

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GUSTAVO BENTO MANSUR



**COMPORTAMENTO DOS RELÓGIOS DOS SATÉLITES GPS: CORREÇÕES
E ANÁLISES**

CURITIBA

2017

GUSTAVO BENTO MANSUR

**COMPORTAMENTO DOS RELÓGIOS DOS SATÉLITES GPS: CORREÇÕES
E ANÁLISES**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção ao grau de Mestre em Ciências Geodésicas, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Professor Doutor Luiz Danilo Damasceno Ferreira.

CURITIBA

2017

M289c

Mansur, Gustavo Bento
Comportamento dos relógios dos satélites GPS: correções e análises /
Gustavo Bento Mansur. – Curitiba, 2017.
68 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da
Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2017.

Orientador: Luiz Danilo Damasceno Ferreira.
Bibliografia: p. 60-63.

1. Geodesia. 2. Relógios atômicos. 3. GPS. I. Universidade Federal do
Paraná. II. Ferreira, Luiz Danilo Damasceno. III. Título.

CDD: 526.1

TERMO DE APROVAÇÃO


GUSTAVO BENTO MANSUR

**“COMPORTAMENTO DOS RELÓGIOS DOS
SATÉLITES GPS: CORREÇÕES E ANÁLISES”**

Dissertação nº 303 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


Prof. Dr. Luiz Danilo Damasceno Ferreira
Universidade Federal do Paraná, UFPR


Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo
Universidade Estadual Paulista, UNESP


Profª. Drª. Cláudia Pereira Krueger
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 01 de fevereiro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho. Em especial aos aqui relacionados.

Ao Professor Doutor Luiz Danilo Damasceno Ferreira, pela confiança, oportunidade concedida e amizade.

Ao Professor Doutor Álvaro Muriel Lima Machado, pelas inúmeras ajudas nas horas necessárias.

Ao Professor Doutor Luís Augusto Koenig Veiga, Vice-Coordenador do curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura.

A Professora Doutora Angela Cristina Cararo, pelas discussões iniciais da pesquisa.

A Professora Doutora Claudia Pereira Krueger e ao Professor Doutor Paulo de Oliveira Camargo, por comporem a banca examinadora deste trabalho.

Ao CNPq pelo fomento fornecido à pesquisa.

Ao Curso de Pós-Graduação de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG) e a secretária Mônica Kleuser.

Aos meus amigos: Clayton Poitevin, Jackson Cabral, Leonardo Kummer, Gabriel Model, Cristiane Aoki, Acir Carlotto, Ingrid Frandji, Lírio Ninotchka, Paulo Silas Filho e Andressa Domingues.

Por fim, os meus pais e família pelo apoio contínuo.

RESUMO

A transmissão do sinal e qualidade da posição obtida no posicionamento com o GNSS depende diretamente do controle do tempo. Os responsáveis por este controle são os relógios atômicos que estão a bordo dos satélites. Nesta pesquisa é estudado o erro dos relógios dos satélites GPS, para isto são utilizados os dados de pseudodistância, semieixo maior e parâmetros de correção dos erros dos relógios dos satélites encontrados nos arquivos RINEX de navegação e observação. A partir destes dados, são calculados os erros dos relógios dos satélites, utilizando o modelo matemático do IGS, e então aplicada uma técnica de ajustamento para estimar novos parâmetros de correção dos relógios. É também realizada uma adaptação na parte periódica do modelo matemático, utilizado para relógios atômicos de Césio. São aplicados então os parâmetros de correção ajustados no modelo do IGS e no adaptado, e por fim os resultados comparados com os apresentados pelo IGS no arquivo *clk_30s*. Os experimentos realizados apresentaram uma melhora de 50 cm nos erros dos relógios dos satélites de Césio. Ainda a pesquisa conclui que os erros dos relógios dos satélites independem da estação de onde estão sendo coletados os dados, assim como também não dependem da antena.

Palavras-chave: Erro dos relógios dos satélites, relógios atômicos, relógios GPS, efemérides transmitidas.

ABSTRACT

Signal transmission and position quality obtained by the GNSS positioning directly depends on the time control. The atomic clocks aboard of satellites are responsible for this control. In this research is studied the satellites clocks errors of GPS and to do so data from pseudorange, satellite semi-major axis and correction parameters of satellites' clocks errors founded in the RINEX navigation and observation files. From this data, the satellites clocks errors are calculated using the IGS mathematical model, and then an adjustment technique was applied in order to estimate new parameters of the clocks corrections. For Cesium atomic clocks, the periodic part of the mathematical model was adapted. The correction parameters adjusted were applied in the IGS and adapted model, finally the results were compared with IGS data from clk_30s file. The experiments carried out show an improvement of 50 cm in the Cesium satellites' clocks errors. In addition, the research concludes that the satellites' clocks errors do not depend on the station where the data was collected as well it do not depend on the equipment's antenna.

Keywords: Satellites clocks errors, atomic clocks, GPS clocks, broadcast ephemerides.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Definição do tempo sideral.....	22
Figura 2 - Laboratórios que contribuem com o TAI (Abril de 2013).....	24
Figura 3 - Escalas de tempo importantes.....	26
Figura 4 - Relógio Atômico.....	27
Figura 5 - Estabilidade dos elementos dos relógios.....	31
Figura 6 - Arquivo RINEX de navegação.....	33
Figura 7 - Arquivo RINEX de Observação.....	34
Figura 8 - Arquivo de correção do relógio.....	35
Figura 9 - Fluxograma VisualStudio.....	39
Figura 10 - Fluxograma Matlab.....	41
Figura 11 - Comportamento dos erros do relógio - PRN24 (Cs) - Estação UFPR - Dia 26 de junho a 3 de julho.....	44
Figura 12 - Comportamento dos erros do relógio - PRN24 (Cs) - Estação UFPR - 30 de junho de 2016.....	45
Figura 13 - Diferença entre o erro do relógio do IGS e erro do relógio modificado - PRN24 (Cs) - Estação UFPR - 30 de junho de 2016.....	46
Figura 14 - Comportamento dos erros do relógio - PRN24 (Cs) - Estação Campo Grande - 30 de junho de 2016.....	47

Figura 15 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN24 -Estação Campo Grande - 30 de junho de 2016	47
Figura 16 - Comportamento entre os erros do relógio - PRN8 (Cs) - Estação Recife - Dia 26 de junho a 3 de julho	48
Figura 17 - Comportamento dos erros do relógio - PRN8 (Cs) - Estação Recife - 28 de junho de 2016.....	49
Figura 18 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN8 (Cs) - Estação Recife - 28 de junho de 2016.....	50
Figura 19 - Comportamento dos erros do relógio - PRN16 (Rb) - estação UFPR - Dia 26 de junho a 3 de julho.....	51
Figura 20 - Comportamento dos erros do relógio - PRN16 (Rb) - Estação UFPR - 02 de julho.....	51
Figura 21 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN16 (Rb) - Estação UFPR - 02 de julho de 2016	52
Figura 22 - Comportamento dos erros do relógio - PRN16 (Rb) - Estação St. Maria - 02 de julho de 2016.....	53
Figura 23 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN16 (Rb) - Estação St. Maria - 02 de julho de 2016	53
Figura 24 - Erros do relógio modificado - PRN5 – Estações: UFPR/Recife/Campo Grande/ St. Maria - 01 de julho de 2016	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtos IGS.....	14
Tabela 2 - Tempos Universais.....	23
Tabela 3 - Leap Seconds	25
Tabela 4 - Estações RBMC	42
Tabela 5a - Satélites GPS	42
Tabela 5b - Satélites GPS	43
Tabela 7 - PRN24 Erros do relógio – Estação UFPR – dia 30 de junho	55
Tabela 8 – PRN16 Erros do relógio – Estação St. MARIA – dia 2 de julho	55

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	16
1.2 Conteúdo da Dissertação	16
1.3 Objetivos	17
1.4 Estado da arte	18
2. REVISAO DE LITERATURA.....	21
2.1 Sistemas de Tempo.....	21
2.2.1 Tempo Sideral e Tempo Universal	21
2.2.2 Tempo Atômico	23
2.2.3 Tempo GPS	25
2.2.4 Tempo Dinâmico	26
2.3 Relógios e Padrão de Frequências	27
2.3.1 Transmissão do Sinal GPS	31
2.4 RINEX	33
3. METODOLOGIA.....	35
3.1 Erro do relógio do satélite.....	36
3.2 Ajustamento de observações	37

3.3	Desenvolvimento VisualStudio	38
3.4	Desenvolvimento Matlab	39
4.	EXPERIMENTOS REALIZADOS E RESULTADOS	42
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	56
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	59
7.	REFERÊNCIAS	61
	APÊNDICES	65

1. INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*), atualmente é usado de forma ampla em atividades de posicionamento por ponto e navegação que exigem alta precisão. A qualidade do ponto medido está diretamente relacionada com a qualidade das soluções da órbita dos satélites, erros relacionados à troposfera, ionosfera, multicaminho, centro de fase da antena e também aos erros dos relógios dos satélites e receptores (BIDIKAR et al., 2014; SENIOR et al., 2008; SEEBER 2003; MONICO, 2008).

A evolução dos relógios atômicos trouxe inovações como para metrologia, física fundamental e para técnicas de posicionamento global (HINKLEY, 2013; DELVA e LODEWYCK, 2013). A posição de um usuário do GNSS depende basicamente do tempo que o sinal leva propagando dos satélites até o receptor. Como consequência disto, um erro no tempo implica em um erro de posição, ou seja, os sistemas de navegação dependem das performances dos relógios, assim como na capacidade de estimar seu comportamento (SEEBER, 2003; MARTINEZ, 2014; GALLEANI, 2014). Não apenas em satélites, os relógios atômicos são usados também em estações na superfície terrestre, onde podem caracterizar sistemas de tempo, e ainda são usadas para sincronizar os relógios que estão em órbita (GALLEANI, 2014; WEISS, 2010).

Os relógios atômicos dos satélites que estão em órbita, são sujeitos a inúmeras anomalias, como radiação, temperatura, envelhecimento e até mesmo uma parada súbita de funcionamento. O entendimento das anomalias que influenciam os relógios atômicos, é essencial para que seja aplicada uma correção adequada no posicionamento (GALLEANI, 2014). O serviço internacional do GNSS, o IGS - *International GNSS Service*, é o principal responsável pelas informações sobre produtos de órbita e relógios (HESSELBARTH, 2008). A tabela 1 apresenta os produtos disponibilizados pelo IGS.

Tabela 1 - Produtos IGS

Tipo		Acurácia	Latência	Updates	Intervalo amostral
Transmitidas	órbitas	~100 cm	Tempo real	--	diário
	Sat. relógios	~5 ns RMS ~2,5 ns SDev			
Ultrarrápida (predita)	órbitas	~5 cm	Tempo real	As 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. relógios	~3 ns RMS ~1,5 ns SDev			
Ultrarrápida (observada)	órbitas	~3 cm	3 - 9 horas	As 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. relógios	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Rápida	órbitas	~2,5 cm	17 - 41 horas	As 17 UTC diariamente	15 min
	Sat. & Stn. relógios	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min
Final	órbitas	~2,5 cm	12 - 18 dias	Toda terça feira	15 min
	Sat. & Stn. relógios	~75 ps RMS ~20 ps SDev			Sat.:30s Stn.: 5 min

Fonte: <http://www.igs.org/products>

Os satélites que compõe o GPS carregam a bordo relógios atômicos de Rubídio e Césio, que possuem uma estabilidade na ordem de 10^{-14} . Apesar da alta estabilidade dos relógios, ainda existem diferenças de sincronização entre o tempo que é transmitido pelo satélite e o tempo GPS. Sendo assim, é necessária uma correção do erro do relógio do satélite. O IGS calcula esse erro

a partir de uma função polinomial de segundo grau individualmente para cada satélite, ainda o valor da correção é comum para todos os usuários, ou seja, usuários que estão em posições diferentes, porém observando o mesmo satélite, estão sujeitos ao mesmo erro (BIDIKAR et al., 2013; MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

São encontrados na literatura diversas metodologias para adequar o modelo usado pelo IGS ou desenvolver um novo, como por exemplo a inclusão de polinômios de ordem superior, novos modelos quadráticos, análises de frequências dos elementos presentes nos osciladores e também a predição dos erros a partir de observações do código ou da fase das observáveis dos satélites, como no modelo apresentado por Hauschild e Montenbruck (2008), onde o filtro de Kalman é usado para determinar o erro do relógio do satélite. O constante desenvolvimento dos relógios atômicos exige um contínuo estudo para gerar novas metodologias que estimem as correções dos relógios dos satélites.

A pesquisa proposta consiste em utilizar os parâmetros de correção do relógio, disponíveis no arquivo RINEX de navegação, aplicar o modelo matemático que calcula o erro do relógio, então, utilizar estes valores como observações aplicando um ajustamento paramétrico linear, buscando estimar novos parâmetros de correção dos relógios do satélite. A pesquisa propõe também adaptar a parte periódica do modelo matemático do IGS, usada para calcular o erro dos relógios atômicos de Césio. Em seguida, estimar os erros dos relógios dos satélites a partir dos parâmetros de correção ajustados aplicando a parte determinística do modelo matemático do IGS para os relógios de Rubídio e o modelo adaptado para relógios atômicos de Césio. Por fim, comparar os resultados dos experimentos realizados com os apresentados no arquivo *clk_30s* do IGS.

Os resultados obtidos mostraram que o processo proposto obteve êxito, e que é possível notar que o erro do relógio calculado a partir dos parâmetros

ajustados mostrou uma aproximação dos erros dos relógios fornecidos pelo IGS, principalmente para os relógios de Césio.

1.1 Justificativa

O IGS disponibiliza os valores dos parâmetros de correção dos erros dos relógios dos satélites nas efemérides transmitidas, ultrarrápidas, rápidas e finais, sendo esta última obtida pelo usuário com um atraso de 12 a 18 dias após a aquisição dos dados, onde a acurácia aumenta das efemérides transmitidas para as finais. Os parâmetros encontrados nas efemérides são essenciais para que a equação que define os erros dos relógios dos satélites seja resolvida e assim então seu valor aplicado como uma correção, que resulta em um posicionamento mais acurado. Neste aspecto, o usuário que utilizar as efemérides transmitidas tem menos acurácia do que quando utiliza as finais. Como exemplo, o posicionamento por ponto em tempo real, não usufrui dos dados das efemérides mais acuradas. Portanto, é necessário desenvolver modelos matemáticos que utilizem os dados das efemérides transmitidas e levem a um resultado próximo do alcançado com as finais.

Trabalhos existentes na literatura como o de Brödebauer (2004), Senior et al. (2008), Marques (2012), Bidikar et al. (2013), Huang et al. (2013), e outros apresentam em suas pesquisas metodologias que utilizam o modelo matemático do IGS e demonstram que trabalhar com os erros relacionados aos relógios dos satélites, garantem diretamente uma solução de posicionamento mais acurada.

1.2 Conteúdo da Dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos, onde no capítulo dois é apresentada uma introdução a conceitos de sistema de tempo, que são essências para o entendimento de como funcionam os sistemas de

posicionamento. No mesmo capítulo é apresentado um resumo sobre relógios atômicos e como se dá a transmissão do sinal GPS.

No capítulo três, é apresentada a metodologia usada no trabalho, que inclui a programação das rotinas usadas nos softwares VisualStudio e Matlab, assim como, o ajustamento realizado e os cálculos para estimar os erros dos relógios do satélite.

No capítulo quatro, são apresentados os resultados em forma de figuras, onde são comparados os erros dos relógios dos satélites obtidos na pesquisa, com os erros dos relógios dos satélites disponibilizados pelo IGS. O capítulo cinco, abrange a análise dos resultados obtidos, e finalmente no capítulo seis, são apresentadas as conclusões e recomendações.

1.3 Objetivos

- Objetivo Geral

Avaliar o comportamento dos erros dos relógios dos satélites GPS.

- Objetivos Específicos.

1. Estimar os erros dos relógios dos satélites utilizando a parte determinística do modelo matemático do IGS utilizando os coeficientes de correção dos erros dos relógios dos satélites, obtidos no RINEX (mensagem de navegação)

2. Com o modelo matemático completo do IGS (parte determinística + parte periódica), inicia-se um processo para se estimar os novos coeficientes, aplicando-se o Método dos Mínimos Quadrados.

3. Adaptar a parte periódica do modelo matemático do IGS para os relógios atômicos de Césio.

4. Com os coeficientes ajustados do modelo matemático obtidos no item 2, estimar novamente, o erro do relógio dos satélites tanto para os relógios atômicos de Rubídio aplicando apenas a parte determinística, como para os relógios atômicos de Césio, a partir do modelo matemático adaptado.

5. Comparar os resultados obtidos no item 4 com os apresentados no arquivo *clk_30s* disponibilizado pelo IGS.

1.4 Estado da arte

O estudo do comportamento dos relógios sempre foi alvo de pesquisas, como na de Allan (1987) que estudava métodos de caracterizar o desempenho dos osciladores e precisão presentes nos relógios. Essa pesquisa foi de extrema importância, pois apontava que a estatística convencional não era capaz de caracterizar corretamente as variações ocorridas nos osciladores. A metodologia usada permitiu uma caracterização mais adequada aos desvios randômicos presentes nos osciladores, conseqüentemente melhores estimativas e predições de tempo e frequência.

A pesquisa de Bröderbauer e Weber (2004) apresenta tanto figuras dos períodos dos relógios de Césio que seguem um padrão senoidal, como também figuras dos relógios de Rubídio que tem comportamento linear, indicando que cada elemento presente que compõe os osciladores dos relógios atômicos a bordo dos satélites, deve receber um tratamento diferente. Senior et al. (2008), aponta como se comporta a estabilidade nos relógios de Rubídio quando se trata da questão do ambiente em que o satélite está inserido, ou seja, quando a órbita do satélite, por exemplo, está em eclipse e sua condição termal muda. Seder (2008) em sua pesquisa buscou detectar frequências dominantes no erro do relógio dos satélites, e conseguiu determinar que a maioria das frequências dominantes tem um período com um desvio de 58 ± 11 s do período orbital do satélite.

Posicionamentos por ponto em tempo real - RTPPP (*Real – Time Precise Point Positioning*), são exemplos claros de que a correção dos erros relacionados a relógios são de extrema importância. Em sua pesquisa Hauschild et al. (2008), apresentam um algoritmo que utiliza o filtro de Kalman que serve para estimar os coeficientes de erros do relógio. Outro trabalho que apresenta uma metodologia que utiliza levantamentos em tempo real é a pesquisa de Marques et al. (2012), que desenvolveu dois softwares, sendo que um deles permite a correção dos relógios com base em dados da rede GNSS, e os resultados encontrados com o software foram comparados com as efemérides finais do IGS.

Uma pesquisa que também considera os elementos que compõe o oscilador do relógio é o de Huang et al. (2013), onde são apresentadas formulações que adequam o modelo usado pelo IGS, da predição de erros do relógio do satélite. O trabalho apresenta uma nova metodologia para predição dos erros, com base em qual elemento está presente no relógio. Bidikar et al. (2013) calculam o erro de *offset* (desvios) dos relógios e órbitas, a partir de efemérides transmitidas e compara os resultados com o das efemérides finais apresentadas pelo JPL, mostrando assim a importância do cálculo destes erros e como influenciam nos posicionamentos.

A pesquisa de Delva e Lodewyck (2013), apresenta uma revisão sobre relógios atômicos e como se deu seu desenvolvimento. Ainda a pesquisa mostra como foi o desenvolvimento dos relógios ópticos e Hinkley (2013), em sua pesquisa, apresenta como estes relógios tem uma alta sensibilidade em relação ao campo gravitacional da Terra, isto é, devido a sua alta estabilidade. Ainda de acordo com Delva e Lodewyck (2013), a eventual expansão do uso dos relógios ópticos no espaço possibilita o desenvolvimento de um sistema de referência extremamente estável contendo 4 dimensões.

O trabalho de Lorenzo Galleani (2014) faz uso da variância de Allan em sua forma dinâmica, e a partir dela, da possibilidade de monitorar as anomalias

dos relógios a bordo de satélites, sendo os resultados obtidos na pesquisa focados em ajudar a entender como está o comportamento da “saúde” do relógio a bordo do satélite. Em Martinez (2014) são revistas as metodologias aplicadas no GNSS, como é calculado o *offset* do tempo do sinal, e que o erro do relógio representa uma das maiores fontes de erro para navegações em tempo real. Martinez ainda apresenta resultados que comprovam que a estimativa do tempo está diretamente correlacionada com estimativas de orbitas. Upadhyay e Khatri (2015) desenvolveram um modelo matemático que remove os erros determinísticos dos satélites e dos receptores, sem o uso de efemérides, porém o modelo é mais indicado para satélites geoestacionários.

De acordo com os trabalhos existentes que envolvem o erro do relógio dos satélites, como os citados neste capítulo, é notada a relevância de pesquisas que envolvem este assunto, pois a qualidade do posicionamento via GPS depende diretamente dos erros que envolvem os relógios, tanto de satélites quanto de receptores.

2. REVISAO DE LITERATURA

2.1 Sistemas de Tempo

De acordo com Seeber (2003) e Monico (2008), existem três escalas de tempo que são essenciais para levantamentos a partir de satélites, são elas: o tempo atômico, o tempo dinâmico e o tempo que se baseia na rotação da Terra. Para entender escalas de tempo é preciso ter três conceitos bem definidos:

- a) Instante: Quando um evento ocorreu;
- b) Época: Instante em que determinado evento ocorre e este será adotado como origem;
- c) Intervalo: É o tempo decorrido entre dois instantes.

A unidade assumida para a contagem de tempo é o segundo, que a partir 13ª Convocação da Conferencia Geral de Pesos e Medidas em 1967, passou a seguir a seguinte definição: *“o segundo é a duração de 9.192.631.770 períodos de radiação correspondente ao nível de transição hiperfino no estado fundamental do Césio 133”* (SEEBER, 2003). Os sistemas de tempo também precisam de uma origem de sua referência. Essa origem normalmente é marcada com o advento de um fenômeno astronômico.

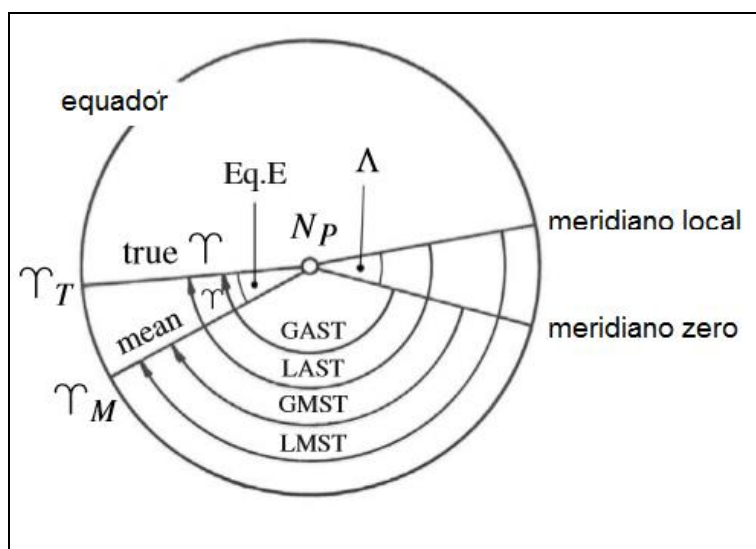
Ao longo dos anos foram desenvolvidos vários sistemas de tempo, que serão apresentados nas seções a seguir.

2.2.1 Tempo Sideral e Tempo Universal

Estes dois sistemas de tempo estão diretamente relacionados com a rotação da Terra, e são a forma mais natural de se medir o tempo. Se um

ângulo de rotação é medido em relação ao ponto vernal, tem-se o Tempo Sideral, que pode ser dividido em Tempo Sideral Aparente (TSA) – quando medido em relação ao ponto vernal aparente, e Tempo Sideral Médio (TSM) – quando considerado o ponto vernal médio. Já o Tempo Universal define-se pelo ângulo contado no sentido horário a partir do meridiano de Greenwich em relação a um Sol fictício que se move ao longo do equador com velocidade constante acrescido de 12h (MÔNICO, 2008). Ambas as contagens de tempo estão conectadas. De acordo com Seeber (2003), o tempo universal é uma forma especial do tempo sideral, onde a diferença entre eles está em torno de 4 minutos. A figura 1 exemplifica como são contadas as grandezas em relação ao meridiano de Greenwich (meridiano zero), meridiano local, ponto vernal médio (Y_m) e vernal aparente (Y_t), sendo GAST – *Greenwich Apparent Sideral Time*; LAST – *Local Apparent (or true) Sideral Time*; GMST – *Greenwich Mean Sideral Time*; LMST – *Local Mean Sideral Time* (TORGE e MÜLLER, 2012).

Figura 1 - Definição do tempo sideral



Fonte – Adaptado de Seeber 2003

Uma observação do tempo relacionada a uma estação localizada em alguma parte do globo, sofre de efeitos da posição verdadeira do polo, portanto, deve-se aplicar uma correção trazendo o polo para seu valor

convencional. Com isso, a longitude e por consequência a medida de tempo são afetadas. Depois de realizada a correção do polo, existem os efeitos de rotação da Terra que também devem ser considerados. A tabela 2 resume como são classificados os tempos universais.

Tabela 2 - Tempos Universais

UT0	É o tempo universal obtido das observações astronômicas.
UT1	É o tempo UT0 com a correção dos efeitos do polo.
UT2	É o tempo UT1 com a correção dos efeitos de rotação da Terra.

2.2.2 Tempo Atômico

Como já mencionado anteriormente, as grandezas que têm como base a rotação da Terra apresentam irregularidades. Sendo assim, o tempo universal torna-se insuficiente para ser um tempo padrão. A solução encontrada foi o relógio atômico, sendo o primeiro do mundo implantado na Inglaterra em 1955, baseado em átomo de Césio. A escala de Tempo Atômico Internacional (TAI), até 31 de dezembro de 1987 foi mantida pela *Time Section* do *Bureau International des Poids et Mesures*. Atualmente há inúmeros relógios atômicos espalhados pelo mundo, cujas leituras do tempo são realizadas em relógios "non-moving" ao nível do mar, para então ser feita uma média ponderada individual para cada relógio (Monico, 2008; Seeber, 2003).

A variável “n”, apresentada na equação 2.0, é conhecida como “*Leap Second*”, que é a diferença entre o UT1 e o UTC. Essa diferença entre as duas escalas deve ser menor ou igual a 0,9 segundos, caso contrário, um segundo é acrescentado ou diminuído do UTC, sendo que essa modificação sempre ocorre no primeiro dia de janeiro ou no primeiro dia de julho. A tabela 3 mostra os segundos que foram acrescentados a partir do ano de 1972.

Tabela 3 - Leap Seconds

Ano	jun/30	Dec/31	Ano	jun/30	Dec/31	Ano	jun/30	Dec/31	Ano	jun/30	Dec/31
1972	1	1	1994	1	0	1983	1	0	2005	0	1
1973	0	1	1995	0	1	1984	0	0	2006	0	0
1974	0	1	1996	0	0	1985	1	0	2007	0	0
1975	0	1	1997	1	0	1986	0	0	2008	0	1
1976	0	1	1998	0	1	1987	0	1	2009	0	0
1977	0	1	1999	0	0	1988	0	0	2010	0	0
1978	0	1	2000	0	0	1989	0	1	2011	0	0
1979	0	1	2001	0	0	1990	0	1	2012	1	0
1980	0	0	2002	0	0	1991	0	0	2013	0	0
1981	1	0	2003	0	0	1992	1	0	2014	0	0
1982	1	0	2004	0	0	1993	1	0	2015	1	0
									2016		1
TOTAL				27s							
				Atual TAI – UTC							
				37s							

Fonte - <<http://www.nist.gov/pml/div688/grp50/leapsecond.cfm>>

2.2.3 Tempo GPS

O tempo GPS vem do uso dos equipamentos de posicionamento global. Sua época de referência é a mesma usada pelo UTC. Porém, não existe o acréscimo dos *leap seconds*. Esse tempo deriva diretamente dos relógios atômicos que compõem o sistema GPS. As relações entre o UTC e tempo GPS podem ser encontradas nos boletins da USNO (*United State Naval Observatory*) e do BIPM (*Bureau international des poids et mesures*). Lembrando ainda que esse tempo é contado em semanas que variam de 0 até 1023, logo, cada ciclo contém 1024 semanas.

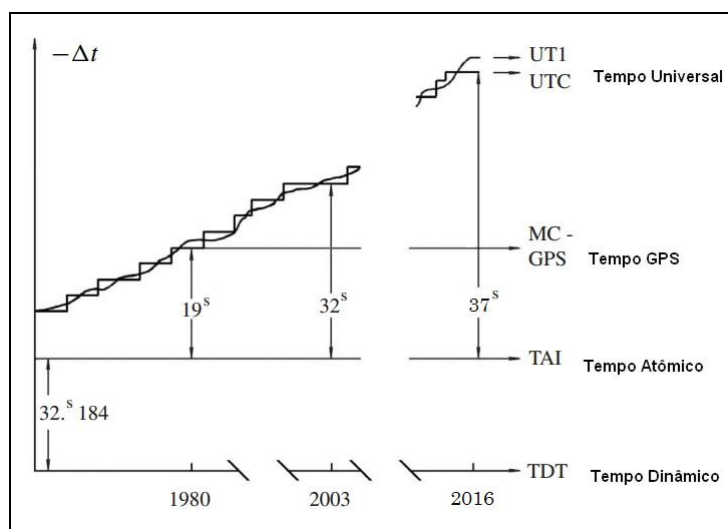
2.2.4 Tempo Dinâmico

A partir de observações de corpos celestes e com base em conceitos de dinâmica, é possível definir uma escala de tempo. Como essa escala tinha como base observações lunares e de outros astros, era conhecida como Tempo de Efemérides. Em 1977, para atender as condições relativísticas, seu nome foi mudado para Tempo Dinâmico, pois relógios na Terra sofrem do conceito da Relatividade Geral, onde estão sujeitos a variações de milissegundos devido ao campo gravitacional do Sol.

Para atender a correspondência com as outras escalas de tempo, o Tempo Dinâmico, também tem sua origem em 1 de janeiro de 1984, fazendo com que a diferença com o tempo atômico seja de 32,184 segundos. No ano de 1991, a IAU mudou o nome do Tempo Dinâmico para Tempo Terrestre. A palavra dinâmica foi omitida, pois nesse novo conceito não se usa teorias de dinâmica (SEEBER, 2003).

Na figura 3 é apresentado um resumo das escalas de tempo e como elas estão relacionadas.

Figura 3 - Escalas de tempo importantes

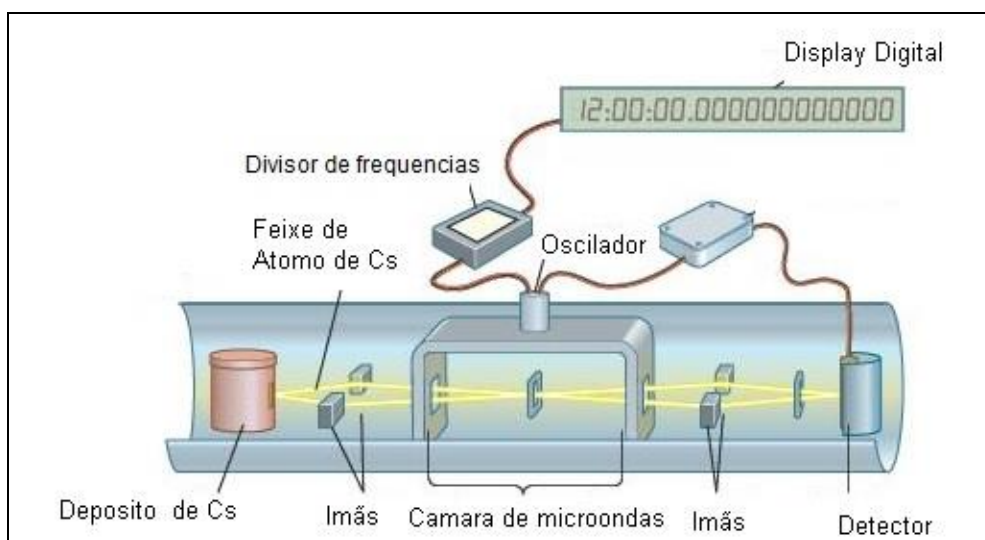


Fonte - Adaptado de Seeber (2003).

2.3 Relógios e Padrão de Frequências

Para possibilitar a obtenção de informações confiáveis sobre o tempo, são necessários relógios que sejam estáveis, ou seja, tenham uma oscilação de frequência que atenda um critério de estabilidade ao longo do tempo. Os relógios que atendem esta demanda são os atômicos, sendo que em seus interiores o equipamento mais importante é o oscilador. Com a observação dos ciclos no oscilador, equipamentos eletrônicos de contagem fazem a conversão para a unidade de segundos. Um exemplo esquemático de relógio atômico é apresentado na figura 4.

Figura 4 - Relógio Atômico



Fonte - Adaptada de <<http://global.britannica.com/technology/atomic-clock>>

De acordo com Seeder (2003), a performance de uma fonte de frequência pode ser definida de acordo com sua estabilidade e acurácia, onde acurácia é a capacidade da fonte da frequência ser “sintonizada” a uma outra frequência específica (frequência padrão). Com este conceito, pode-se calcular o desvio da frequência a partir da equação 2.1:

$$\Delta f = f - f_0 \quad (2.1)$$

Onde:

f – é a frequência da fonte,

f_0 – é a frequência padrão.

Em um conceito ideal, a frequência específica adotada por um relógio nunca iria mudar. Porém, é impossível obter esta estabilidade, devido aos erros sistemáticos e randômicos presentes nos componentes dos relógios, e ainda aos fatores ambientais que contribuem para que a frequência não seja estável. Com isso, o comportamento da frequência é descrito usualmente pela equação:

$$f(t) = f_0 + \Delta f + (t - t_0) \dot{f} + \tilde{f}(\Delta t), \quad (2.2)$$

onde:

Δf - desvio da frequência;

\dot{f} – deriva da frequência;

\tilde{f} - erro randômico da frequência;

t_0 – época de referência inicial;

t – época de referência qualquer.

A partir da equação 2.2, por meio de operações algébricas é possível chegar à equação 2.3 que representa o erro de sincronização do relógio:

$$\Delta t_i = T_i(t_0) + R_i(t - t_0) + \frac{D_i}{2}(t - t_0)^2 + \int_{t_0}^t y(t) dt, \quad (2.3)$$

onde:

$T_i(t_0)$ – tendência constante do tempo,

R_i – deriva do tempo,

D_i – termo quadrático (envelhecimento, taxa de deriva),

$y(t)$ – erro randômico da frequência.

Considerando a equação 2.3, é possível obter a equação do erro do relógio do satélite $\delta t^s(t)$ do GPS, equação 2.4, alterando os seguintes termos:

$$T_i = a_0,$$

$$R_i = a_1,$$

$$\frac{D_i}{2} = a_2.$$

Assim,

$$\delta t^s(t) = a_0 + a_1 \cdot (t - t_0) + a_2 \cdot (t - t_0)^2, \quad (2.4)$$

onde:

a_0 – tendência do relógio,

a_1 – deriva do relógio,

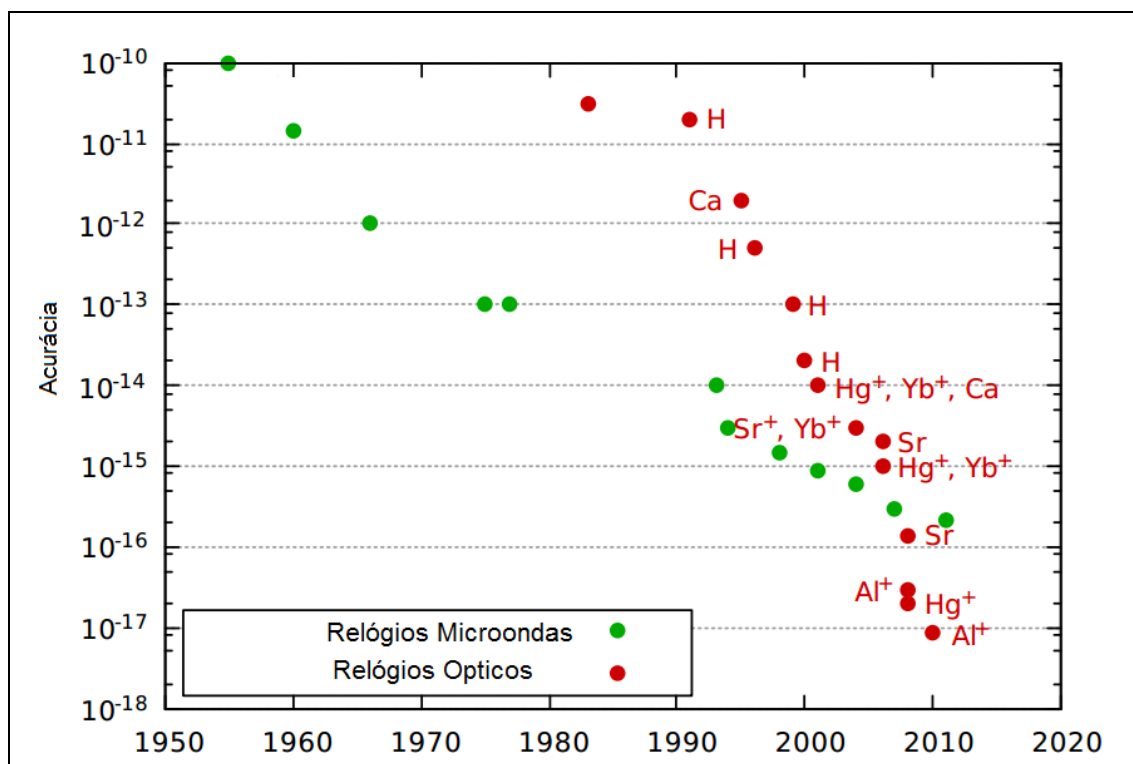
a_2 – taxa de deriva do relógio.

Para determinar a equação 2.4, os termos a_0 , a_1 e a_2 devem ser estimados, assim o erro do relógio depende diretamente destes parâmetros, conseqüentemente da incerteza em sua estimativa. São usados dados de estações espalhadas pelo globo, que dispõe de vários relógios, para comparar

valores encontrados dos parâmetros, ajudando assim na detecção de erros randômicos e obtendo uma estimativa inicial dos parâmetros confiável.

Os elementos que produzem as frequências dos relógios, são de extrema importância de análise, pois diferentes elementos contêm diferentes comportamentos. Por muito tempo relógios de Césio apresentaram-se como os mais estáveis, porém com a geração de relógios ópticos isto não é mais verdade (DELVA e LODEWYCK, 2013). Relógios atômicos de micro-ondas atingiram ao seu melhor desempenho, mesmo devido a obstáculos técnicos como, perturbações eletromagnéticas, alcançando acurácias na ordem de 10^{-16} . Com a geração dos relógios ópticos, novos elementos são usados, por exemplo: Hg^+ (Mercúrio), Al^+ (Alumínio), Yb^+ (Itérbio), Sr^+ (Estrôncio), Mg^+ (Magnésio). Esses relógios atômicos alcançaram estabilidade na ordem de 10^{-18} , e foram aprovados pelo BIPM, e possuem uma grande capacidade de contribuição para aplicações em Geodesia (DELVA e LODEWYCK, 2013; HINKLEY et al., 2013). Ainda, em 2015 e no início de 2016, foram realizados os primeiros testes de relógios ópticos no espaço, e acredita-se que esta tecnologia será bem desenvolvida, pois existem inúmeras aplicações como por exemplo: detectar mudanças na elevação na ordem de centímetros dentro do potencial gravitacional da Terra, para relógios com estabilidades na ordem de 10^{-18} (LEZIUS; WILKEN; DEUTSCH, 2016). A figura 5 apresenta a evolução ao longo do tempo dos relógios atômicos.

Figura 5 - Estabilidade dos elementos dos relógios



Fonte - Adaptado de Delva; Lodewyck (2013).

2.3.1 Transmissão do Sinal GPS

Conforme mencionado, o tempo GPS é caracterizado pelos relógios atômicos presentes no sistema GPS, e os relógios que mantêm as características desta escala de tempo encontram-se em uma estação de controle central na superfície terrestre (SEEBER, 2003; MONICO, 2008). Os relógios que estão a bordo dos satélites em órbita deveriam corresponder ao tempo GPS, porém isto não ocorre devido a erros em seus osciladores. Os erros no tempo de transmissão do sinal na ordem do nanosegundo significam erros na posição na ordem de 30 cm (HUANG et al., 2013). Sendo assim, uma correção deve ser efetuada, proporcionando uma compatibilidade do tempo de transmissão do sinal do satélite com a escala de tempo GPS. Para tal, utiliza-se a equação a seguir:

$$t_{GPS}^t = t_t^s - \delta t^s, \quad (2.5)$$

onde:

t_t^s - instante de transmissão na escala de tempo do satélite,

δt^s - erro do relógio do satélite.

Para os satélites GPS, a equação (2.4) é reescrita na forma:

$$\delta t^s(t) = a_0 + a_1 \cdot (t_{GPS} - t_{oc}) + a_2 \cdot (t_{GPS} - t_{ioc})^2. \quad (2.6)$$

O termo t_{GPS} na equação 2.6 pode ser substituído por t_t^s sem prejudicar a qualidade dos resultados (MONICO, 2008; GEMAEL e ANDRADE, 2004).

Então:

$$\delta t^s(t) = a_0 + a_1 \cdot (t_t^s - t_{oc}) + a_2 \cdot (t_t^s - t_{ioc})^2. \quad (2.7)$$

Da equação da pseudodistância (SEEBER, 2003; MONICO, 2008):

$$PD = c(t_r - t_{GPS}^T), \quad (2.8)$$

é possível, com uma boa aproximação, calcular a transmissão do sinal do satélite, na escala de tempo GPS, pela equação (BIDIKAR et al., 2014; MONICO, 2008; SEEBER, 2003):

$$t_{GPS}^t = t_r - \frac{PD}{c}, \quad (2.8.1)$$

onde t_r é o tempo de recepção do sinal do satélite na escala de tempo GPS, PD é a pseudodistância e c é a velocidade da luz no vácuo. Então a equação 2.7 é escrita na forma:

$$\delta t^s(t) = a_0 + a_1 \cdot (t_{GPS}^t - t_{oc}) + a_2 \cdot (t_{GPS}^t - t_{ioc})^2. \quad (2.9)$$

2.4 RINEX

A palavra RINEX é a abreviação para *Receiver Independent Exchange Format*, e foi desenvolvido no *Astronomical Institute of the University of Berne*, para facilitar a troca de dados GPS durante a primeira maior campanha realizada na Europa, que incluía mais de 60 receptores de quatro empresas diferentes (GURTNER, 1989).

O arquivo RINEX atualmente está na sua versão 3.03 e é basicamente dividido em: arquivo de observação, navegação e meteorológico, sendo que todos os arquivos começam com um cabeçalho que traz as informações gerais sobre os dados contidos no respectivo arquivo. Os dados mais importantes para esta pesquisa estão localizados no arquivo de navegação. Na sequência, as figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, o arquivo de navegação e de observação, na versão 2.10 e 2.11 respectivamente.

Figura 6 - Arquivo RINEX de navegação

```

1 | 2.10          N: GPS NAV DATA          RINEX VERSION / TYPE
2 | teqc 2015Jun23          20150713 22:00:08UTC   PGM / RUN BY / DATE
3 | Linux 2.4.21-27.ELsmp|Opteron|gcc -static|Linux x86_64|=+  COMMENT
4 | 2          NAVIGATION DATA          COMMENT
5 | CCRINEXN V1.6.0 UX CDDIS          13-JUL-15 17:31  COMMENT
6 | IGS BROADCAST EPHEMERIS FILE          COMMENT
7 | 9.3130D-09 2.2350D-08 -5.9600D-08 -1.1920D-07  ION ALPHA
8 | 9.8300D+04 1.4750D+05 -6.5540D+04 -4.5880D+05  ION BETA
9 | 9.313225746150D-10-8.881784197000D-16 233472 1853 DELTA-UTC: A0,A1,T,W
10 | 17          LEAP SECONDS
11 | Orbitas transmitidas adaptadas do arquivo brdc de orbitas  COMMENT
12 | Transmitidas disponibilizadas pelo IGS          COMMENT
13 |          a0          a1          a2          END OF HEADER
14 | 1 15 7 12 0 0 0.0 -3.017485141750D-06 5.684341886080D-13 0.000000000000D+00
15 | 4.500000000000D+01 1.140625000000D+01 4.771984585260D-09 3.132944263730D+00
16 | 5.792826414110D-07 4.461011500100D-03 7.733702659610D-06 5.153658960340D+03
17 | TOE 0.000000000000D+00 -8.195638656620D-08 -2.802152571870D+00 -5.401670932770D-08
18 | 9.627035976120D-01 2.324375000000D+02 4.077371744270D-01 -7.948187885630D-09
19 | 4.568047329290D-10 1.000000000000D+00 1.853000000000D+03 0.000000000000D+00
20 | 2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 5.122274160390D-09 4.500000000000D+01
21 | 0.000000000000D+00
22 | 2 15 7 12 0 0 0.0 5.776626057920D-04 2.387423592150D-12 0.000000000000D+00
23 | 6.800000000000D+01 1.375000000000D+01 5.287005944160D-09 -2.662558471050D+00
24 | 7.040798664090D-07 1.464664563540D-02 6.910413503650D-06 5.153585948940D+03
25 | 0.000000000000D+00 2.533197402950D-07 -2.840707931460D+00 -2.309679985050D-07
26 | 9.413669535180D-01 2.328750000000D+02 -2.249404115360D+00 -8.198555612180D-09
27 | 4.850201906770D-10 1.000000000000D+00 1.853000000000D+03 0.000000000000D+00
28 | 2.000000000000D+00 0.000000000000D+00 -2.048909664150D-08 6.800000000000D+01
29 | 0.000000000000D+00

```

Fonte: Adaptado de <ftp://geoftp.ibge.gov.br/RBMC/dados/2015/193/ufpr1931.zip>

Figura 7 - Arquivo RINEX de Observação

1	2.11	OBSERVATION DATA	M (MIXED)	RINEX VERSION / TYPE	
2	teqc 2015Jun23	RBMC	20150713 08:40:05UTC	PGM / RUN BY / DATE	
3	UFPR			MARKER NAME	
4	41610M002			MARKER NUMBER	
5	RBMC	IBGE/CGED		OBSERVER / AGENCY	
6	4651K03576	TRIMBLE NETRS	3.84	REC # / TYPE / VERS	
7	30336616	TRM55971.00	NONE	ANT # / TYPE	
8	3763751.6810	-4365113.8320	-2724404.7150	APPROX POSITION XYZ	
9	0.1000	0.0000	0.0000	ANTENNA: DELTA H/E/N	
10	1 1			WAVELENGTH FACT L1/2	
11	4 L1	C1	L2 P2	# / TYPES OF OBSERV	
12	15.0000			INTERVAL	
13	17			LEAP SECONDS	
14	CODIGO: 93970	Estacao: Curitiba		COMMENT	
15	2015 7	12 0 0	0.0000000	GPS	TIME OF FIRST OBS
16					END OF HEADER
17	15 7 12 0 0	0.0000000 0	19G07R12G30G17R13R03G28G11R24R22R02G05		
18			R23G13G20G15R14R04G10		
19	126182989.994 6	24011802.773	98324497.871 6	24011792.531	
20	115838868.657 6	21685250.922	90096934.480 7	21685252.184	
21	115367608.881 8	21953703.555	89896933.499 7	21953695.363	
22	110262666.457 8	20982260.875	85918919.387 8	20982250.691	
23	115077354.435 6	21550275.742	89504599.989 7	21550274.188	
24	113191111.849 7	21145049.523	88037509.277 7	21145047.852	
25	107993295.188 8	20550432.570	84150703.39246	20550421.449	
26	134930234.804 6	25676372.109	105140401.99343	25676361.105	
27	125544122.04615	23477352.547	97645297.216 5	23477352.164	
28	114782707.914 7	21502662.367	89275424.461 7	21502660.461	
29	114954334.264 7	21542385.688	89408921.597 7	21542384.836	
30	123828480.311 7	23563795.641	96489783.632 7	23563786.570	
31	111463791.078 8	20836973.648	86694074.574 6	20836975.613	
32	110938366.954 8	21110868.695	86445469.61046	21110858.102	

Pseudodistância

Cabeçalho

Fonte: Adaptado de <ftp://geofp.ibge.gov.br/RBMC/dados/2015/193/ufpr1931.zip>

O IGS também disponibiliza arquivos que contêm informações especificamente sobre relógios, como o *clk_30s*, que contêm dados de estações que estão na superfície terrestre e de relógios a bordo de satélites, com intervalo de 30 em 30 segundos. Basicamente, os dados contidos no arquivo são os valores do erro do relógio e seu desvio, se foi usado um satélite ou uma estação fixa, e a data seguida de hora, minuto e segundo. Como definido no padrão, a nomenclatura *AS* representa dados vindos de satélites, a sigla *AR* refere-se a uma estação. A figura 8 mostra os dados utilizados nesta pesquisa (GURTNER; RAY, 2010).

Figura 8 - Arquivo de correção do relógio

367	AR	UZHL	2016	06	26	00	00	0.000000	2	5.528304527579e-10	7.143364078210e-11
368	AR	VILL	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-3.889416655730e-04	3.373998875360e-11
369	AR	WAB2	2016	06	26	00	00	0.000000	2	4.481732900009e-07	3.260969745290e-11
370	AR	WHIT	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-1.643823168401e-05	5.544081838530e-11
371	AR	WILL	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-2.765789558811e-08	2.817865219380e-11
372	AR	WIND	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-3.623464376030e-04	5.190112165060e-11
373	AR	WSRT	2016	06	26	00	00	0.000000	2	9.724621547911e-06	3.328401523120e-11
374	AR	WTZR	2016	06	26	00	00	0.000000	2	3.900246119379e-08	4.308977551090e-11
375	AR	WUHN	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-4.350304103059e-09	3.358738190520e-11
376	AR	XMIS	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-1.983094808771e-08	8.364484405360e-11
377	AR	YAKT	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-7.306722216061e-08	5.180835304640e-11
378	AR	YAR2	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-9.646588349841e-05	2.316548236200e-11
379	AR	YELL	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-2.378644073671e-05	4.071224338190e-11
380	AR	YSSK	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-8.439386932101e-08	2.587128917550e-11
381	AR	ZAMB	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-5.145802050501e-08	4.088279532280e-11
382	AR	ZECK	2016	06	26	00	00	0.000000	2	1.705294629190e-04	5.378587789310e-11
383	AR	ZIMM	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-2.176921586131e-08	2.987022840980e-11
384	AS	G01	2016	06	26	00	00	0.000000	2	2.484995539259e-05	4.085101898200e-11
385	AS	G02	2016	06	26	00	00	0.000000	2	5.826723695530e-04	4.161752568780e-11
386	AS	G03	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-7.048152525751e-05	3.990216695890e-11
387	AS	G05	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-1.100516834320e-04	4.292672117660e-11
388	AS	G06	2016	06	26	00	00	0.000000	2	2.099488075110e-04	3.985189943010e-11
389	AS	G07	2016	06	26	00	00	0.000000	2	4.461023333320e-04	4.535775431440e-11
390	AS	G08	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-4.040781537191e-05	4.030465118850e-11
391	AS	G09	2016	06	26	00	00	0.000000	2	1.556558227420e-04	3.879009777080e-11
392	AS	G10	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-5.317070399021e-05	3.408892938230e-11
393	AS	G11	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-6.534533977260e-04	3.730485135300e-11
394	AS	G12	2016	06	26	00	00	0.000000	2	3.837246819730e-04	3.968232263150e-11
395	AS	G13	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-2.714171974371e-05	3.690845825430e-11
396	AS	G14	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-2.130727457681e-05	3.712504404180e-11
397	AS	G15	2016	06	26	00	00	0.000000	2	-3.168224983190e-04	3.760931927090e-11

Nomenclatura Estação ou satélite Data, hora, minuto, segundo Erro do relógio

Fonte: Adaptado de <https://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/product/1903/>

3. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias empregadas nesta pesquisa. Os materiais usados foram utilizados softwares de programação, como o Matlab e VisualStudio, sendo neste último utilizada a linguagem C#. Os dados usados na pesquisa são provenientes do IBGE e do IGS, encontrados respectivamente nos endereços eletrônicos: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmcpesq.shtm?c=9>> e <https://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html>.

3.1 Erro do relógio do satélite

Para alcançar objetivo de recalcular o erro dos relógios dos satélites, foram necessários cálculos preliminares, como o cálculo do erro dos relógios a partir dos dados originados do arquivo RINEX de navegação. Para os satélites com relógio de Rubídio, foi usada a equação 2.9 (parte linear) do capítulo anterior, novamente escrita na equação 3.0:

$$\delta t^s(t) = a_0 + a_1 \Delta t + a_2 \Delta t^2, \quad (3.0)$$

sendo Δt é o desvio do relógio (offset) do satélite.

O tempo das efemérides foi lido do arquivo RINEX, e o termo t_{GPS}^t , foi obtido através da equação 2.8.1, onde o termo t_r é dado pela equação 3.1 (MONICO, 2008).

$$t_r = (D \cdot 24 + hora)3600 + \min \text{uto} \cdot 60 + \text{segundo}. \quad (3.1)$$

Sendo D o dia da semana GPS, e as leituras de hora, minuto e segundo correspondentes aos instantes em que existem valores de pseudodistância. Os valores de a_0 , a_1 e a_2 são diretamente lidos do arquivo RINEX de navegação. Para os satélites em que o relógio atômico contém o elemento Césio, foi usada a equação do erro do relógio do satélite completa, com sua parte determinística (ou linear) e periódica, como mostra a equação 3.2 (SEDER 2008; HUANG et al. 2013).

$$\delta t^s = a_0 + a_1 \Delta t + a_2 \Delta t^2 + A_0 \text{sen}(\omega \Delta t + \varphi) + \varepsilon. \quad (3.2)$$

Sendo A_0 é a amplitude, ω a frequência angular, φ a desvio da fase (*phase shift*), ε o ruído no processo. Para a amplitude, foi adotado o trabalho Martinez (2014), que apresenta um estudo sobre as amplitudes dos elementos dos relógios dos satélites. A frequência angular é calculada através da equação

3.3, onde o período do termo senoidal é igual ao período orbital (SENIOR et al., 2008).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} . \quad (3.3)$$

Sendo T o período orbital, e é determinado pela 3ª lei de Kepler, ou seja:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}} , \quad (3.4)$$

onde:

a – semieixo maior do elipsoide;

GM - constante geogravitacional.

O desvio da fase φ é calculado para cada satélite (BRODEBAUER e WEBER, 2004; SEEBER, 2003), e com isso o erro do relógio do satélite de Césio pode ser calculado. Desta forma, na rotina de cálculo implementada, os erros foram calculados para todos os momentos em que existiam leituras de pseudodistância e seus parâmetros de correção correspondentes. Os valores dos erros serão usados como observações no ajustamento implementado.

3.2 Ajustamento de observações

Na busca de uma melhora na qualidade dos parâmetros de correção dos relógios, foi aplicado um ajustamento nas observações, usando o modelo paramétrico. Desta forma, os erros do relógio calculados anteriormente a partir dos coeficientes contidos no arquivo RINEX, entram como observações (vetor L_b), e os parâmetros do ajustamento são correspondentes aos valores de correção dos relógios a_0, a_1 . O valor do a_2 , não foi ajustado pois ele se mantém zero durante todo o tempo de rastreamento no arquivo RINEX de navegação.

Na montagem da matriz jacobiana, as derivadas são: $\frac{\partial \delta t^s}{\partial a_0} = 1$ e

$\frac{\partial \delta t^s}{\partial a_1} = \Delta t$, e a dimensão da matriz depende de quantas vezes os parâmetros

mudam de valor no arquivo “.n”. A equação 3.5 demonstra como a matriz jacobiana foi montada.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t_1 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 1 & \Delta t_2 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 1 & \Delta t_n & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t_{n+1} & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t_{n+2} & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & \vdots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t_m & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

A matriz dos pesos foi adotada uma matriz identidade. Desta forma foi efetuado o cálculo do ajustamento para todos os satélites presentes nos dias das observações. Sendo assim, a partir dos novos parâmetros ajustados, os erros dos relógios dos satélites foram recalculados.

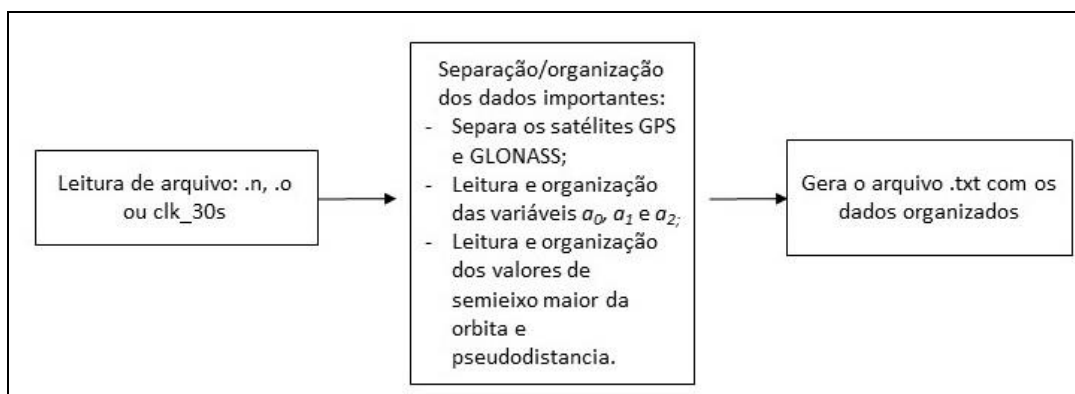
3.3 Desenvolvimento VisualStudio

O intuito do desenvolvimento nesta plataforma foi para a manipulação dos dados encontrados no arquivo RINEX. Em uma primeira fase, foi desenvolvida uma rotina que proporcione a leitura das extensões “.o” e “.n” do RINEX. O código programado na rotina consiste na leitura apenas das informações necessárias para a análise sobre os erros dos relógios. Para o arquivo de observação RINEX, as leituras realizadas foram: pseudodistância, hora, minuto, segundo e número do satélite, ainda, foram apenas escolhidas as informações referentes aos satélites GPS. Para o arquivo de navegação, os dados de leitura foram: hora, minuto, segundo, número do satélite, semieixo

maior, tempo de efemérides e os parâmetros de correção dos relógios – a_0 , a_1 e a_2 . Outra rotina importante desenvolvida é a que realiza a leitura do arquivo *clk_30s*, que contém dados sobre os relógios de estações e satélites. Neste código foram escolhidas as informações referentes aos relógios dos satélites, a data, o número do satélite e os valores do erro do relógio.

Ao todo então foram usadas três rotinas no Visualstudio, sendo que ao final de cada, um arquivo em formato .txt foi gerado, contendo apenas as informações necessárias para dar continuidade a pesquisa. A figura 9 apresenta um pequeno fluxograma de como as ações da rotina são separadas.

Figura 9 - Fluxograma VisualStudio



3.4 Desenvolvimento Matlab

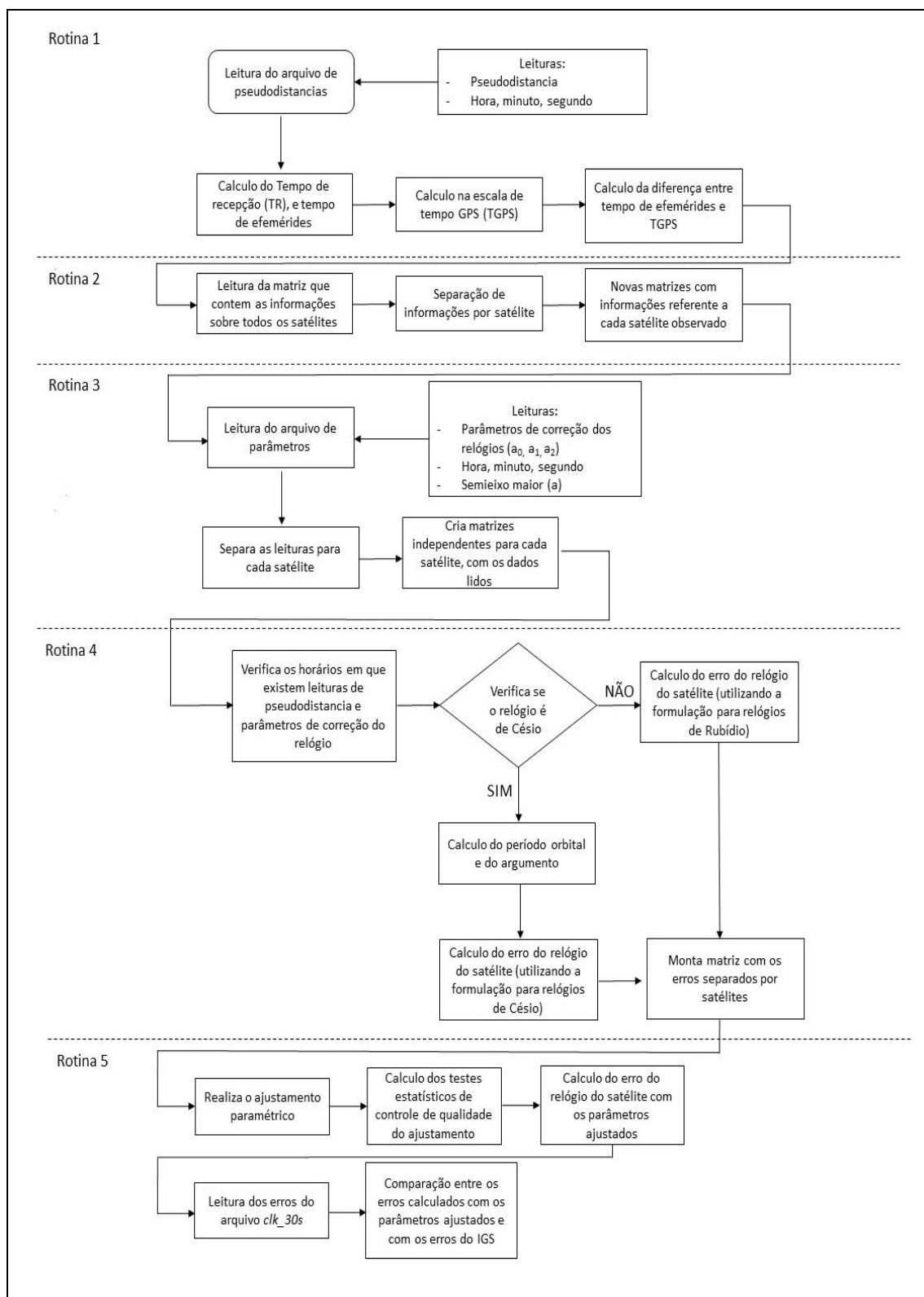
No software Matlab foi dada continuidade a programação das rotinas para a análise dos dados provenientes dos arquivos RINEX. Para facilitar a leitura dos dados gerados pelas rotinas do VisualStudio e para uma melhor organização do trabalho, foram separados em cinco arquivos no Matlab (Figura 10). O primeiro arquivo consiste em realizar a leitura do arquivo .txt (gerado no VisualStudio) que contém as informações das pseudodistâncias, hora, minuto e segundo, coletadas do arquivo RINEX “.o”. A partir disto, o tempo de recepção do sinal, o tempo de efemérides e o tempo de recepção na escala de tempo

GPS, foram calculados. A próxima rotina usada apenas separa, por satélite, as informações lidas na primeira, facilitando a organização da programação.

A terceira rotina programada consiste na leitura dos dados do arquivo .txt que contém os parâmetros dos relógios, originais do arquivo RINEX “.n”. Junto com os parâmetros, são lidos hora, minuto, segundo e semieixo maior. Ainda também as informações são separadas por satélite, pois no próximo passo da programação as matrizes contendo informações do arquivo .n e do .o serão relacionadas. Sendo assim, a quarta rotina integra as rotinas anteriores, são usados os dados lidos para efetuar os cálculos necessários para achar o erro do relógio para cada satélite da constelação GPS. Foi programado para que a rotina efetuasse uma diferenciação no cálculo, dependendo de qual elemento está presente no oscilador, ou Rubídio ou Césio. Com isto, a última rotina programada efetua o ajustamento paramétrico nos dados, visando estimar novos parâmetros de correção para os relógios presentes nos satélites.

Para que fosse possível a comparação das informações geradas a partir dos cálculos, foi programada também uma rotina que lê os dados gerados pelo VisualStudio, em relação as leituras do arquivo *clk_30s*. A figura 10 apresenta o fluxograma dos desenvolvimentos no Matlab.

Figura 10 - Fluxograma Matlab



4. EXPERIMENTOS REALIZADOS E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos realizados para determinar os novos parâmetros (parâmetros ajustados) de correção dos relógios dos satélites GPS. A aquisição dos dados RINEX de rastreamento, foram de estações da RBMC, a tabela 4 apresenta as estações selecionadas.

Tabela 4 - Estações RBMC

Estação	Cidade/Estado	Antena
UFPR	Curitiba-PR	ZEPHYR GNSS GEODETIC MODEL 2 (TRM55971.00)
RECF	Recife-PE	GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)
SMAR	Santa Maria- RS	GNSS CHOKE RING (TRM59800.00)
MSCG	Campo Grande-MS	ZEPHYR GNSS GEODETIC MODEL 2 (TRM55971.00)

A metodologia apresentada no capítulo anterior, foi aplicada para os dados das estações da tabela 4, e os resultados foram comparados com os dados do IGS. Foram usados apenas dados provenientes de satélites GPS, no intervalo dos dias 26 de junho de 2016 até o dia 03 de julho de 2016 e os novos parâmetros foram calculados para todos os satélites, utilizando dados de todas as estações da tabela 4. As tabelas 5.a e 5.b apresentam os satélites em atividade na época da aquisição dos dados.

Tabela 5a - Satélites GPS

Plano	SVN	PRN	Bloco	Relógio
D	63	1	IIF	RB
D	61	2	IIR	RB
E	69	3	IIF	RB
E	50	5	IIR-M	RB
D	67	6	IIF	RB
A	48	7	IIR-M	RB
C	72	8	IIF	CS
F	68	9	IIF	RB
E	73	10	IIF	RB
D	46	11	IIR	RB
B	58	12	IIR-M	RB
F	43	13	IIR	RB
F	41	14	IIR	RB

Tabela 5b - Satélites GPS

Plano	SVN	PRN	Bloco	Relógio
F	55	15	IIR-M	RB
B	56	16	IIR	RB
C	53	17	IIR-M	RB
E	54	18	IIR	RB
C	59	19	IIR	RB
B	51	20	IIR	RB
D	45	21	IIR	RB
E	47	22	IIR	RB
F	60	23	IIR	RB
A	65	24	IIF	CS
B	62	25	IIF	RB
B	71	26	IIF	RB
C	66	27	IIF	RB
B	44	28	IIR	RB
C	57	29	IIR-M	RB
A	64	30	IIF	RB
A	52	31	IIR-M	RB
F	70	32	IIF	RB

Para o cálculo dos erros dos relógios dos satélites com relógios atômicos de Césio, foram realizados experimentos na parte periódica da equação 3.2. A partir de testes com diferentes funções, como por exemplo combinações de seno e cosseno, apenas a função cosseno, combinações de seno+seno, cosseno+cosseno. O resultado que se apresentou satisfatório, ou seja, coerente com os apresentados pelo IGS, foi o uso de uma função exponencial, descrito na equação 3.6:

$$\delta t^s = a_0 + a_1 \Delta t + a_2 \Delta t^2 + A_0 \text{sen}(\omega \Delta t + e^{\omega \Delta t} + \varphi) + \varepsilon. \quad (3.6)$$

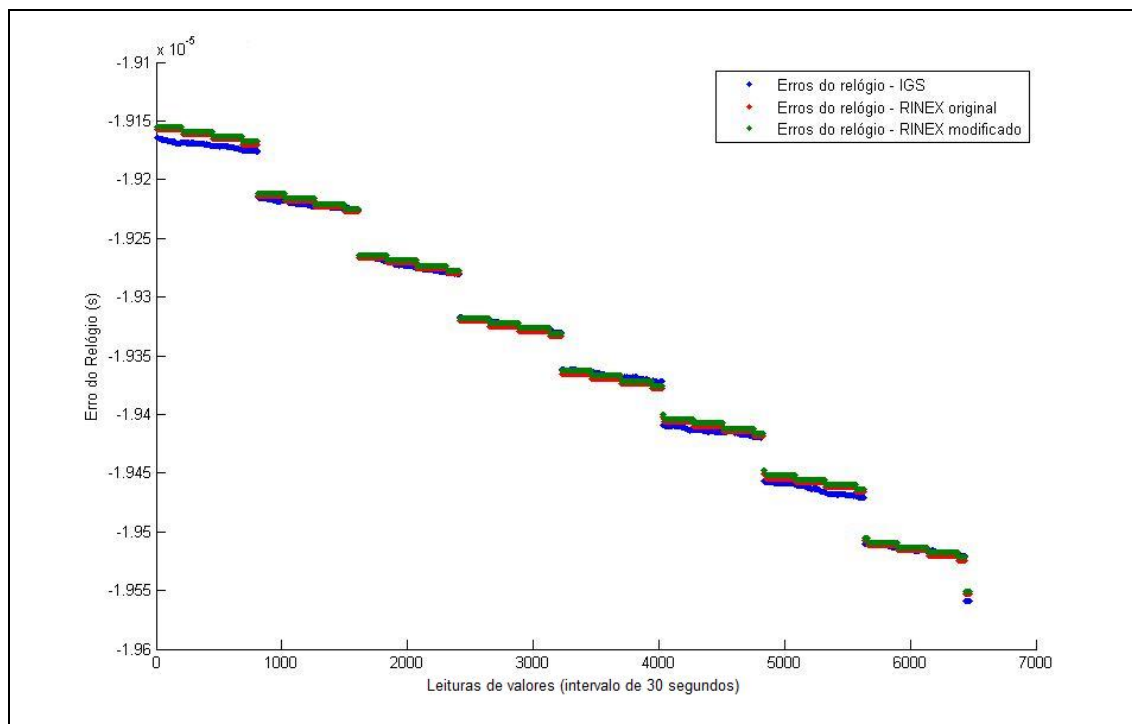
O resultado dos ajustamentos realizados foi similar entre todos os satélites, tendo o vetor de resíduos com um valor na ordem de 10^{-14} e a matriz de variância e covariância dos parâmetros mostrou baixa correlação dos mesmos.

Para uma melhor visualização dos dados obtidos, foram gerados alguns gráficos para representar o comportamento dos erros dos relógios dos

satélites. Como existem 31 satélites e os gráficos são semelhantes, apenas serão apresentadas as figuras dos satélites que contém o elemento Césio, PRN8 e PRN24, e dentre os que contem rubídio o PRN16 e PRN5.

Uma primeira avaliação feita foi em relação ao comportamento do erro do relógio em relação a semana de aquisição dos dados e a figura 11 apresenta o resultado para o satélite PRN24 estimado com os dados da estação UFPR.

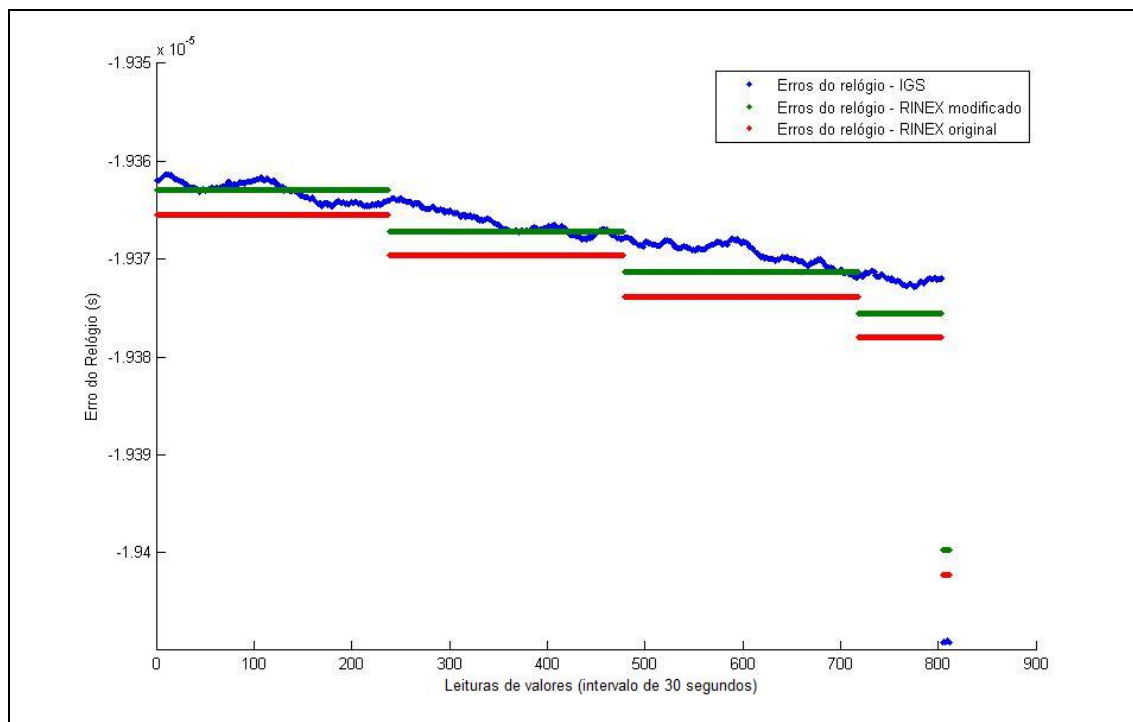
Figura 11 - Comportamento dos erros do relógio - PRN24 (Cs) - Estação UFPR - Dia 26 de junho a 3 de julho



Para facilitar, os erros calculados a partir dos parâmetros ajustados serão chamados de erros do relógio modificado. Por sua vez, os erros dos relógios com os parâmetros obtidos diretamente do RINEX, serão chamados de original. Nos eixos representados na figura tem-se nas abscissas o tempo de cada leitura, ou seja, a cada 30 segundos e no eixo das ordenadas o erro do relógio. Na figura 11 foi possível detectar que no início da semana existe uma maior diferença entre os valores do IGS e os calculados tanto o modificado,

quanto o original. O cálculo do erro do relógio usando a equação 3.6, mostrou-se adequado para alguns dias do rastreo, como apresentado na figura 12.

Figura 12 - Comportamento dos erros do relógio - PRN24 (Cs) - Estação UFPR - 30 de junho de 2016

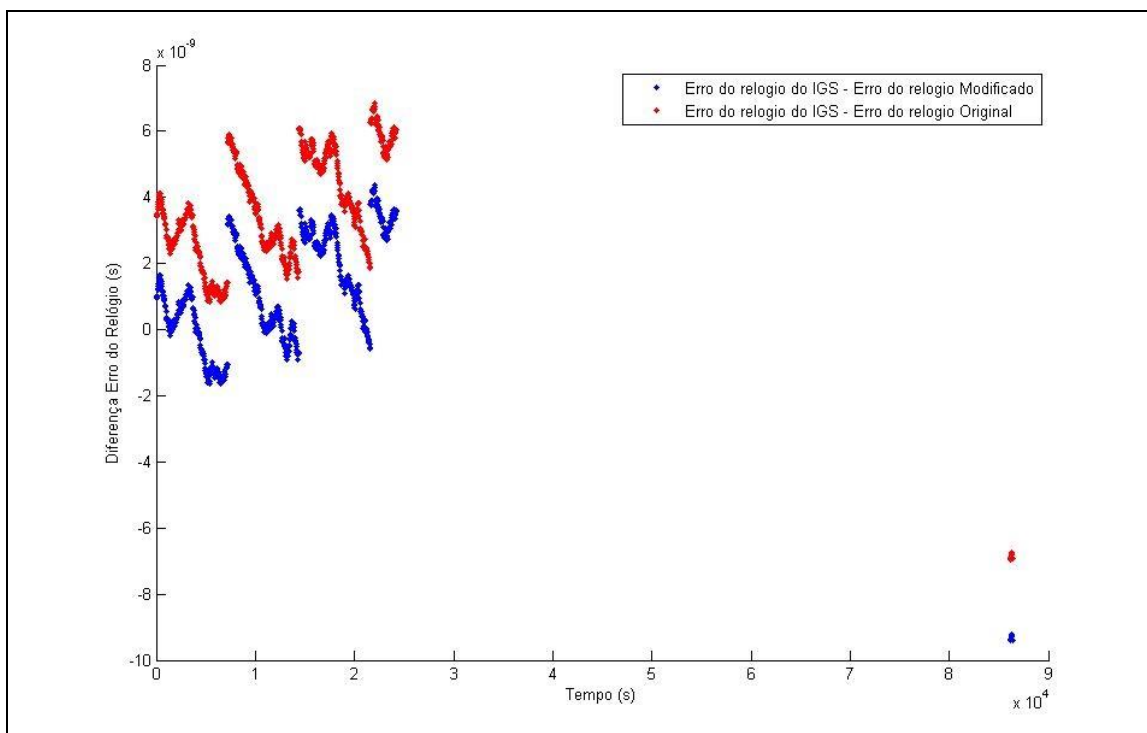


Na Figura 12, observa-se que tanto os erros dos relógios originais como os modificados apresentam-se em forma de “patamares”, e isso deve-se ao fato de que no RINEX de transmissão os parâmetros de correção dos erros dos relógios dos satélites são constantes por 2 horas, ou seja, os mesmos valores desses erros são usados por exemplo, da 00h00min00s até as 1h59min45seg. Sendo assim, como o cálculo dos parâmetros ajustados é feito a partir dos dados do RINEX de transmissão, então, o comportamento é semelhante, aparecendo constante a cada intervalo de duas horas.

A figura 13 mostra as diferenças entre o erro do relógio modificado em comparação com o erro do IGS, sendo o eixo das abscissas representando o tempo em segundos, e as ordenadas a diferença entre os erros do IGS e os erros modificados. As diferenças apresentadas encontram-se na ordem de 10^{-9} ,

sendo alguns valores próximos de zero, apresentando então, neste caso, valores mais próximos do IGS do que o processamento com dados do arquivo original. Ainda, existe um espaço na figura 13 que não contém pontos, isto se deve ao fato de não ter rastreamento do sinal GPS neste intervalo.

Figura 13 - Diferença entre o erro do relógio do IGS e erro do relógio modificado - PRN24 (Cs) - Estação UFPR - 30 de junho de 2016



Ainda, para verificar o comportamento do mesmo satélite, no mesmo dia, porem em uma estação diferente, foi usada a estação de Campo Grande.

O resultado para a estação de Campo Grande (Figura 14), tem um comportamento similar com o encontrado para a estação UFPR, onde o erro calculado através dos novos parâmetros ajustados aproxima-se do IGS. A diferença entre o erro do IGS e o calculado, mostra que existem valores próximos de zero e tendem a seguir o mesmo comportamento cada vez em que o parâmetro muda.

Figura 14 - Comportamento dos erros do relógio - PRN24 (Cs) - Estação Campo Grande - 30 de junho de 2016

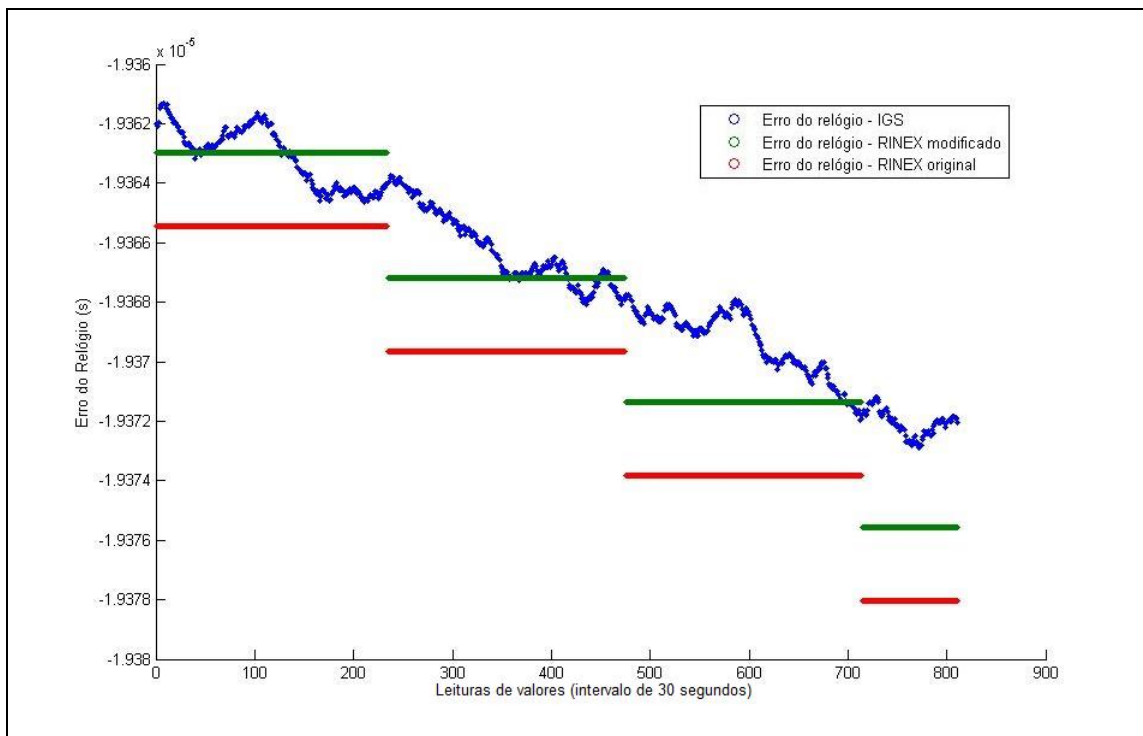
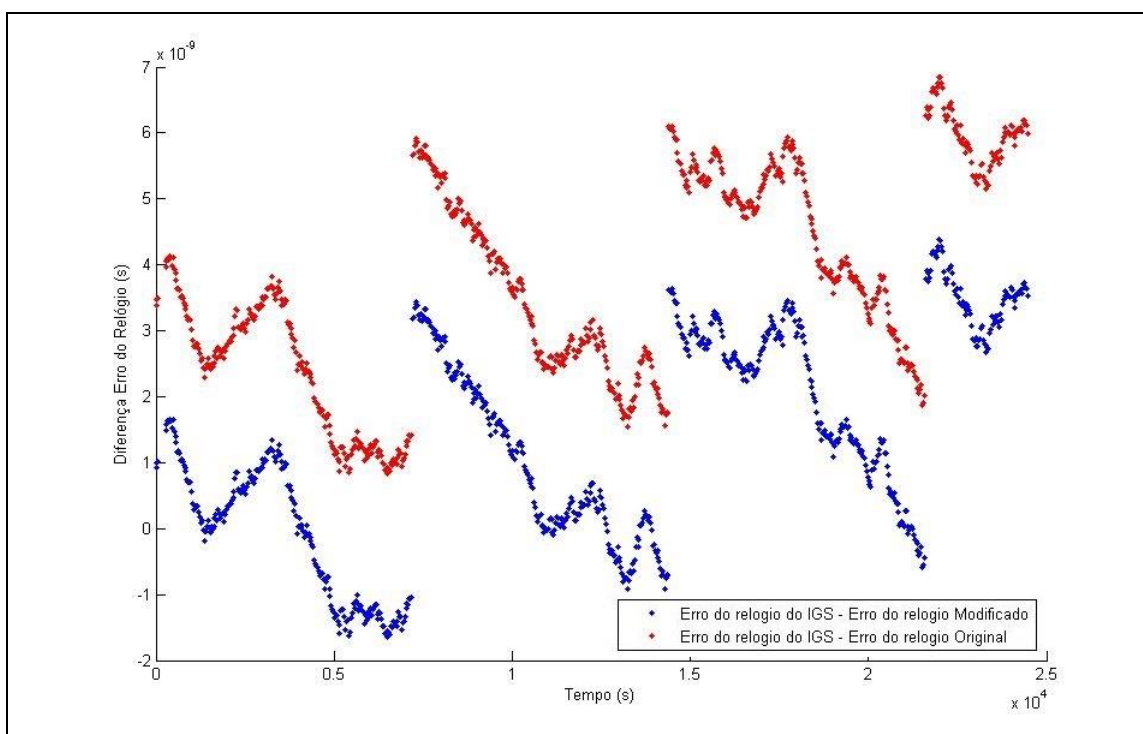
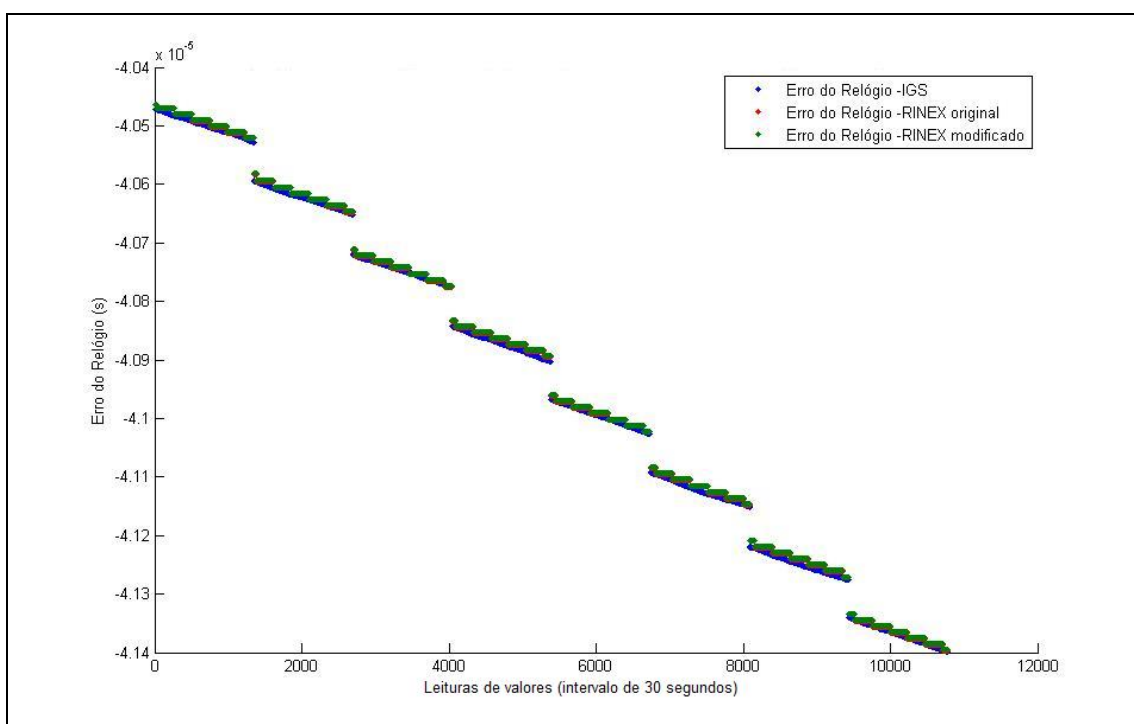


Figura 15 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN24 - Estação Campo Grande - 30 de junho de 2016

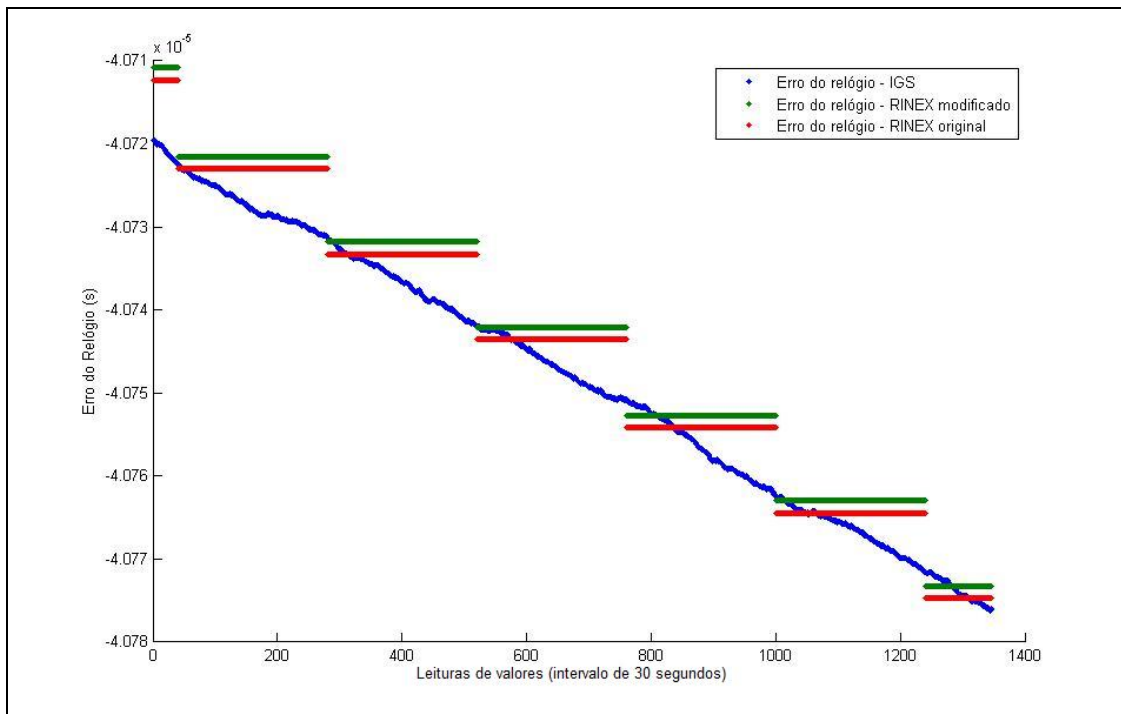


A análise foi feita para o PRN8, também com relógio de Césio. O erro do relógio modificado em alguns momentos afastou-se do IGS, porém ainda assim apresenta valores de diferença também na ordem de 10^{-9} . A figura 16, apresenta os dados para a semana escolhida de aquisição de dados, desta vez para estação RECIFE.

Figura 16 - Comportamento entre os erros do relógio - PRN8 (Cs) - Estação Recife - Dia 26 de junho a 3 de julho

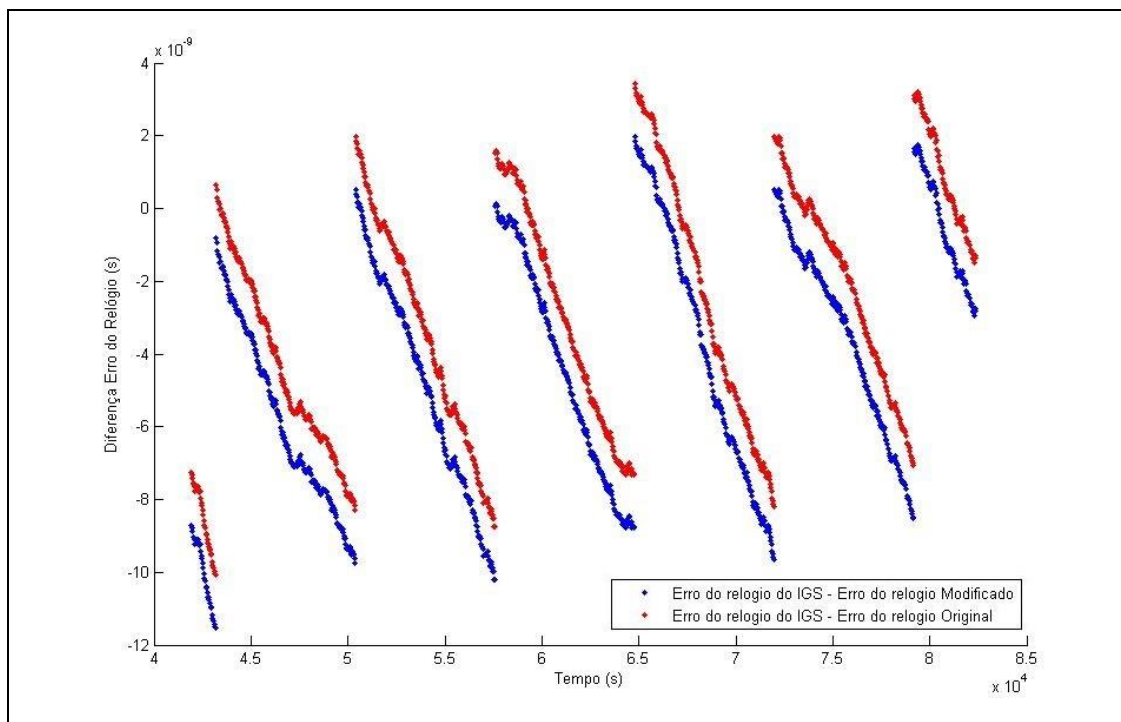


Na figura 17 pode ser obtida uma melhor visualização do comportamento do erro do relógio, sendo para um dia de rastreo.

Figura 17 - Comportamento dos erros do relógio - PRN8 (Cs) - Estação Recife - 28 de junho de 2016

As diferenças encontradas entre o valor do erro do relógio modificado e o fornecido pelo IGS, mantem-se em valores de 10^{-9} , assim como para o erro do PRN24, porém nota-se que para o período de duas horas onde cada parâmetro é constante, o erro aumenta e tendo assim, o mesmo comportamento toda vez em que os parâmetros de correção do relógio mudam de valor.

**Figura 18 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN8 (Cs)
- Estação Recife - 28 de junho de 2016**



O comportamento dos erros do relógio também foi avaliado para os satélites que contêm no oscilador de seu relógio o elemento Rubídio. Para esses tipos de relógio, os parâmetros calculados através do ajustamento tiveram uma mudança em relação aos originais na ordem de 10^{-17} . A figura 19 mostra os erros do IGS comparados com os erros do relógio modificado para o satélite de Rubídio PRN16 para a semana de aquisição dos dados. Na figura 20 é mostrado para o dia 2 de julho, mesmo que a escala do eixo das ordenadas (erro do relógio) tenha mais casas decimais, ainda assim não se apresentam diferenças gráficas entre o erro do relógio original e o modificado. Entretanto, existe uma diferença numérica entre estes valores, e a partir disto é avaliada a diferença entre o erro do relógio modificado com o do IGS, figura 21.

Figura 19 - Comportamento dos erros do relógio - PRN16 (Rb) - estação UFPR - Dia 26 de junho a 3 de julho

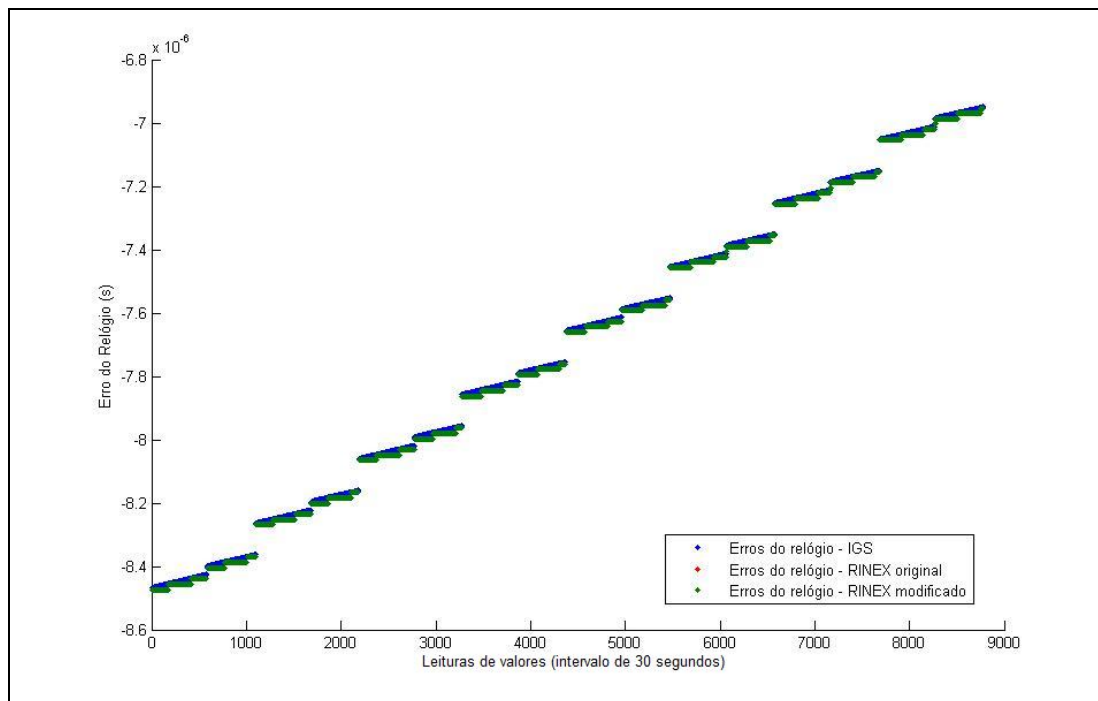


Figura 20 - Comportamento dos erros do relógio - PRN16 (Rb) - Estação UFPR - 02 de julho

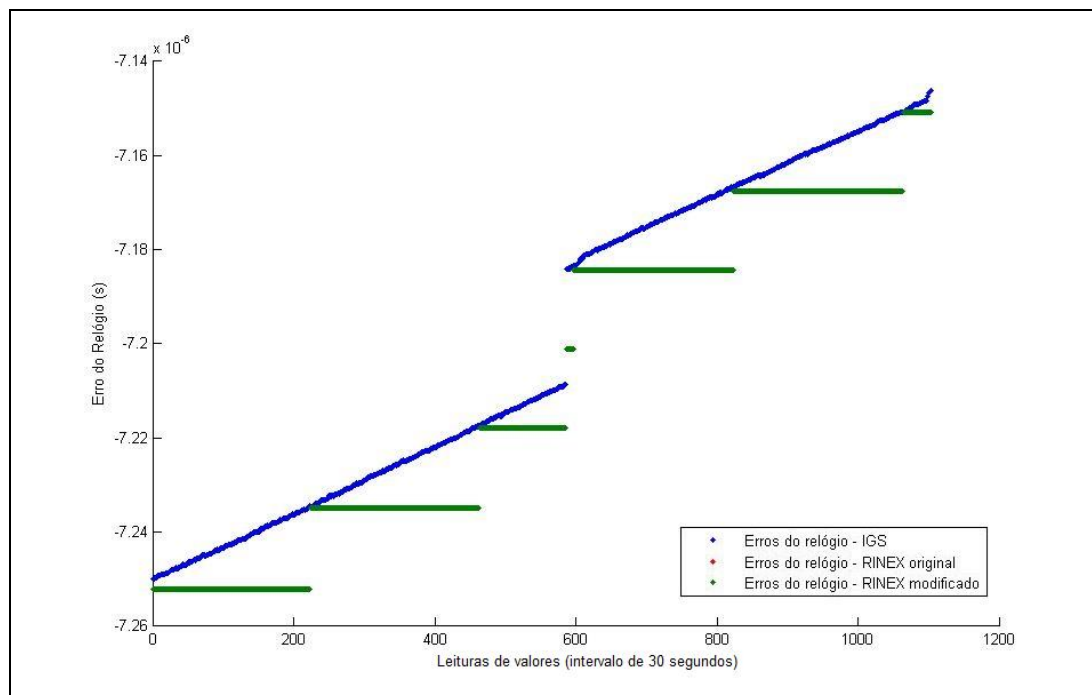
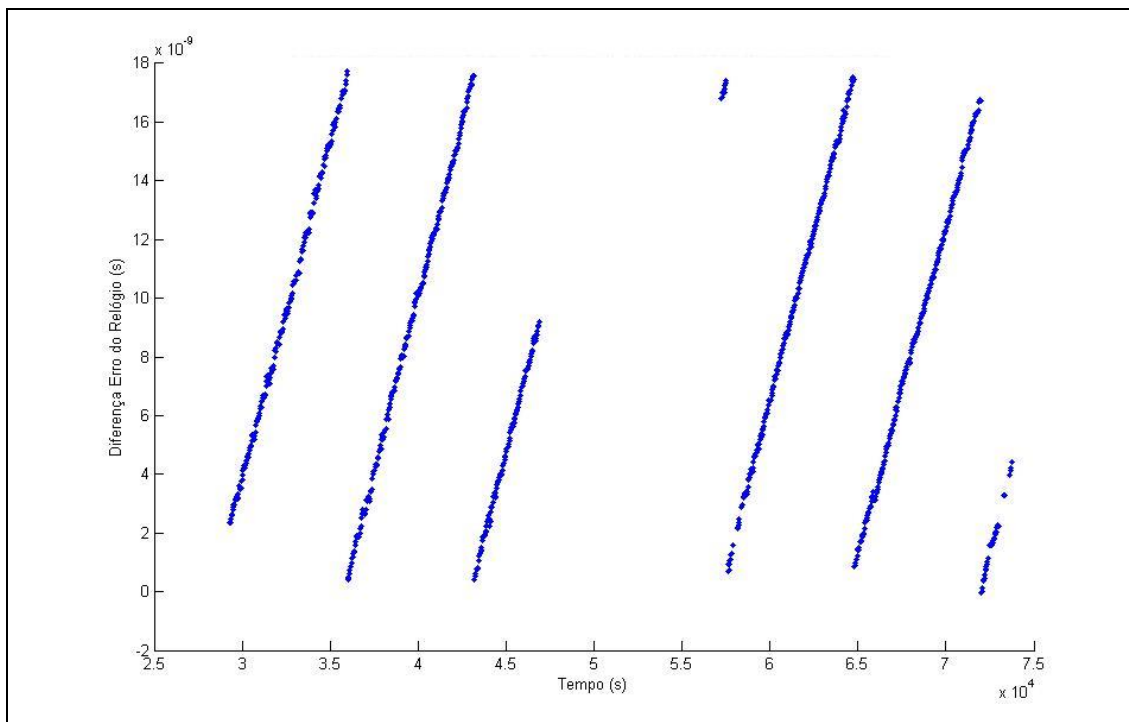


Figura 21 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN16 (Rb) - Estação UFPR - 02 de julho de 2016



Na figura 21, o comportamento da diferença, segue o mesmo padrão apresentado da diferença satélite PRN8, ou seja, existem valores próximos do zero na diferença, isto é, no início de cada intervalo de duas horas. Nesta figura, não foram inseridas as diferenças dos valores do IGS com os advindos dos dados originais, pois a diferença gráfica também é mínima. Na figura 20, existe um “salto” do valor do erro do relógio. Isso se deve a não existirem dados de rastreamento por um determinado intervalo de tempo.

As figuras 22 e 23 apresentam o mesmo dia de rastreamento do PRN16 das figuras 20 e 21, porém agora para a estação de Santa Maria. Como esperado, o comportamento do erro do relógio para esta estação, é semelhante com o que ocorre na estação UFPR, assim como a diferença entre os erros, segue também o mesmo comportamento, sendo próxima de zero, aumentando ao longo do tempo e então, repetindo este padrão cada vez que o parâmetro do relógio muda. Na figura 22 também existe um intervalo sem rastreamento de dados, assim apresentando novamente um salto no erro do relógio.

Figura 22 - Comportamento dos erros do relógio - PRN16 (Rb) - Estação St. Maria - 02 de julho de 2016

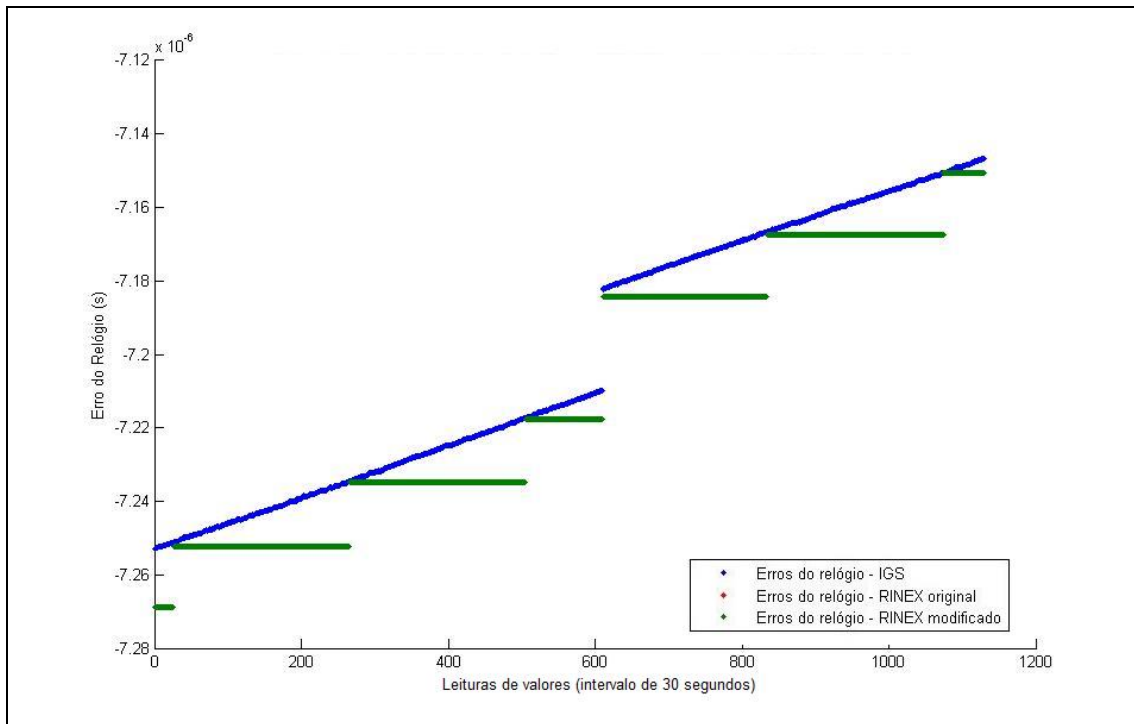
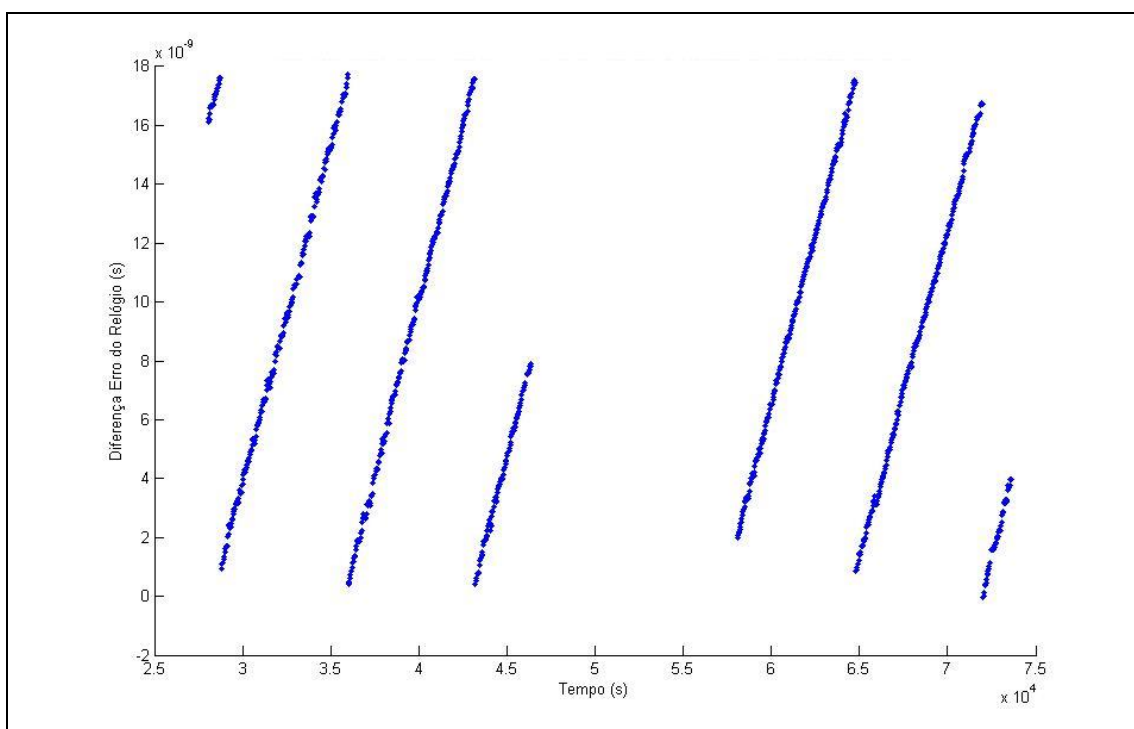
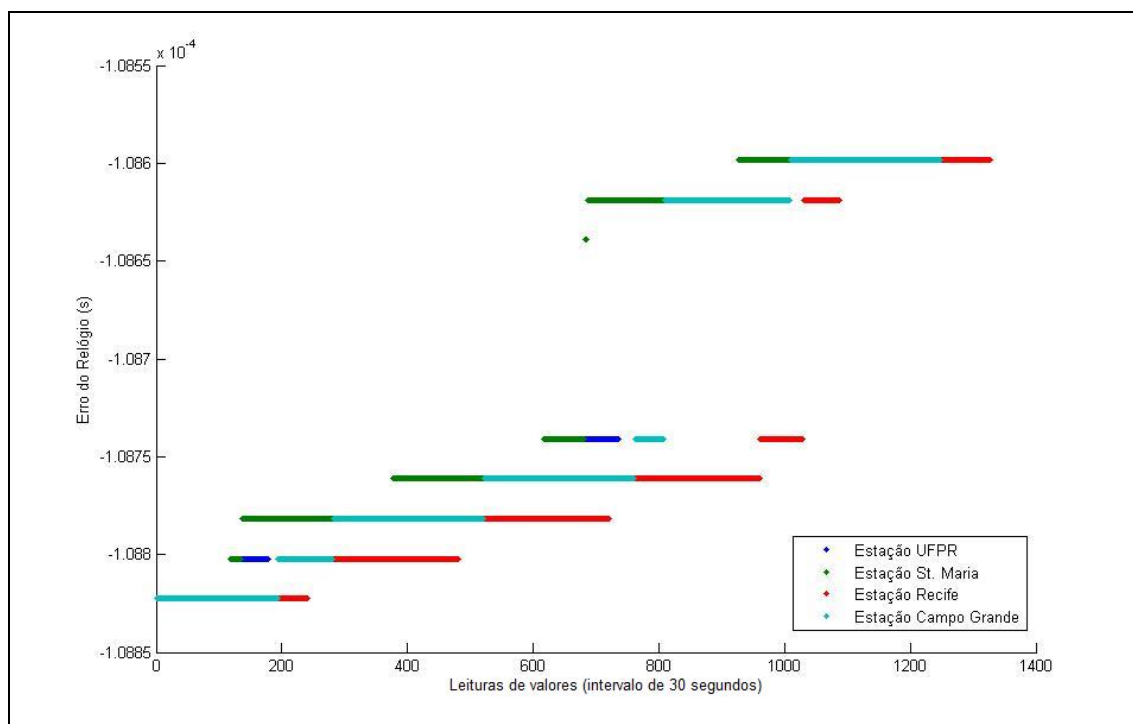


Figura 23 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN16 (Rb) - Estação St. Maria - 02 de julho de 2016



Foi avaliado graficamente também, o erro do relógio modificado dos satélites compreendendo todas as estações. A figura 24 apresenta o erro do relógio do PRN5, notando-se uma continuidade dos erros, mostrando que o erro do relógio independe da estação e do modelo da antena presente no receptor, em que está sendo efetuado os cálculos. Os erros se sobrepõem quando existe rastreo em duas ou mais estações, e são contínuos quando existe rastreo em apenas uma estação.

Figura 24 - Erros do relógio modificado - PRN5 – Estações: UFPR/Recife/Campo Grande/ St. Maria - 01 de julho de 2016



Como já mencionado, a metodologia foi aplicada para todos os satélites, realizando os cálculos de todas as estações (tabela 4) escolhidas. Nos Apêndices constam mais figuras relativas a outros satélites em diferentes estações.

A seguir, serão apresentados valores dos erros estimados em comparação com os erros do IGS em forma de tabela. A tabela 6 apresenta os erros do relógio do IGS, os erros calculados com os parâmetros ajustados e a

diferença entre eles. Nota-se que a diferença diminui, no intervalo de tempo apresentado na tabela 6, condizendo com a figura 13.

Tabela 6 - PRN24 Erros do relógio – Estação UFPR – dia 30 de junho

Hora	Min.	Seg.	Erro do relógio IGS (s)	Erro do relógio modificado (s)	Diferença (s)
0	10	30	-0,0000193618147675	-0,0000193629859990	-1,17123E-09
0	11	0	-0,0000193618409018	-0,0000193629859989	-1,1451E-09
0	11	30	-0,0000193619511036	-0,0000193629859989	-1,0349E-09
0	12	0	-0,0000193619326453	-0,0000193629859989	-1,05335E-09
0	12	30	-0,0000193619709611	-0,0000193629859989	-1,01504E-09
0	13	0	-0,0000193620324862	-0,0000193629859988	-9,53513E-10
0	13	30	-0,0000193620651410	-0,0000193629859988	-9,20858E-10
0	14	0	-0,0000193621195517	-0,0000193629859988	-8,66447E-10
0	14	30	-0,0000193622395544	-0,0000193629859988	-7,46444E-10
0	15	0	-0,0000193622819754	-0,0000193629859987	-7,04023E-10
0	15	30	-0,0000193622800392	-0,0000193629859987	-7,0596E-10
...

A tabela 7 apresenta os valores para o PRN16, da estação de Santa Maria, são apresentados valores onde o tempo de rastreo está mais avançado. Nota-se na coluna da diferença como o valor vai aumentando, com o tempo de rastreo.

Tabela 7 – PRN16 Erros do relógio – Estação St. MARIA – dia 2 de julho

Hora	Min.	Seg.	Erro do relógio IGS (s)	Erro do relógio modificado (s)	Diferença (s)
16	55	30	-0,0000071754736703	-0,0000071842225356	-8,7E-09
16	56	0	-0,0000071754647182	-0,0000071842225355	-8,8E-09
16	56	30	-0,0000071754697215	-0,0000071842225354	-8,8E-09
16	57	0	-0,0000071754366062	-0,0000071842225353	-8,8E-09
16	57	30	-0,0000071752916794	-0,0000071842225352	-8,9E-09
16	58	0	-0,0000071751892609	-0,0000071842225351	-9E-09
16	58	30	-0,0000071751174392	-0,0000071842225350	-9,1E-09
16	59	0	-0,0000071750307859	-0,0000071842225349	-9,2E-09
16	59	30	-0,0000071748264079	-0,0000071842225348	-9,4E-09
17	0	0	-0,0000071748982766	-0,0000071842225347	-9,3E-09
...

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta pesquisa foram avaliados os erros dos relógios dos 31 satélites atualmente operacionais do GPS. Para avaliação destes erros foram usadas observações de quatro estações da RBMC pelo período de uma semana. Uma característica importante apresentada nas figuras 11, 12, 13, 16, 17, 19, 20 e 22, é a presença dos “patamares”, que são os erros do relógio calculados tanto com os dados do RINEX original como com os parâmetros ajustados. Os comportamentos destes erros diferem dos erros apresentados pelo IGS, pois o IGS calcula os erros do relógio com parâmetros diferentes a cada 30 segundos, através de uma interpolação. (MARTINEZ, 2014). Diferente de como foi efetuado nesta pesquisa, onde os parâmetros permanecem constantes por normalmente duas horas (exceto em alguns casos notados, onde os parâmetros eram constantes por 1h59min45s). Foi notado também, que em alguns casos não existiam parâmetros para determinados intervalos no arquivo RINEX de navegação. Quando esse fato ocorreu, os erros dos relógios não foram calculados. Importante relatar que os “saltos” que ocorrem nos patamares, como apresentados nas figuras 12, 14, 17, 20 e 22, são devidos a mudança nos parâmetros (a_0 , a_1 , a_2), pois estes influenciam diretamente no cálculo dos erros dos relógios.

As figuras 11, 16 e 19 que representam, respectivamente, os satélites PRN24, PRN8 e PRN16, apresentam o comportamento do erro dos relógios ao longo da semana de aquisição dos dados. É possível notar que os valores destes erros aumentam ou diminuem continuamente ao longo dos dias da semana, dependendo dos parâmetros iniciais do satélite, isto é, do RINEX original. Nas figuras 12 e 14, são avaliados os erros do relógio para o dia 30 de junho de 2016, do PRN24, sendo a primeira para a estação UFPR e a segunda para a estação de Campo Grande, onde em ambas as figuras o comportamento do erro do relógio modificado aproxima-se do erro do relógio do IGS, o que representa que a adição da função exponencial no argumento do seno na equação do erro do relógio para relógios de Césio, tem um resultado

satisfatório. Analisando as figuras 13 e 15, que representam as diferenças entre os erros dos relógios do IGS e os erros dos relógios modificados, para as estações UFPR e Campo Grande, nota-se um comportamento parecido, onde os valores variam de 3×10^{-9} a -2×10^{-9} , em ambas as figuras. Uma observação importante: na figura 13, existe um espaço onde não existem informações do erro. Isso se deve ao fato de que não houve rastreamento neste tempo, e apenas no final do dia novamente aparece uma pequena parcela de rastreamento do sinal satélite. As figuras 16, 17 e 18, mostram como é o comportamento dos erros do relógio para o PRN8, também satélite com relógio de Césio. Como pode ser avaliado na figura 18, o erro varia de aproximadamente -1×10^{-9} a -12×10^{-9} , cada vez em que o parâmetro assume novo valor (consequentemente o erro do relógio também) a diferença entre IGS e modificado, aproxima-se de zero, porém ao longo do tempo de rastreamento esta diferença aumenta, devido ao fato que os erros do relógio apresentado pelo IGS é de 30s e interpolado.

A partir da figura 19, são apresentados os resultados do PRN16 que utiliza o relógio de Rubídio. Como já mencionado, não foi possível representar uma diferença gráfica entre os valores do erro do relógio calculado com os dados originais e o erro do relógio modificado, porém pode-se avaliar numericamente como é o comportamento. Nas figuras 20 e 22, nota-se que o comportamento do erro do relógio modificado acompanha o erro do relógio do IGS, inclusive quando existe uma descontinuidade. Na diferença entre os erros do IGS e o modificado apresentados nas figuras 21 e 23, novamente aproximam-se de zero no começo de cada vez em que o parâmetro muda, porém, o relógio de Rubídio apresenta uma maior variação dentro deste intervalo, do que os relógios de Césio.

A figura 24 apresenta os erros do relógio do PRN5, com dados de todas as estações selecionadas no trabalho para o dia 01 de julho de 2016, onde os erros do relógio sobrepõem-se quando existe rastreamento do satélite em mais de uma estação. Sendo assim, o resultado mostrou que o erro do relógio do

satélite independe da estação em que os cálculos estão sendo efetuados, ou seja, a pseudodistância não influencia sobre o cálculo.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os objetivos propostos na pesquisa foram atingidos e os resultados dos experimentos são compatíveis com aqueles apresentados. Pela literatura especializada, pode-se afirmar que a metodologia apresentada é viável. Neste trabalho foi avaliado o comportamento dos erros dos satélites GPS, a partir de dados contidos nos arquivos de navegação e observação do RINEX. Foram empregadas técnicas de ajustamento nos parâmetros de correção dos relógios atômicos de Rubídio e de Césio, que estão a bordo de satélites GPS. A metodologia aplicada nos relógios de Césio consistiu em inserir uma função exponencial no argumento do seno da parte periódica da equação que define os erros dos relógios, provocando mudanças no comportamento destes erros, os quais puderam ser avaliados. Esta estratégia apresentou-se auspiciosa. Os resultados das análises realizadas foram positivos pois, tratando-se dos satélites que contém o relógio de Césio, os erros dos relógios calculados a partir dos parâmetros ajustados e da equação 3.2 empregada, apresentou valores mais próximos do IGS, obtendo uma melhora na ordem de 50 cm do que com os dados originais, considerando levantamentos por ponto. Quando se tratam de relógios de Rubídio, a diferença dos erros originais com o modificado foi pequena, porém os resultados estão coerentes com os apresentados pelo IGS. Os resultados mostram também que o erro do relógio independe da estação e da antena do equipamento de onde foi usada a pseudodistância.

Este assunto ainda demanda pesquisas, pois os desenvolvimentos de novos modelos de relógios, como os ópticos, estão sempre em andamento, exigindo estudos sobre o seu comportamento e desempenho tanto em estações terrestres como a bordo de satélites que orbitam a Terra.

Uma das recomendações interessantes para novas pesquisas, está em avaliar dados de estações no período de um ano, verificando se existe um comportamento cíclico dos erros. Também avaliar a possibilidade de inclusão

de outras funções na equação que calcula o erro dos relógios, visando aproximar ainda mais o erro calculado a partir de dados de transmissão com os erros do IGS. Aplicações em tempo real, também são de grande valia, pois cada vez esta técnica é usada nos levantamentos geodésicos, e demandam estudos que minimizem os erros envolvidos, sendo um deles importante, o erro do relógio do satélite. Aplicar novas técnicas, por exemplo, realizar uma interpolação ou propagação nos parâmetros de correção do relógio encontrados no arquivo de navegação e verificar os resultados destes parâmetros com aqueles apresentados nesta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

ALLAN, David W. Time and Frequency (Time-Domain) Characterization, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillators. **IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics And Frequency Control.**, v. 6, n. 34, p.647-654, nov. 1987.

BIDIKAR, Bharati et al... Satellite Clock Error and Orbital Solution Error Estimation for Precise Navigation Applications. **Positioning.** , p. 22-26. dez. 2013.

BIPM. **International Atomic Time.** Disponível em: <<http://www.bipm.org/en/bipm/tai/tai.html>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

BROEDERBAUER, V.; WEBER, R.; **Modeling of GPS Satellite Clocks and Comparisons.** 10 years IGS, workshop & Symposium Berne, Suíça, 01-05 de março de 2004.

DELVA, Pacome; LODEWYCK, Jerome. Atomic clocks: new prospects in metrology and geodesy. Paris, out. 2013.

Encyclopedia Britannica. **Atomic clock.** Disponível em: <<http://global.britannica.com/technology/atomic-clock>>. Acesso em: 17 mar. 2016.

GALLEANI, Lorenzo. Characterizing Changes In The Noise Statistics Of Gnss Space Clocks With The Dynamic Allan Variance. Torino, 2014.

GEMAEL, Camil; ANDRADE, José Bittencourt de. **Geodésia Celeste.** Curitiba: Ufpr, 2004. 389 p.

GRIFFITHS, Jake; RAY, Jim R. On the precision and accuracy of IGS orbits. **J Geod**, [s.l.], v. 83, n. 3-4, p.277-287, 19 fev. 2009. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-008-0237-6>.

GUNTER, W; **RINEX – The Receiver Independent Exchange Format Version 3.03**; Disponível em <https://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex303.pdf>

HAUSCHILD, André; MONTENBRUCK, Oliver. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning. **GPS Solut**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.173-182, 16 nov. 2008. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-008-0110-3>.

HILLA, S. **The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c)**, 17 de agosto de 2010; Disponível em <https://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/sp3c.txt>

HINKLEY, N. et al... An Atomic Clock with 10–18 Instability. **Science**, p.1215-1218, set. 2013.

HUANG, Guan Wen; ZHANG, Qin; XU, Guo Chang. Real-time clock offset prediction with an improved model. **GPS Solut**, Berlin, v. 18, n. 1, p.95-104, 13 fev. 2013. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-013-0313-0>.

IBGE. **Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS - RBMC**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmcpesq.shtm?c=9> >. Acesso em: 24 mar. 2016.

IGS. **GPS Satellite Ephemerides / Satellite & Station Clocks**. Disponível em: <http://www.igs.org/products> >. Acesso em: 12 abr. 2016.

INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE. **36: IERS Conventions** (2010). Frankfurt: Verlag Des Bundesamts Für Kartographie Und Geodäsie, 2010.

ITRF. **Terrestrial Reference System**. Disponível em: <http://itrf.ensg.ign.fr/trs_trf.php>. Acesso em: 15 mar. 2016.

LEZIUS, Matthias; WILKEN, Tobias; DEUTSCH, Christian. Space-borne frequency comb metrology. **Optica**, New York, v. 3, n. 12, p.1381-1387, 12 dez. 2016. Disponível em: <<https://www.osapublishing.org/optica/fulltext.cfm?uri=optica-3-12-1381&id=354726>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

M.A. Weiss, P. Shome, R.L. Beard, “GPS Signal Integrity Dependencies on Atomic Clocks,” Proc. 2006 Precise Time and Time Interval Meeting, pp. 439-448.

MARQUES, Haroldo Antonio. **PPP em Tempo Real com estimativa das Correções dos relógios dos satélites no Contexto de Rede GNSS**. 2012. 245 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas, Unesp, Presidente Prudente, 2012.

MARTINEZ, Francisco Javier Gonzalez. **Performance of new GNSS satellite clocks**. 2014. 228 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geodatisches Institut, Schriftenreihe Karlsruher Institut Für Technologie, München, 2014.

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2008. 476 p.

NIST. **NIST Time Scale Data Archive**. Disponível em: <<http://www.nist.gov/pml/div688/grp50/leapsecond.cfm>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

SEDER, Heinz. **Study of GPS satellites clock's behaviour**. 2008. 22 f. Department Of Physics And Earth Sciences, University of Leipzig, Leipzig, 2008.

SEEBER, Günter. **Satellite Geodesy**. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SENIOR, Kenneth L.; RAY, Jim R.; BEARD, Ronald L. Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks. **GPS Solut**, v. 12, n. 3, p.211-225, 14 fev. 2008. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-008-0089-9>.

TORGE, Wolfgang. **Geodesy**. 3. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2001. 416 p.

TORGE, Wolfgang; MÜLLER, Jürgen. **Geodesy**. 4. ed. Berlin: Gmbh, 2012.

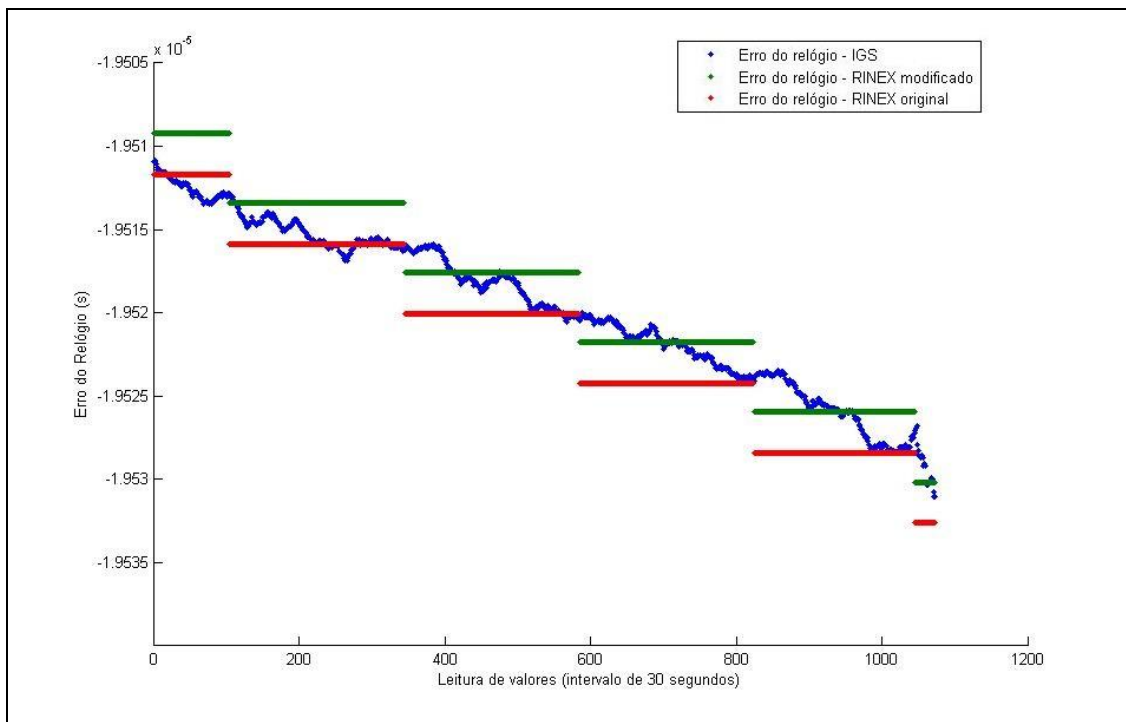
TRIGO, L.; SLOMOVITZ, D.. Long Term Experimental Results of a Rubidium Atomic Clock with Drift Compensation. Montevideo, 2012.

ZHANG, Xiaohong; LI, Xingxing; GUO, Fei. Satellite clock estimation at 1 Hz for realtime kinematic PPP applications. **GPS Solut**, v. 15, n. 4, p.315-324, 16 nov. 2010. Springer Science + Business Media. <http://dx.doi.org/10.1007/s10291-010-0191-7>.

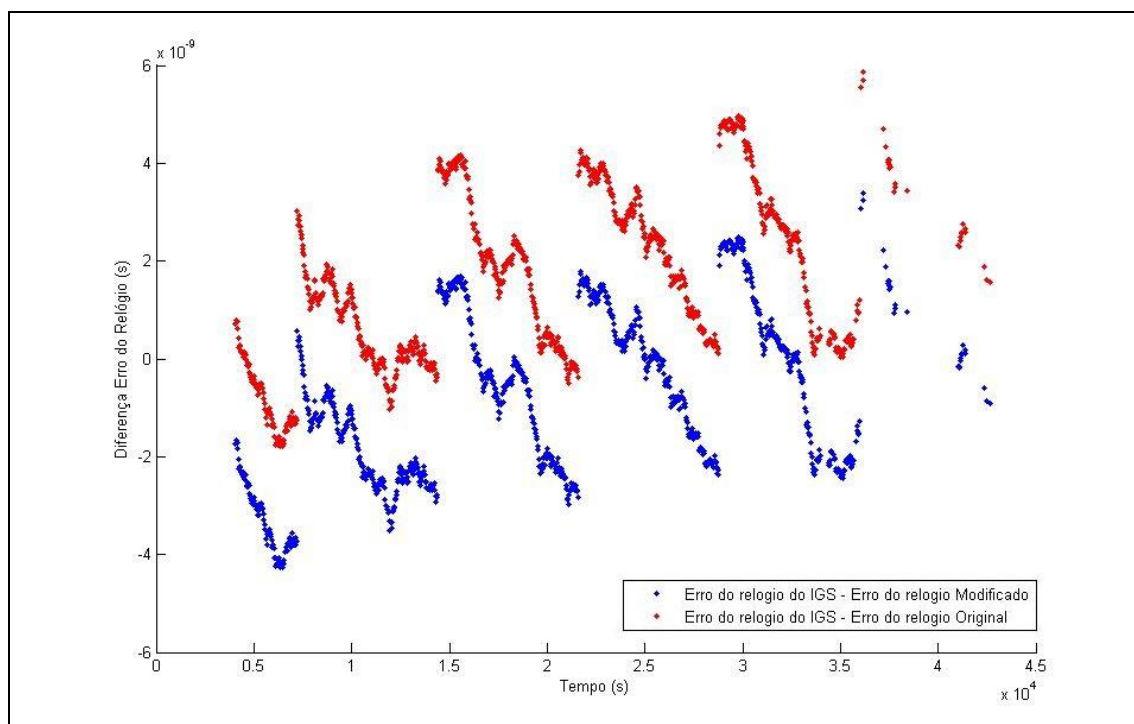
APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Comportamento dos erros do relógio - PRN24 (Cs) - Estação Recife - 03 de julho de 2016.....	66
APÊNDICE 2 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado – PRN24 (Cs) - Estação Recife - 03 de julho de 2016.....	66
APÊNDICE 3 - Comportamento dos erros do relógio – PRN20 (Rb) - Estação UFPR - 26 de junho de 2016.....	67
APÊNDICE 4 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado – PRN20 (Rb) - Estação UFPR - 26 de junho de 2016.....	67
APÊNDICE 5 - Comportamento entre os erros do relógio - PRN8 (Cs) - Estação Campo Grande - Dia 27 de junho.....	68
APÊNDICE 6 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN8 (Cs) - Estação Campo Grande - 27 de junho de 2016	68
APÊNDICE 7- Comportamento dos erros do relógio – PRN32 (Rb) - Estação Santa Maria - 28 de junho de 2016	69
APÊNDICE 8 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado – PRN32 (Rb) - Estação Santa Maria - 28 de junho de 2016	69

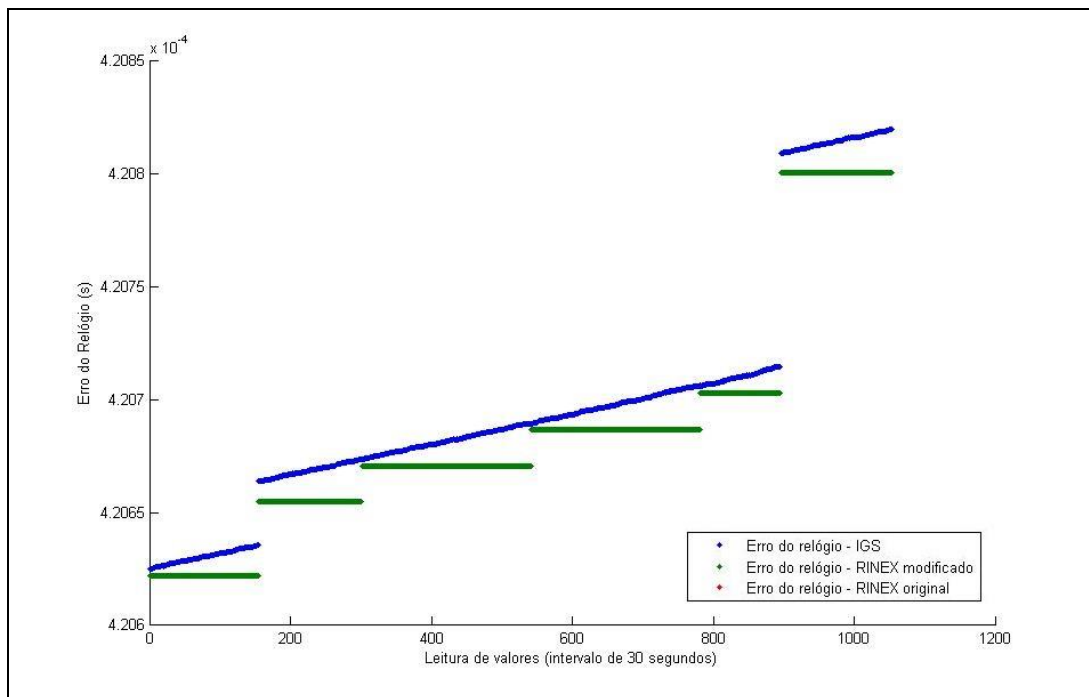
APÊNDICE 1 - Comportamento dos erros do relógio - PRN24 (Cs) - Estação Recife - 03 de julho de 2016



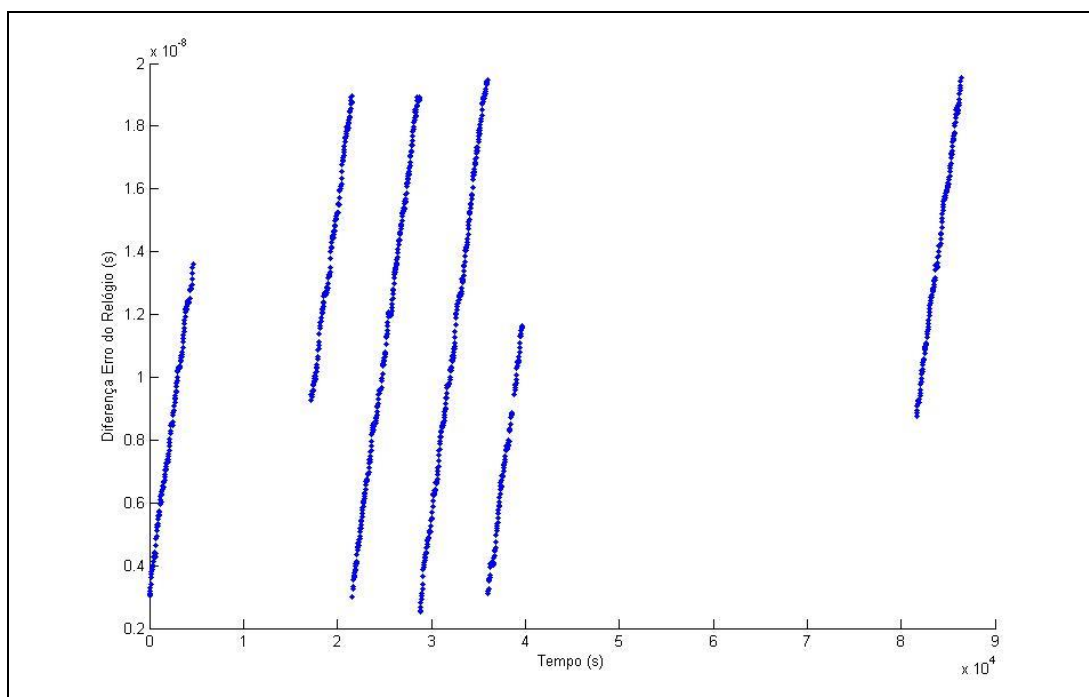
APÊNDICE 2 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado – PRN24 (Cs) - Estação Recife - 03 de julho de 2016



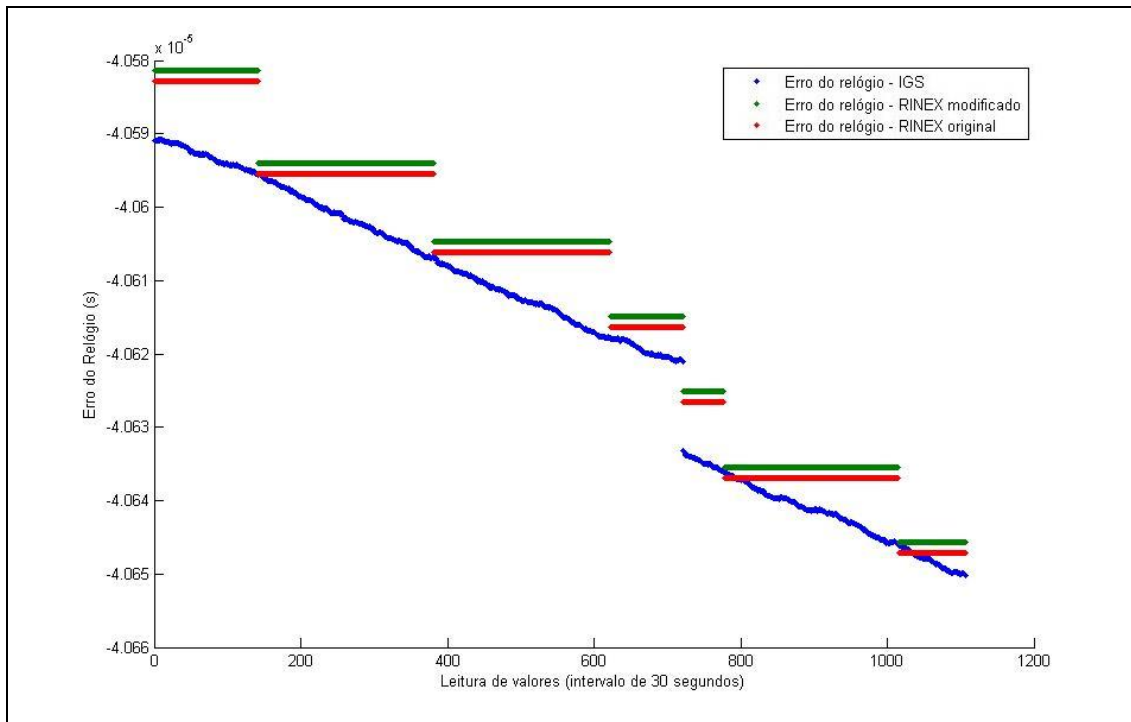
APÊNDICE 3 - Comportamento dos erros do relógio – PRN20 (Rb) - Estação UFPR - 26 de junho de 2016



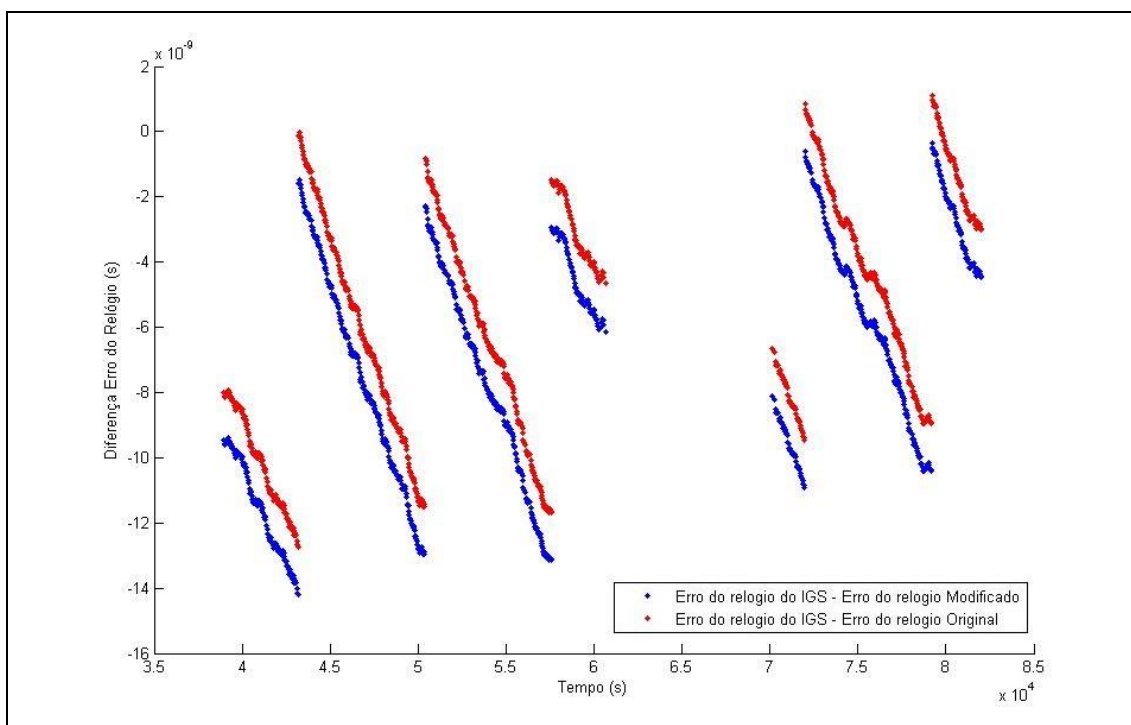
APÊNDICE 4 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado – PRN20 (Rb) - Estação UFPR - 26 de junho de 2016



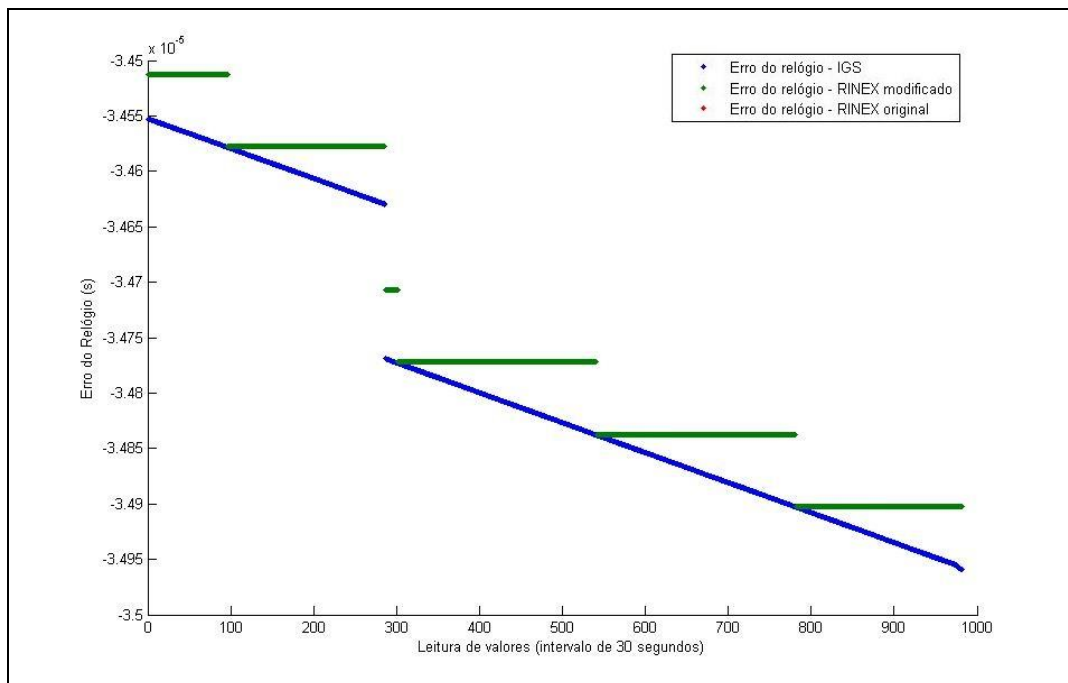
APÊNDICE 5 - Comportamento entre os erros do relógio - PRN8 (Cs) - Estação Campo Grande - Dia 27 de junho



APÊNDICE 6 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado - PRN8 (Cs) - Estação Campo Grande - 27 de junho de 2016



APÊNDICE 7- Comportamento dos erros do relógio – PRN32 (Rb) - Estação Santa Maria - 28 de junho de 2016



APÊNDICE 8 - Diferença entre os erros do relógio do IGS e os erros do relógio modificado – PRN32 (Rb) - Estação Santa Maria - 28 de junho de 2016

