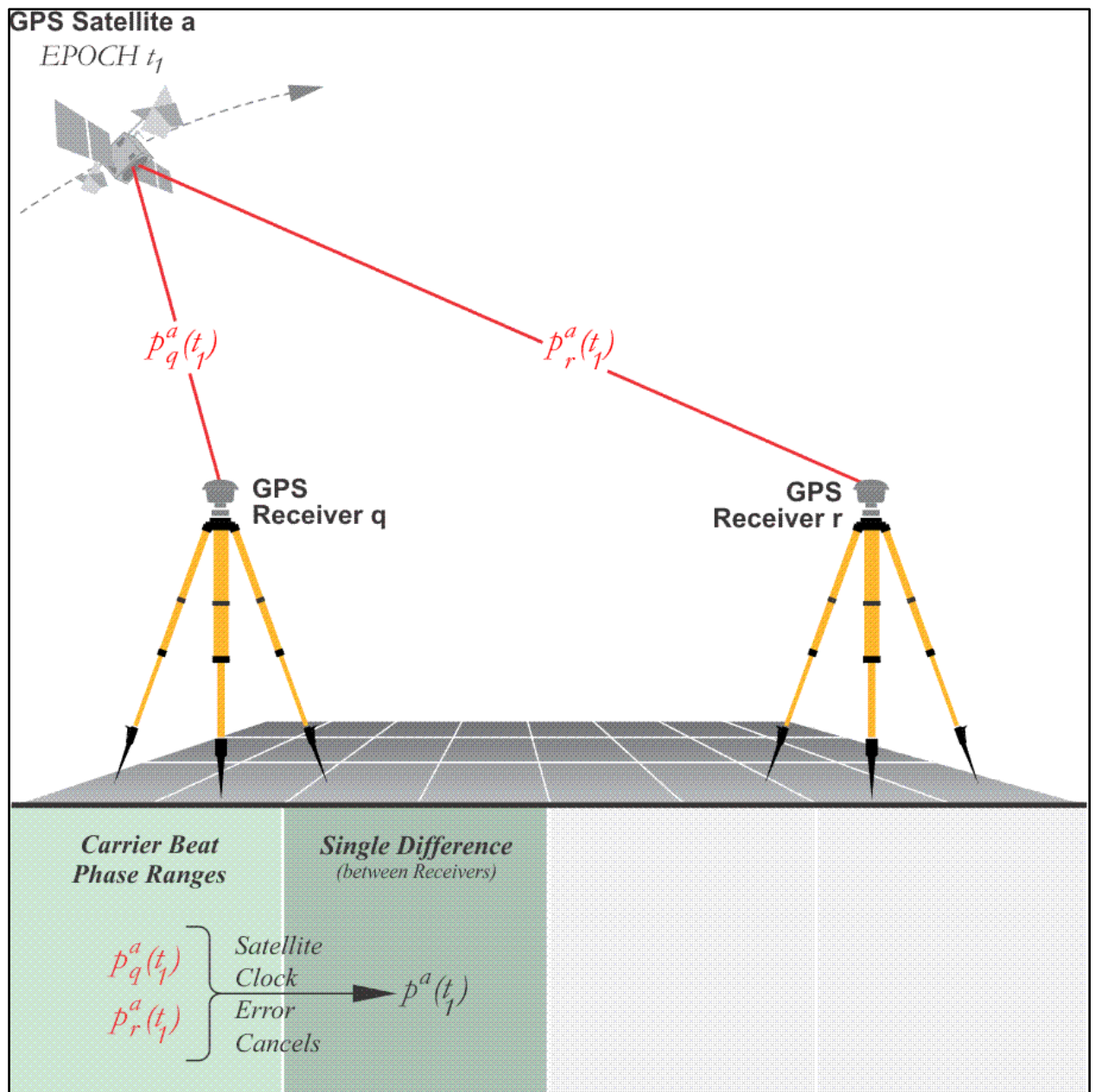


Figura 4.3 – Formação da SD da fase da portadora de um satélite (a) em dois receptores GNSS (q e r).

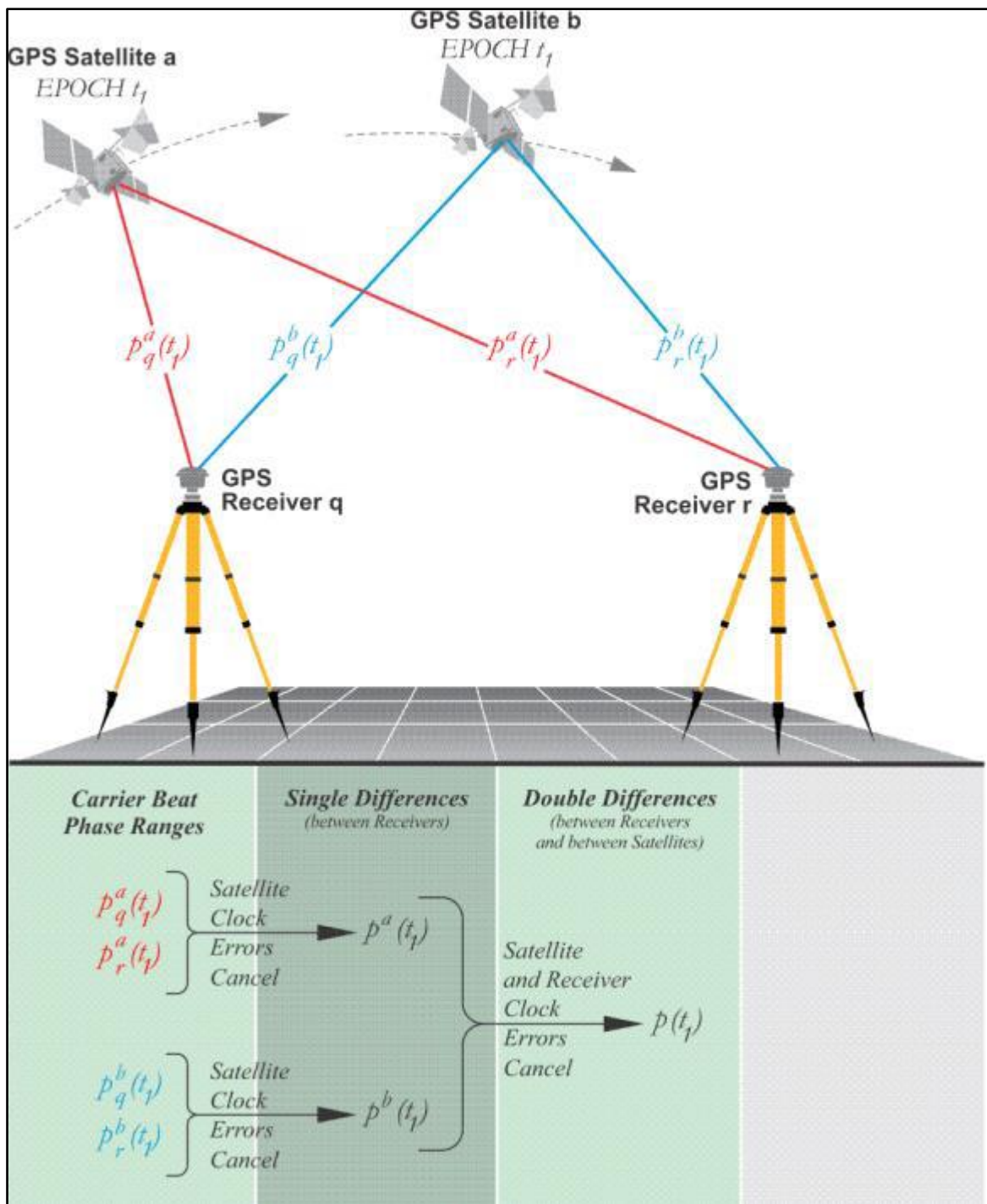


Figura 4.4 – Formação da DD da fase da portadora entre dois satélites (a e b) e dois receptores GNSS (q e r).

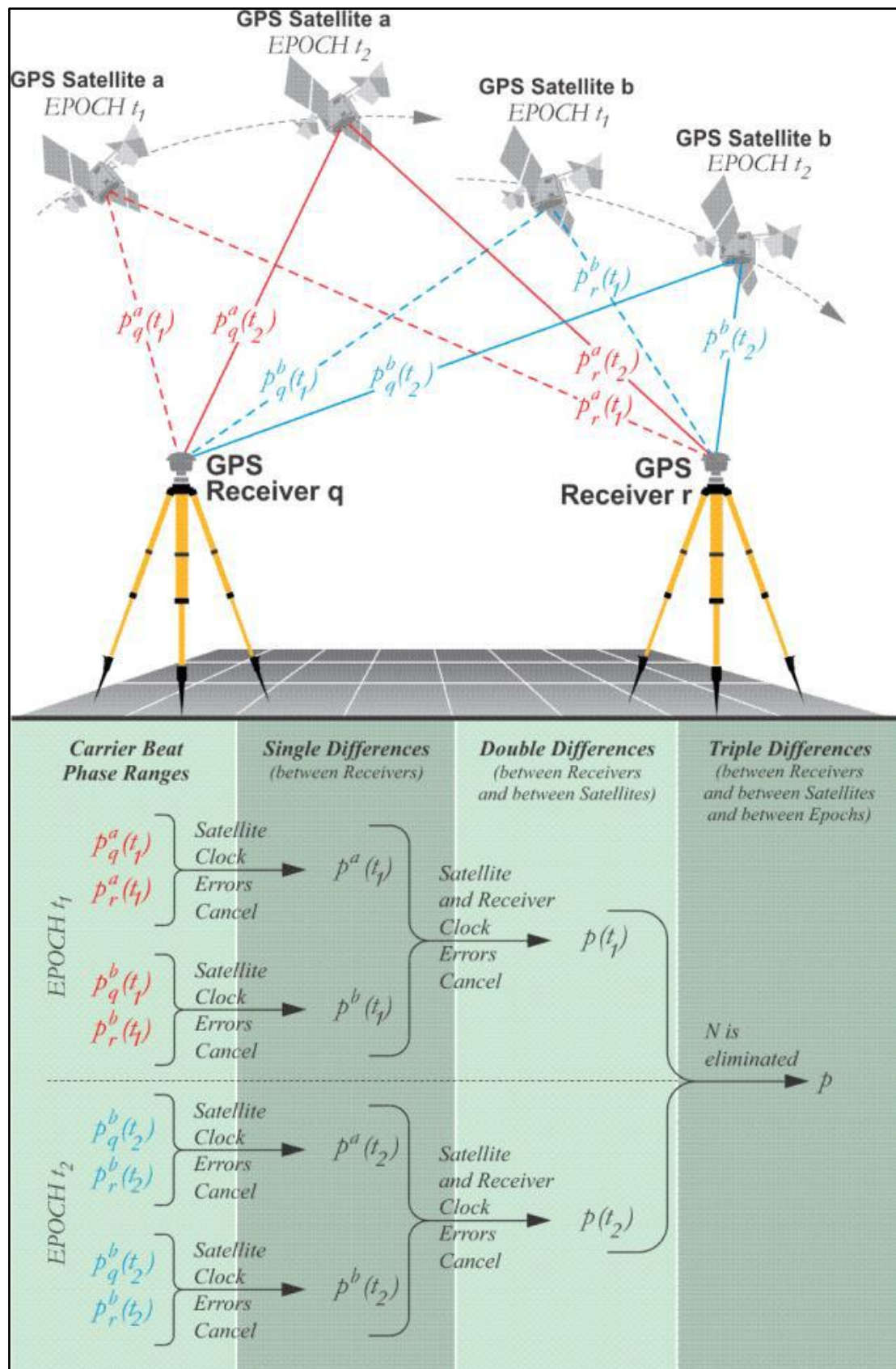


Figura 4.5 – Formação da TD entre a fase da portadora de dois satélites (a e b) e dois receptores GNSS (q e r) em duas épocas diferentes de rastreio (t_1 e t_2).

Para dois satélites $s1$ e $s2$ e dois receptores de dupla frequência $r1$ e $r2$, a fase da onda portadora *ion-free*, as simples diferenças entre os dois receptores e cada satélite e a dupla diferença entre os dois receptores e os dois satélites para as fases da portadora *ion-free*, são dadas por:

$$\varphi_{IFr1}^{s1} = \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r1}^{s1} - \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r1}^{s1}, \quad \varphi_{IFr1}^{s2} = \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r1}^{s2} - \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r1}^{s2}$$

$$\varphi_{IFr2}^{s1} = \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r2}^{s1} - \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r2}^{s1}, \quad \varphi_{IFr2}^{s2} = \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r2}^{s2} - \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r2}^{s2}$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s1} &= \varphi_{IFr1}^{s1} - \varphi_{IFr2}^{s1} \\ &= \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r1}^{s1} - \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r1}^{s1} - \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r2}^{s1} + \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r2}^{s1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s2} &= \varphi_{IFr1}^{s2} - \varphi_{IFr2}^{s2} \\ &= \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r1}^{s2} - \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r1}^{s2} - \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r2}^{s2} + \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r2}^{s2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\nabla\varphi_{IFr1,r2}^{s1,s2} &= \Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s1} - \Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s2} \\ &= \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r1}^{s1} - \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r1}^{s1} - \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r2}^{s1} + \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r2}^{s1} \\ &\quad - \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r1}^{s2} + \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r1}^{s2} + \left[\frac{f_{L1}^2}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L1r2}^{s2} - \left[\frac{f_{L1} \cdot f_{L2}}{(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} \right] \varphi_{L2r2}^{s2} \end{aligned}$$

onde nas expressões acima, φ_{IFri}^{sj} é a fase da portadora *ion-free* para o receptor i ($i = 1$ ou 2) e o satélite j ($j = 1$ ou 2), f_{L1} e f_{L2} são, respectivamente, as frequências das portadoras L1 e L2, $\Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s1}$ e $\Delta\varphi_{IFr1,r2}^{s2}$ são, respectivamente, a simples diferença da fase da portadora *ion-free* para os receptores $r1$ e $r2$ e o satélite $s1$ e para os receptores $r1$ e $r2$ e o satélite $s2$, e $\Delta\nabla\varphi_{IFr1,r2}^{s1,s2}$ é a dupla diferença da fase da portadora *ion-free* para os receptores $r1$ e $r2$ e os satélites $s1$ e $s2$ em um mesmo instante de transmissão do sinal.

Geralmente, um satélite é considerado como satélite de referência, e as DDs são formadas levando-se em conta observáveis deste com os demais satélites, pois as equações devem ser linearmente independentes entre si. Ou seja, para n satélites visíveis, comuns aos dois receptores, tem-se $n-1$ DDs linearmente independentes para cada

época de observação. Na prática, a modelagem estocástica das observações geralmente é simplificada, desconsiderando a correlação entre as observações de diferentes épocas, resultando em uma matriz de covariância diagonal no ajustamento.

O referencial do posicionamento, WGS-84 G1762 no caso das efemérides transmitidas do GPS, por exemplo, está implícito nas coordenadas dos satélites, podendo as duas estações ter as suas coordenadas estimadas no ajustamento, ou uma delas ser considerada fixa (estação base), facilitando o processo computacional.

A observável normalmente adotada no PR estático é a DD da fase da onda portadora, muito embora se possa utilizar também a DD da pseudodistância, ou ainda ambas, sendo que os casos em que se empregam as duas observáveis proporcionam melhores resultados em termos de acurácia. Além disso, em razão da duração da coleta de dados ser relativamente longa (maior que 20 minutos), o vetor das ambiguidades, exceto por alguns problemas não esperados, é facilmente solucionado, devido à grande alteração da geometria dos satélites.

O PR estático permite obter precisão da ordem de 1 ppm, ou até melhor do que isso. No entanto, para linhas-base longas, isto é, maiores que 20 km, se a precisão requerida for melhor que 1 ppm, é imprescindível o uso de receptores de dupla ou tripla frequência, devido, principalmente, ao erro da ionosfera. No caso de linhas-base muito longas e receptores de dupla ou tripla frequência, por causa da alta variação do erro devido a ionosfera, também se utiliza as DDs, porém, não da fase da onda portadora, mas sim, a DD da observável *ion-free* (L0), que já é uma combinação linear da fase da onda nas portadoras L1 e L2 (ou L1 e L5 ou L2 e L5).

Existe ainda uma terceira combinação linear possível denominada de tripla diferença (TD). Na tripla diferença é realizada a diferença entre duas DD de duas épocas, envolvendo dois receptores e dois satélites. A tripla diferença da pseudodistância não oferece vantagens sobre outras combinações lineares de pseudodistâncias (*ion-free*, SD, DD e etc.). A tripla diferença da fase da onda portadora elimina o vetor de ambiguidades (N), pois, contanto que não ocorra perda de sinal, N é constante para duas épocas de rastreo diferentes, o que representa uma grande vantagem em relação a DD. Entretanto, geralmente ela não é utilizada pois o ruído resultante (desvio-padrão) da TD se torna bem maior, além de introduzir correlação (covariância) temporal entre as várias TD de épocas distintas, sendo muito difícil de modelar estocasticamente, ou seja, definir de maneira adequada a matriz de covariância das observações no ajustamento.

De qualquer forma, como esta observável é sensível a perdas de ciclos, por causa do vetor de ambiguidades, ela é muito utilizada na detecção das perdas de ciclos na etapa de pré-processamento dos dados (Figura 4.6).

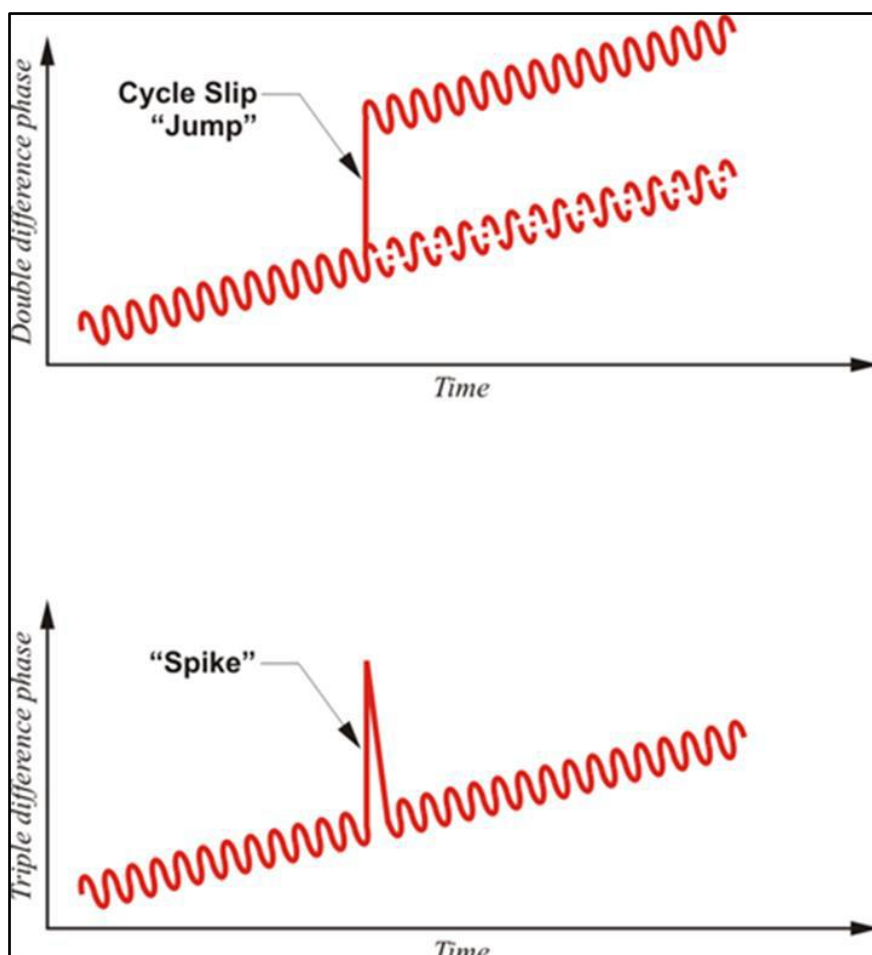


Figura 4.6 – Falha na detecção da perda de ciclos (sinal) utilizando a DD e sucesso utilizando a TD.

A Tabela 4.1 apresenta as possibilidades de formação de DD para os diferentes tipos de receptores GPS. Para os demais sistemas GNSS, a relação é análoga.

Tabela 4.1 – Possibilidades de formação de DDs para os diferentes tipos de receptores GPS.

	DDs Pseudodistâncias	DDs Fase da portadora
Navegação	C/A, P(Y) em L1, L1C, M em L1	-
Simples frequência	C/A, P(Y) em L1, L1C, M em L1	L1
Dupla frequência	C/A, P(Y) em L1 e L2, L1C, L2C, M em L1 e L2, <i>ion-free</i> (diversos)	L1, L2, <i>ion-free</i> (L1/L2)
Tripla frequência	C/A, P(Y) em L1 e L2, L1C, L2C, M em L1 e L2, I5, Q5, <i>ion-free</i> (diversos)	L1, L2, L5, <i>ion-free</i> (L1/L2; L1/L5; L2/L5; L1/L2/L5)

4.2. PR estático-rápido

O PR estático-rápido segue o mesmo princípio do PR estático. A diferença fundamental diz respeito ao período de ocupação da estação de interesse que não deve exceder 20 minutos. Um receptor serve como base, permanecendo fixo sobre uma estação de referência e coletando dados, enquanto o outro receptor percorre as estações de interesse (receptor móvel ou *rover*), sendo que em cada uma das quais este permanece rastreando dados GNSS entre 5 a 20 minutos (Figura 4.7).

Para que os resultados apresentem alto nível de precisão, o vetor de ambiguidades (N) envolvido em cada linha-base deve ter seus elementos solucionados como valores inteiros, sendo que para cada linha-base, não havendo perdas de ciclo (sinal), tem-se $n - 1$ ambiguidades, sendo n o número de satélites em comum rastreados pelos dois receptores. Devido ao pouco tempo de ocupação, que impossibilita uma grande mudança da geometria dos satélites, uma técnica especial de solução rápida da ambiguidade deve ser empregada, como por exemplo, uma técnica OTF (*on the fly*), que será vista no capítulo 8.

O PR estático-rápido é adequado para levantamentos de linhas-base de até 10 km, e sob circunstâncias normais, sua precisão varia de 1 a 5 ppm. Normalmente, se adota o valor de 5s como taxa de coleta de dados do PR estático-rápido, enquanto no PR estático a taxa de coleta de dados é usualmente de 15s.

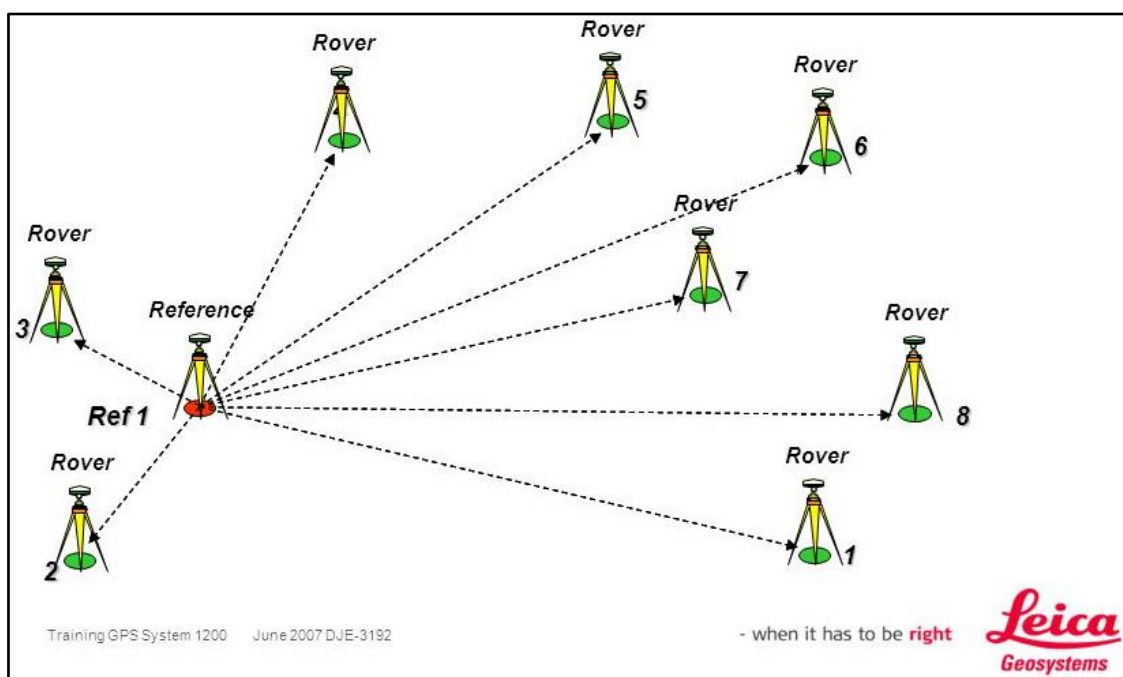


Figura 4.7 – Conceito do PR estático rápido.

4.3. PR semi-cinemático (*stop and go*)

O PR semi-cinemático também se baseia no fato de que a solução do vetor de ambiguidades de uma linha-base a determinar requer que a geometria envolvida entre as duas estações e os satélites se altere com passar do tempo. Para tanto, coletam-se dados continuamente na estação-base e por, pelo menos, dois curtos períodos (por exemplo, 5 minutos) em cada estação que se pretende determinar as coordenadas. As duas ocupações em uma mesma estação a se determinar devem estar separadas por um intervalo de tempo longo o suficiente (no mínimo 20 minutos) para proporcionar a alteração na geometria dos satélites e permitir a solução das ambiguidades.

Durante esse intervalo, outras estações a se determinar podem ser ocupadas por um período de tempo relativamente curto, como por exemplo, cinco minutos (Figura 4.8). Entretanto, o método requer que o receptor móvel continue ligado na trajetória entre os diversos pontos de interesse. Além disso, não se pode perder a sintonia com o sinal dos satélites, pois, conforme já visto, cada perda de ciclo gera uma nova ambiguidade a ser solucionada.

Uma outra forma de realizar o PR semi-cinemático é um receptor ocupar um ponto de coordenadas conhecidas durante todo o levantamento (base), e o receptor móvel primeiramente ocupar por um longo período (20 a 30 minutos) o primeiro ponto a se determinar, visando solucionar o vetor das ambiguidades. Após isto, sem desligar o receptor móvel, se desloca aos demais pontos de interesse (Figura 4.9), ocupando cada um de forma rápida, sendo este método denominado de *stop and go* (“para e vai” ou “parar e ir”).

Em outra possibilidade, empregada atualmente pelos receptores GNSS modernos, o usuário não precisa aguardar no primeiro ponto desconhecido para a solução das ambiguidades. Inicia-se o levantamento ocupando os pontos de interesse por poucos segundos, mas de forma que a duração total do levantamento, sem ocorrência de perdas de sinal, atinja algo em torno de 20 minutos, para posteriormente, utilizar algum método de solução rápida das ambiguidades. O nível de precisão é da mesma ordem que o do PR estático-rápido, de 1 a 5 ppm.

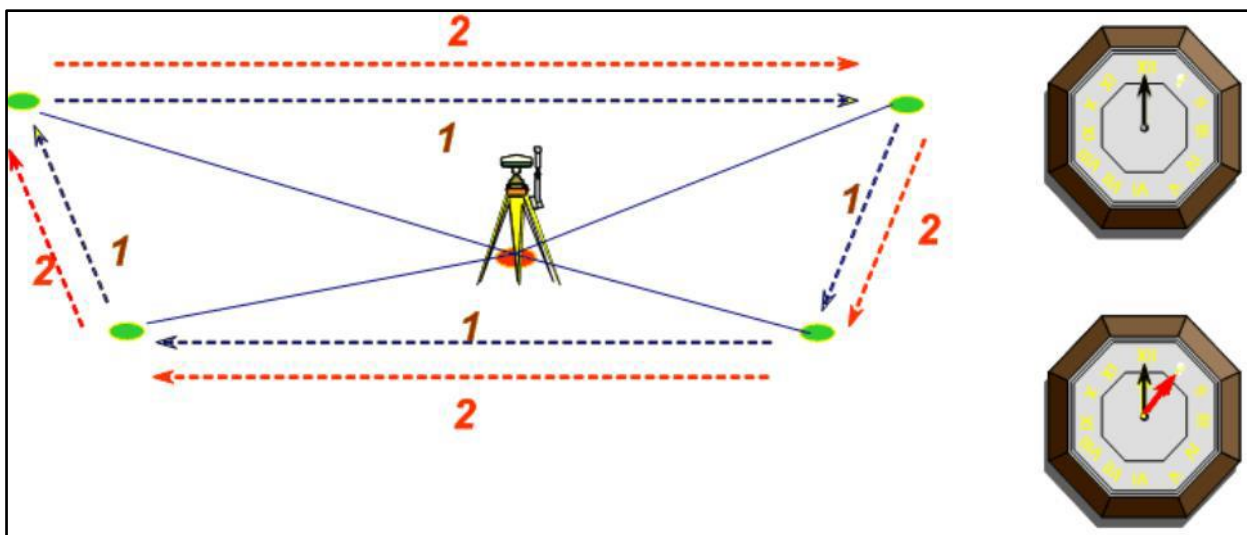


Figura 4.8 – Conceito do PR semi-cinemático com reocupação dos vértices.

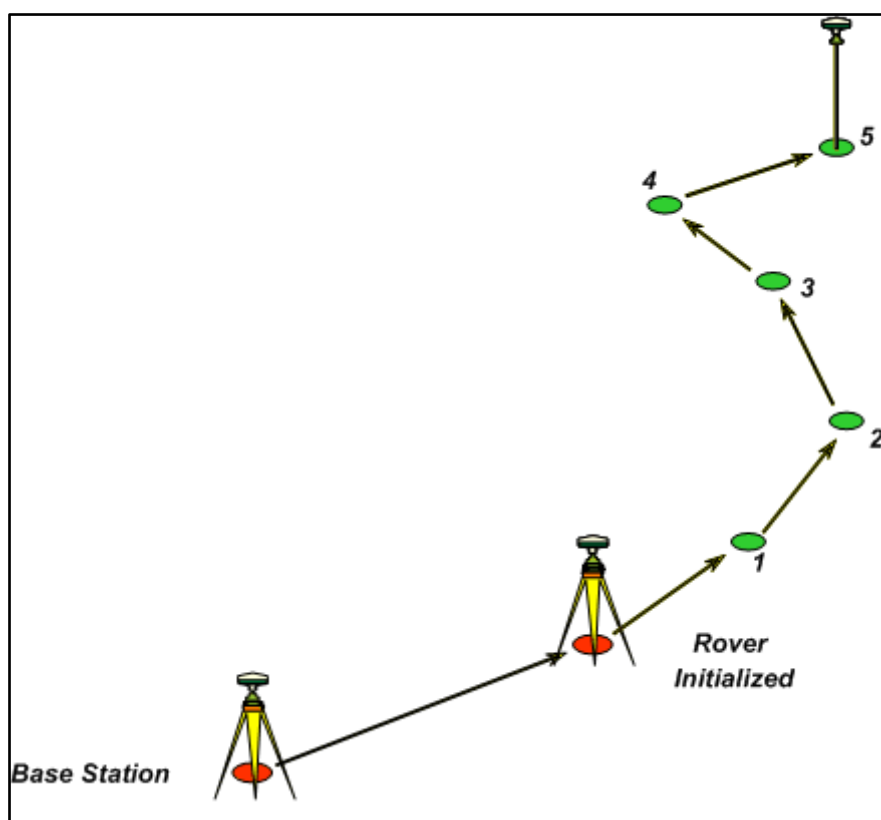


Figura 4.9 – Conceito do método de PR stop and go.

4.4. PR cinemático

No PR cinemático tem-se como observável fundamental a fase da onda portadora, com, em geral, taxa de coleta de 1s ou menos. Os dados desse tipo de posicionamento podem ser pós-processados ou processados em tempo real. Assim como nos outros métodos de PR, um receptor ocupa um ponto de coordenadas conhecidas

(estação base). O outro receptor (móvel ou *rover*) se desloca continuamente, de forma cinemática, sobre as feições de interesse. No modo pós-processado, após a coleta dos dados GNSS, o processamento é realizado em algum *software* específico.

Quanto a solução do vetor das ambiguidades, há duas opções: solucionar antes de iniciar o movimento ou estimá-lo com os dados coletados em movimento. No primeiro caso, deve-se ficar em um ponto até que a ambiguidade seja solucionada. Logo, deve-se esperar algo em torno de 20 a 30 minutos para a geometria dos satélites mudar o suficiente para a solução das ambiguidades, ou, ainda, utilizar algum método de solução rápida de ambiguidades, dependendo de quão moderno é o receptor ou *software* de processamento utilizado.

No segundo caso, se não houver perda de sintonia com os satélites, o vetor de ambiguidades permanece o mesmo durante todo o levantamento. Se todo o levantamento durar em torno de 20 a 30 minutos, sem perdas de sinal, é possível solucionar o vetor de ambiguidades. Ressalva-se que isto depende do receptor que está sendo utilizado, o manual do equipamento deve informar os métodos possíveis para solucionar as ambiguidades.

No PR cinemático, toda a trajetória da antena do receptor móvel é determinada, ou seja, em cada época de rastreamento se considera um ponto diferente, mesmo se o receptor móvel permanecer estático durante alguns segundos. O receptor base, como nos demais métodos de PR, permanece estático durante todo o levantamento no ponto de coordenadas conhecidas.

É importante ressaltar que muitas aplicações requerem coordenadas do receptor móvel em tempo real e com alta precisão, como por exemplo, na locação, monitoramento e controle de obras, realizações de *as built* e agricultura de precisão. Para que esse conceito seja realizado na prática, é necessário que os dados coletados na estação de referência (base) sejam transmitidos para a estação móvel (Figura 4.10), necessitando de um *link* de rádio ou algum outro tipo de comunicação (celular, internet e etc.). Desta forma, é necessário o uso de receptores RTK com transmissão dos dados brutos da base (observáveis GNSS originais) no formato RTCM 18/19.

Ressalta-se que devido a rápida solução das ambiguidades, receptores RTK podem empregar o método *stop and go* com rastreamento de alguns segundos ao invés de minutos em cada ponto, não sendo restritos ao posicionamento cinemático em tempo real. Nestes casos, pode-se combinar as soluções de diferentes épocas de rastreamento em uma única solução (interpolação ou época combinada), ao contrário do posicionamento

cinemático, quando muitas vezes ocorre uma extrapolação dos dados da base da época anterior, dependendo da latência (taxa de transferência de dados). Além disso, com o acesso aos dados de estações GNSS ativas por meio do protocolo NTRIP (via internet), uma estratégia interessante é tornar o par de receptores RTK (base e *rover*) em dois *rovers*, aumentando a produtividade.

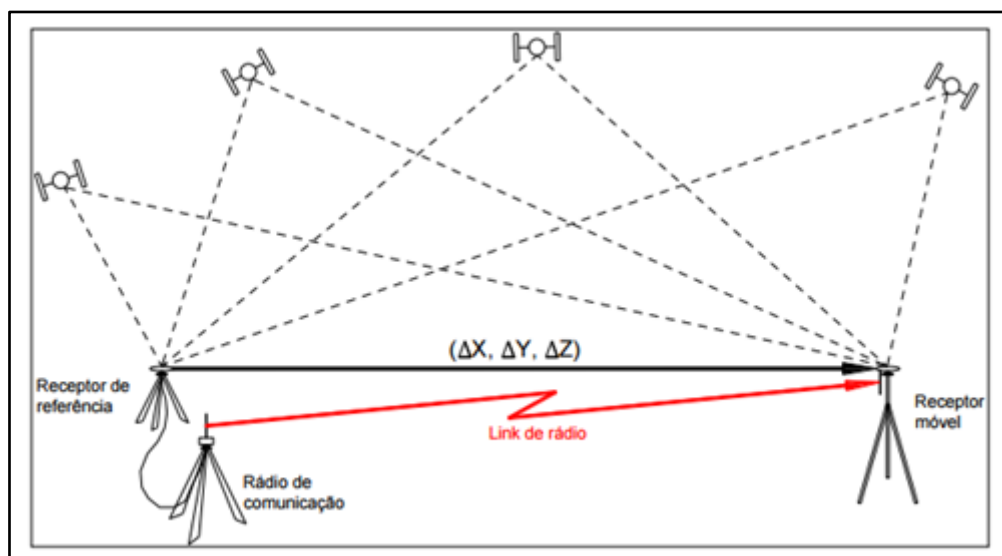


Figura 4.10 – PR cinemático em tempo real (RTK).

4.5. Serviços gratuitos de posicionamento relativo *on-line*

Nos últimos anos, foram disponibilizados serviços gratuitos de posicionamento relativo *on-line*. Tal como os serviços PPP, para utilizar estes serviços, basta submeter arquivos de observação no formato RINEX e informar um endereço de e-mail para receber os resultados. Dentre estes serviços, pode-se citar o AUSPOS, do governo australiano, que utiliza o *software* científico *Bernese* (<http://www.ga.gov.au/bin/gps.pl>), o OPUS (*Online Positioning User Service*), do *National Geodetic Survey* dos EUA (<http://www.ngs.noaa.gov/OPUS/>), e o SCOUT (*Scripps Coordinate Update Tool*) da Universidade de Califórnia, que utiliza o *software* científico GAMIT (<http://sopac.ucsd.edu/scout.shtml>). Em geral, estes serviços apresentam o resultado em algum ITRF (por exemplo, ITRF2008). Por serem gratuitos, apresentam algumas limitações, como processar apenas dados GPS de dupla frequência no modo estático, utilizar apenas estações da rede do IGS como bases de referência, e não permitir alterações na estratégia de processamento por parte do usuário. Encerrando este capítulo, a Tabela 4.2 apresenta um resumo do método de posicionamento relativo (PR).

Tabela 4.2 – Resumo do método de posicionamento relativo (PR).

Observáveis utilizadas:	Simplex, duplas ou triplas diferenças
Erros corrigidos:	Relatividade, rotação da Terra
Erros parcialmente corrigidos:	-
Erros minimizados:	Refração troposférica e ionosférica, erro orbital, variação do centro de fase da antena, fase <i>wind-up</i>
Erros estimados:	-
Erros eliminados/cancelados:	Erro do relógio do satélite, erro do relógio do receptor
Erros negligenciados:	Multicaminho
Precisão esperada:	Centímetros ou milímetros
Finalidade:	Posicionamento de alta precisão (pós-processado ou em tempo-real)

5. SOLUÇÃO DAS AMBIGUIDADES

Conforme já visto, ao invés de utilizar pseudodistâncias obtidas por códigos binários modulados sobre as ondas portadoras, as distâncias entre o satélite e o receptor podem ser obtidas diretamente a partir das próprias ondas portadoras. Esse tipo de observação, dada em ciclos de onda, é chamado de fase da onda portadora.

A fase da onda portadora é uma observável muito mais precisa (precisão de poucos milímetros) do que a pseudodistância (precisão de decímetros), e trata-se da observável básica para atividades que exigem posicionamento de alta precisão. A medida da fase da portadora é obtida pela diferença entre a fase do sinal recebida do satélite e a sua réplica gerada pelo receptor. Ao iniciar o receptor GNSS, na primeira medida efetuada, a observável da fase da portadora é a parte fracional de um ciclo de onda. Não se conhece nesta primeira época de observação, o número de ciclos inteiros entre o satélite (s) e a antena receptora (r), denominado de ambiguidade (N).

A partir da primeira época, o receptor consegue realizar a contagem dos ciclos inteiros de onda que chegam do satélite até a antena receptora (Figura 5.1). Isto faz com que a medida da fase da onda portadora seja ambígua com relação ao número de ciclos inteiros envolvidos entre a antena receptora e os satélites na primeira época de observação, isto é, na primeira medida realizada logo após iniciar o receptor GNSS. Quando a ambiguidade é solucionada corretamente, isto é, o número de ciclos inteiros da primeira época de observação é determinado corretamente para todos os satélites rastreados, o posicionamento resultante é de alta precisão.

No PR utilizando a fase da onda portadora, o vetor de ambiguidades N será composto por $n \cdot r$ termos, sendo n o número de satélites em comum aos r receptores envolvidos no PR (geralmente, $r=2$). Na formação das DDs, a dimensão do vetor de ambiguidades N será reduzida para $n - 1$ elementos. Quando houver perda de sinal de um satélite, um novo termo é adicionado a este vetor de ambiguidades N para cada satélite/receptor envolvido nesta perda de sinal. No posicionamento por ponto preciso (PPP) e no método DGPS preciso utilizando a fase da onda portadora, o vetor de ambiguidades será composto por n termos, sendo n o número de satélites visíveis. Novamente, caso ocorrer perda do sinal de um satélite, um novo termo é adicionado ao vetor de ambiguidades N .

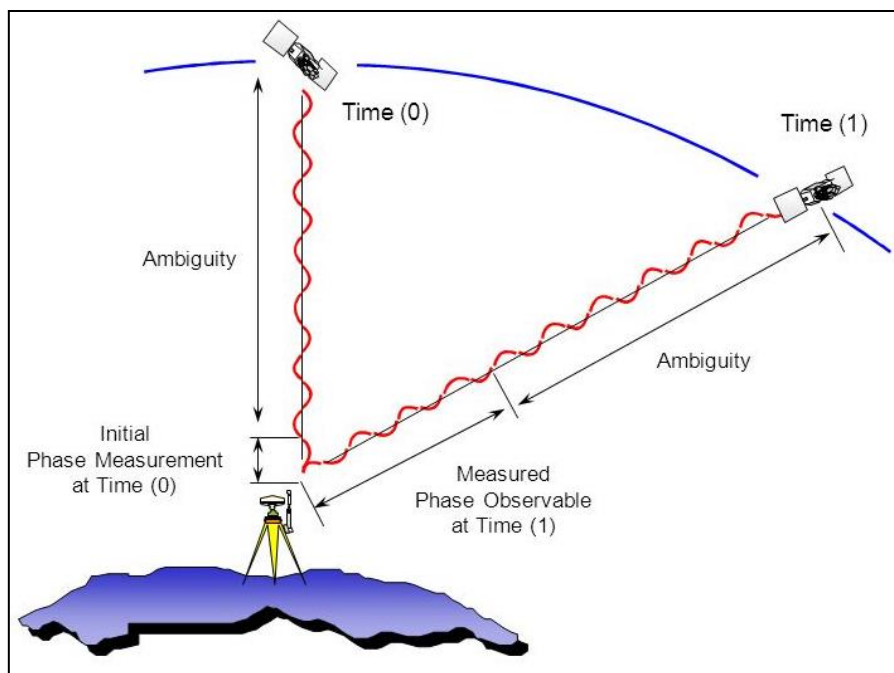


Figura 5.1 – Ambiguidade da fase da onda portadora na primeira época de observação.

O vetor de ambiguidades é, teoricamente, composto por números inteiros. No entanto, no contexto do ajustamento de observações, ele será estimado como um vetor de números reais, associado a uma respectiva MVC (matriz de variância e covariância). Essa solução obtida pelo ajustamento convencional com números reais é chamada de solução flutuante (*float*). A solução das ambiguidades como um vetor composto de números inteiros, denominada de solução fixa (*fixed*), constitui um dos problemas mais pesquisados na área do posicionamento GNSS. Esse processo é denominado de solução da ambiguidade.

Conforme visto, o tempo de coleta (rastreamento de dados) é algo fundamental para a solução das ambiguidades, devido a alteração na geometria dos satélites. Porém, existem técnicas de solução quase instantânea das ambiguidades (técnicas *on the fly*), como por exemplo, o método LAMBDA. A solução do vetor de ambiguidades (N) envolve basicamente três passos:

- 1) No primeiro passo, estima-se a solução no espaço dos números reais, que com a sua respectiva MVC, permite construir um espaço de procura (solução flutuante);

- 2) No segundo passo, a partir do espaço de procura, o vetor de ambiguidades correto deve ser identificado, ou seja, deve ser encontrado os valores inteiros. Nessa etapa é feita a validação ou não da solução inteira obtida (solução fixa);
- 3) No terceiro passo, caso o vetor N for solucionado e validado como inteiro, o ajustamento é realizado novamente, com a introdução das ambiguidades solucionadas (solução fixa), para se obter as coordenadas dos pontos levantados.

Caso as ambiguidades tenham sido solucionadas como números inteiros corretamente, a nova solução para as coordenadas da estação será de alta acurácia posicional. No caso de dúvidas na solução das ambiguidades, é preferível aceitar a solução inicial (*float*) do que uma solução fixa (*fixed*) errada (Figura 5.2).

Se o receptor perder o sinal de um satélite, um novo valor inicial para as ambiguidades é introduzido. Este é o problema da perda de ciclo. As ambiguidades estimadas em um primeiro ajustamento são números reais (solução flutuante), elas são então convertidas para números inteiros (solução fixa) se os valores estimados (reais) estiverem muito próximos de um número inteiro, ou, em outras palavras, se o erro posicional relativo na direção do satélite for menor do que meio comprimento de onda (no caso da portadora L1, por exemplo, menor do que 9,5 cm). Logo, quanto maior o comprimento de onda da onda portadora, mais fácil é a solução da sua ambiguidade.

Além disso, efeitos ionosféricos; troposféricos; de multicaminho do sinal; a geometria (configuração espacial) dos satélites; o tempo de rastreamento; o tamanho da linha-base; a interferência de outras fontes de rádio; dentre outros fatores; afetam a solução das ambiguidades. Desta forma, diversos métodos de solução das ambiguidades têm sido desenvolvidos e propostos, conforme será apresentado a seguir.

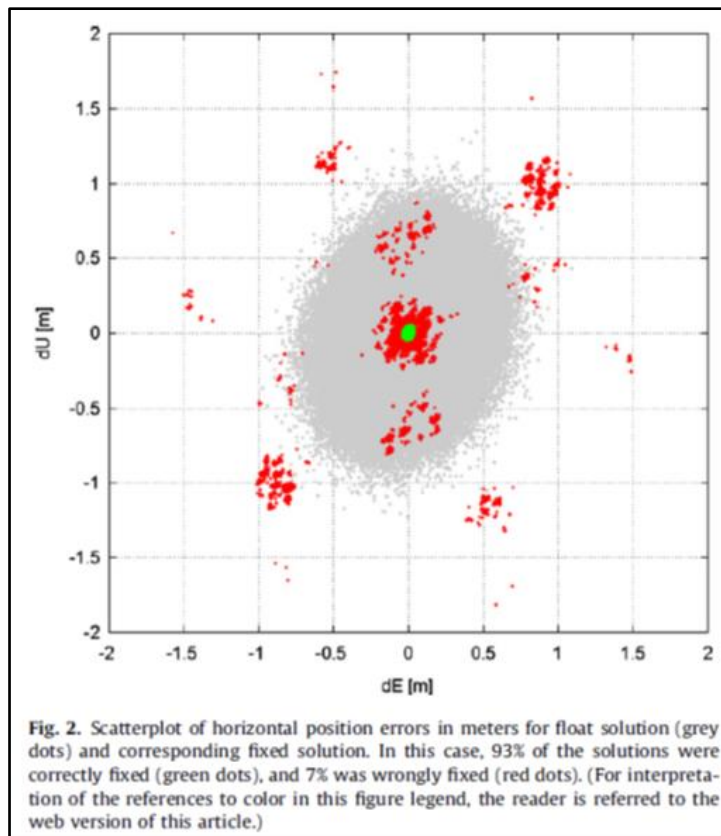


Figura 5.2 – Erro posicional planimétrico (em metros) para soluções fixas corretas (em verde), fixas erradas (em vermelho) e flutuantes (em cinza).

5.1. Técnicas de solução das ambiguidades

Existem várias técnicas (métodos) para a solução das ambiguidades, como por exemplo, a longa ocupação, de pelo menos 30 minutos, em um mesmo ponto, alterando a geometria (configuração espacial) dos satélites visíveis, sendo denominada de método geométrico.

O rastreo contínuo das fases da onda portadora resulta na determinação de diferenças de ambiguidades. Estas são usadas numa solução Doppler para determinar as coordenadas da antena do receptor. Diferenças de ambiguidades de pseudodistâncias entre a antena do receptor e o satélite podem ser derivadas desta solução, e comparadas com as observações de diferença de ambiguidades das fases da onda portadora. As ambiguidades são diretamente obtidas desta comparação. Para que o método geométrico seja aplicado, a mudança na geometria dos satélites deve ser suficientemente larga, ou seja, um longo período de observação é exigido, devido à alta correlação temporal e espacial existente entre as ambiguidades da primeira época de observação.

Outro método, muito utilizado no início do desenvolvimento do PR, é a técnica de troca de antenas (*swap antennas*), a qual consiste em instalar um receptor GNSS em

um ponto de coordenadas conhecidas, e o outro receptor GNSS em uma estação próxima, entre 2 a 5 metros. Coletam-se dados por pelo menos uma época de observação e então as antenas são trocadas, sem perder a sintonia com os satélites, ou seja, os receptores permanecem ligados, coletando-se então novamente dados de pelo menos uma época de observação com as antenas trocadas (Figura 5.3). Não havendo perdas de ciclos, as ambiguidades antes e depois da troca de antenas nos dois receptores são as mesmas, e, combinando as equações de observação envolvidas antes e depois da troca de antenas, os valores das ambiguidades podem ser determinados.

Neste caso, a geometria entre as estações e os satélites foi alterada ao se fazer a troca de antenas, razão pela qual as ambiguidades podem ser solucionadas rapidamente. Esse procedimento foi um dos primeiros que permitiram realizar posicionamento geodésico com precisão centimétrica em um pequeno intervalo de tempo de coleta de dados, mas trata-se de um procedimento que não é mais adotado na prática.

Outro método que pode ser utilizado é a ocupação de dois pontos com coordenadas conhecidas (técnica da linha-base conhecida). Neste caso, como se conhecem as coordenadas das duas estações ocupadas, os parâmetros a se determinar no ajustamento são apenas as ambiguidades, o que pode ser realizado instantaneamente.

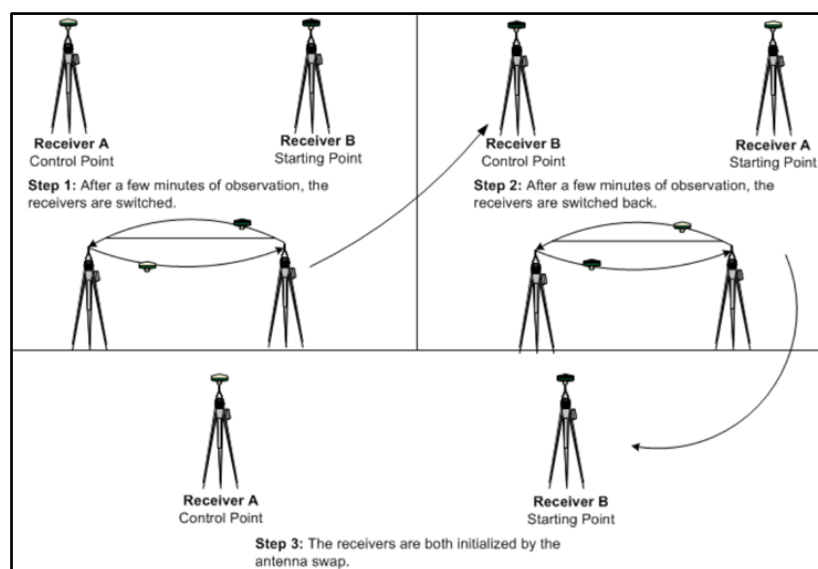


Figura 5.3 – Método da troca de antenas (*swap antennas*).

Atualmente, existem métodos de solução quase instantânea (técnicas *on the fly*) para as ambiguidades, sendo o método LAMBDA (*Least-squares AM-Biguity Decorrelation Adjustment*) o mais conhecido e utilizado. A técnica LAMBDA requer

como dados de entrada apenas as ambiguidades estimadas (reais) e a sua respectiva MVC. Logo, mesmo quando outros parâmetros estão sendo estimados simultaneamente, como coordenadas da estação, erros dos relógios dos receptores e etc., esta técnica pode ser aplicada em tempo real, como por exemplo, no caso do RTK (Figura 5.4).

O núcleo central da técnica LAMBDA baseia-se na re-parametrização do vetor de ambiguidades (N), mediante a aplicação da transformação Z , visando obter novas ambiguidades com menor correlação (covariâncias). Supondo correlação nula entre as ambiguidades (caso ideal), a solução seria obtida simplesmente aproximando (arredondando) cada ambiguidade estimada (real) para o inteiro mais próximo. No entanto, para curtos períodos de coleta de dados e/ou linhas-base longas, tal situação não ocorre na prática.

Desta forma, as ambiguidades são decorrelacionadas por meio de uma transformação apropriada (transformação Z), aplicada sobre as ambiguidades originais, pertencentes ao espaço dos números reais. A decorrelação (redução da correlação) torna a nova região de procura bastante inferior a original, uma vez que, paralelamente a decorrelação das ambiguidades, a precisão das mesmas também melhora de forma considerável (Figura 5.5).

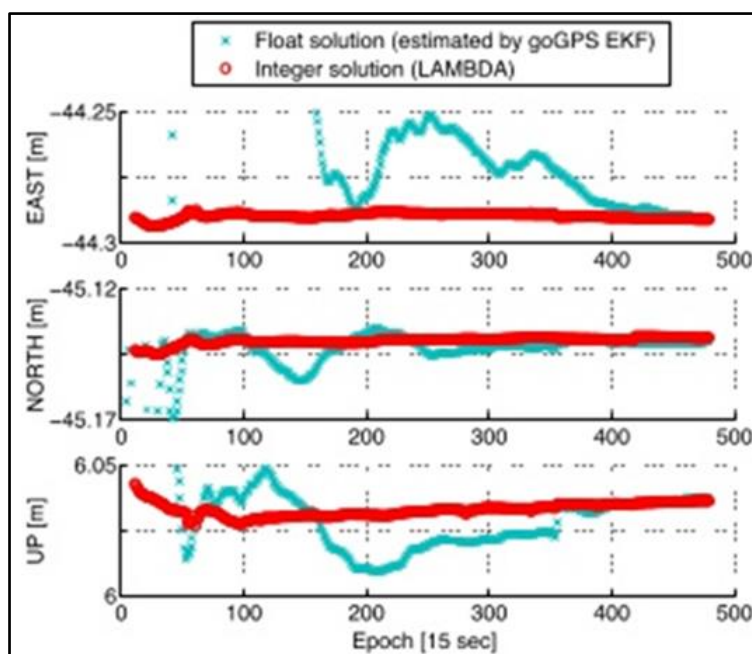


Figura 5.4 – Comparação entre o método LAMBDA e a solução flutuante em função do tempo de rastreo.

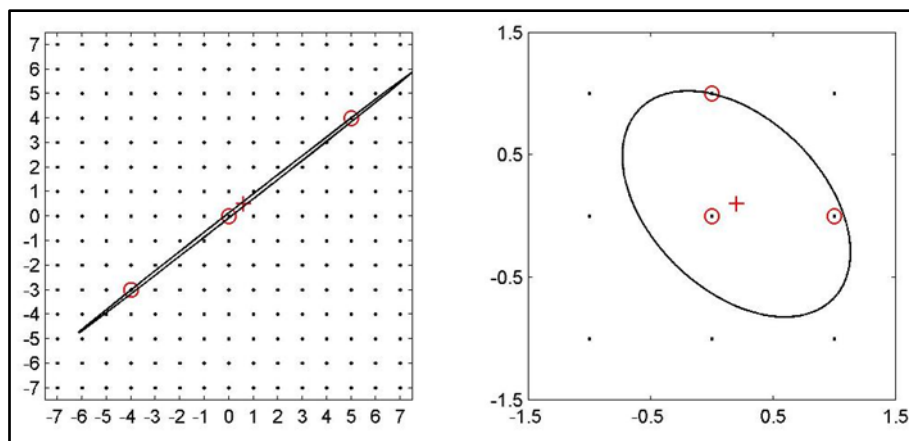


Figura 5.5 – Exemplo de aplicação da transformação Z para decorrelacionar as ambiguidades originais.

Após a aplicação da transformação Z, o próximo passo é realizar a procura, ou seja, obter o vetor de valores inteiros das ambiguidades. Uma vez encontrada a solução inteira no espaço transformado, de baixa correlação, basta transformá-la para o espaço original das ambiguidades, de alta correlação, aplicando a transformação Z inversa.

5.2. Validação do vetor das ambiguidades

No PR, o número de ambiguidades a ser considerado depende do número de satélites rastreados e do espaço de procura das DDs das ambiguidades. Por exemplo, se a janela de procura para cada ambiguidade for de 6 ciclos (ou seja, ± 3 ciclos), estando disponíveis 6 satélites (isto é, 5 DDs), o número de combinações a ser testado é $6^5 = 7776$. Se, ao invés de 6 ciclos, a janela for de 7, este número aumenta para $7^5 = 16807$. Logo, fica evidente que a solução do problema não é obtida analisando todas as possíveis soluções, mas pela adoção de uma estratégia apropriada.

Para a validação da solução fixa do vetor de ambiguidades, são adotados testes estatísticos de discriminação, sendo o *Teste Ratio* o mais aplicado. Estes testes estatísticos visam comparar a probabilidade da solução fixa mais provável com a probabilidade de demais vetores de ambiguidades inteiras.

Quando se aplica o estimador MQI (Mínimos Quadrados Inteiros), como por exemplo, no método LAMBDA, a probabilidade da solução fixa escolhida é sempre maior do que a de qualquer outro vetor inteiro (candidato). Mas, se a probabilidade desta solução fixa não for suficientemente maior que a de outro candidato qualquer, estas duas soluções não podem ser discriminadas com confiança suficiente.

No processo de busca do vetor ambiguidade de números inteiros, acham-se candidatos-vetores para a melhor solução. Com os candidatos-vetores a solução fixa, testa-se o melhor candidato (C1) com o segundo melhor (C2).

Calcula-se os resíduos entre o vetor de valores reais (solução flutuante, estimado no ajustamento convencional) e os valores inteiros (após a aplicação do MQI). Calcula-se então um indicador de qualidade entre o melhor candidato e o segundo melhor candidato. É feita então uma divisão entre o indicador de qualidade do segundo e do primeiro melhor candidato. Se o valor resultante desta divisão for maior que um número pré-estabelecido c (normalmente, $c=3$), a solução fixa mais provável, isto é, o primeiro melhor candidato, é aceita. Logo, aceita-se o vetor de ambiguidades inteiros do melhor candidato (C1).

Desta forma, o ajustamento do posicionamento (relativo, PPP ou DGNS preciso) é novamente realizado, introduzindo os valores das ambiguidades inteiras, melhorando a qualidade da linha-base estimada (solução *fixed*). Caso contrário, adota-se a solução inicial com números reais (solução *float*), pois não existe confiança suficiente na melhor solução fixa, isto é, na solução mais provável C1.

5.3. Exemplo de solução e validação das ambiguidades pelo método LAMBDA

A seguir (Figuras 8.6, 8.7, 8.8, 8.9, 8.10 e 8.11), é apresentado um exemplo de solução e validação do vetor das ambiguidades, retirado de Monico (2008), relativo a oito duplas diferenças de um PR com linha-base curta envolvendo vinte épocas de rastreo.

$$\hat{N} = \begin{pmatrix} 73154009,564 \\ 8220293,749 \\ 23809002,470 \\ 14270899,878 \\ 26947802,477 \\ -4858095,784 \\ -4830668,675 \\ 55348389,906 \end{pmatrix} \quad \Sigma_{\hat{N}} = \begin{pmatrix} 0,1998 & -0,0439 & 0,0595 & 0,0022 & 0,0266 & -0,0503 & 0,1312 & 0,1481 \\ -0,0439 & 0,2044 & -0,1678 & 0,1956 & -0,1241 & 0,0255 & 0,0289 & -0,2194 \\ 0,0595 & -0,1678 & 0,1639 & -0,1649 & 0,1218 & -0,0100 & -0,0205 & 0,2170 \\ 0,0022 & 0,1956 & -0,1649 & 0,2015 & -0,1271 & 0,0071 & 0,0653 & -0,1968 \\ 0,0266 & -0,1241 & 0,1218 & -0,1271 & 0,0924 & -0,0014 & -0,0292 & 0,1542 \\ -0,0503 & 0,0255 & -0,0100 & 0,0071 & -0,0014 & 0,0254 & -0,0384 & -0,0339 \\ 0,1312 & 0,0289 & -0,0205 & 0,0653 & -0,0292 & -0,0384 & 0,1112 & 0,0275 \\ 0,1481 & -0,2194 & 0,2170 & -0,1968 & 0,1542 & -0,0339 & 0,0275 & 0,3148 \end{pmatrix}$$

Figura 5.6 – Solução flutuante original (*float*) das ambiguidades das oito DDs e sua respectiva MVC.

$$Z = \begin{pmatrix} -3,0 & -2,0 & 1,0 & -1,0 & 1,0 & -3,0 & 1,0 & 1,0 \\ 3,0 & 1,0 & 3,0 & 0,0 & 2,0 & -1,0 & 1,0 & 0,0 \\ 3,0 & 5,0 & 5,0 & 2,0 & 1,0 & 0,0 & -2,0 & 0,0 \\ -4,0 & 1,0 & -3,0 & -1,0 & -2,0 & 4,0 & -1,0 & -1,0 \\ -1,0 & -3,0 & 0,0 & -3,0 & -4,0 & 0,0 & 2,0 & 0,0 \\ 1,0 & -2,0 & -2,0 & 2,0 & -1,0 & -2,0 & -1,0 & 1,0 \\ 6,0 & 1,0 & 1,0 & 2,0 & -2,0 & 0,0 & -1,0 & 0,0 \\ -1,0 & 0,0 & -4,0 & 0,0 & 1,0 & 3,0 & 0,0 & -1,0 \end{pmatrix}$$

Figura 5.7 – Matriz Z obtida para este problema, necessária para decorrelacionar as ambiguidades originais.

$$\hat{z} = Z^T \hat{N} = \begin{pmatrix} -7,772 \\ 2,313 \\ -0,205 \\ -4,857 \\ 1,907 \\ 5,363 \\ 1,910 \\ -2,006 \end{pmatrix} \quad \Sigma_{\hat{z}} = Z^T \Sigma_{\hat{N}} Z = \begin{pmatrix} 0,0059 & -0,0030 & -0,0025 & -0,0030 & -0,0005 & 0,0001 & 0,0016 & 0,0000 \\ -0,0030 & 0,0018 & 0,0002 & -0,0018 & 0,0002 & -0,0017 & 0,0017 & 0,0005 \\ -0,0025 & 0,0002 & 0,0012 & 0,0003 & 0,0011 & 0,0006 & -0,0005 & -0,0000 \\ -0,0030 & -0,0018 & 0,0003 & -0,0009 & -0,0001 & -0,0013 & 0,0009 & 0,0005 \\ -0,0005 & 0,0002 & 0,0011 & -0,0001 & 0,0011 & -0,0009 & -0,0001 & 0,0001 \\ 0,0001 & -0,0017 & 0,0006 & -0,0013 & -0,0009 & -0,0006 & 0,0014 & 0,0002 \\ 0,0016 & 0,0017 & -0,0005 & 0,0009 & -0,0001 & 0,0014 & -0,0005 & -0,0005 \\ 0,0000 & 0,0005 & 0,0000 & 0,0005 & 0,0001 & 0,0002 & -0,0005 & 0,0003 \end{pmatrix}$$

Figura 5.8 – Ambiguidades re-parametrizadas e sua respectiva MVC, aplicando a transformação Z.

$$\begin{aligned} \text{Cand1} &= \begin{pmatrix} -8,0 \\ 2,0 \\ 0,0 \\ -5,0 \\ 2,0 \\ 5,0 \\ 2,0 \\ -2,0 \end{pmatrix} & \text{Cand2} &= \begin{pmatrix} -7,0 \\ 2,0 \\ 0,0 \\ -5,0 \\ 2,0 \\ 5,0 \\ 2,0 \\ -2,0 \end{pmatrix} & \text{Cand3} &= \begin{pmatrix} -7,0 \\ 3,0 \\ 0,0 \\ -5,0 \\ 2,0 \\ 5,0 \\ 2,0 \\ -2,0 \end{pmatrix} \\ \sigma_{\text{Cand1}} &= \sqrt{d_i^{-1}} = \sqrt{1608,15} = 40,10; \chi^2_{\text{Cand1}} = 480 \\ \sigma_{\text{Cand2}} &= \sqrt{d_i^{-1}} = \sqrt{1823,77} = 42,70; \chi^2_{\text{Cand2}} = 1250 \\ \sigma_{\text{Cand3}} &= \sqrt{d_i^{-1}} = \sqrt{1999,82} = 44,29; \chi^2_{\text{Cand3}} = 1300 \end{aligned}$$

Figura 5.9 – Três melhores candidatos e seus indicadores de qualidade, no espaço da transformação Z.

$$\tilde{N}_1 = (Z^T)^{-1} \text{Cand1} = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ 1 \\ -1 \\ -2 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad \tilde{N}_2 = (Z^T)^{-1} \text{Cand2} = \begin{pmatrix} -2 \\ 3 \\ -3 \\ 3 \\ -2 \\ -1 \\ -1 \\ -4 \end{pmatrix}; \quad \tilde{N}_3 = (Z^T)^{-1} \text{Cand3} = \begin{pmatrix} 9 \\ 5 \\ -4 \\ 8 \\ -4 \\ -4 \\ 8 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Figura 5.10 – Três melhores candidatos (reduzidos) no espaço original, por meio da transformação Z inversa.

$$\tilde{N}_1 = \begin{pmatrix} 73154008 \\ 8220292 \\ 23809003 \\ 14270898 \\ 26947803 \\ -4858096 \\ -4830670 \\ 55348390 \end{pmatrix}; \quad \tilde{N}_2 = \begin{pmatrix} 73154007 \\ 8220296 \\ 23808999 \\ 14270902 \\ 26947800 \\ -4858096 \\ -4830669 \\ 55348385 \end{pmatrix}; \quad \tilde{N}_3 = \begin{pmatrix} 73154018 \\ 8220298 \\ 23808998 \\ 14270907 \\ 26947798 \\ -4858099 \\ -4830660 \\ 55348388 \end{pmatrix}.$$

Figura 5.11 – Melhores soluções fixas, somando os valores reduzidos (incrementos) à solução float inicial.

Os candidatos mais prováveis, em ordem, são o candidato 1 (Cand1) e o candidato 2 (Cand2), devido aos indicadores de qualidade da Figura 5.9 (quanto menor o valor de χ^2 , maior a probabilidade do respectivo candidato). A aplicação do *Teste Ratio* entre estes dois candidatos resulta em $c=4,04$. Desta forma, o Cand1 seria aceito como solução fixa, pois o resultado do *Teste Ratio* excedeu o valor crítico de referência ($c=3$).

Desta forma, o próximo passo é realizar novamente o ajustamento do posicionamento relativo para obter as coordenadas dos receptores GNSS por meio da solução fixa obtida.

PRINCIPAIS REFERÊNCIAS

MONICO, João Francisco Galera. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

WIKIPEDIA. Disponível em: < <https://www.wikipedia.org/>>. Acesso em: Abril de 2016.