

**AVALIAÇÃO DA CORREÇÃO DO ERRO IONOSFÉRICOS EM
RECEPTORES GNSS UTILIZANDO A SIMULAÇÃO IONOSFÉRICA
DESENVOLVIDA NO INPE E O SOFTWARE RTKLIB**

**RELATÓRIO FINAL DO PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBITI/INPE/CNPq)**

Victor Dallagnol Bento (UFSM. Bolsista PIBITI/CNPq)
E-mail: victor.bento@ecom.ufsm.br

Dr. Adriano Petry (COCRE/CRCRS, Orientador)
E-mail: adriano.petry@inpe.br

COLABORADORES

Dr. Felix Antreich (ITA)

Julho de 2019



AVALIAÇÃO DA CORREÇÃO DO ERRO IONOSFÉRICOS EM RECEPTORES GNSS UTILIZANDO A SIMULAÇÃO IONOSFÉRICA DESENVOLVIDA NO INPE E O SOFTWARE RTKLIB

Relatório final referente ao período vigente da bolsa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI) disponibilizada pelo Conselho Científico e Tecnológico (CNPq) em conjunto com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

INPE
Santa Maria, RS
Julho de 2019



SUMÁRIOS

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES	3
LISTAS DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	4
RESUMO	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVO DE TRABALHO	6
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
3.1. IONOSFERA	7
3.2. RECEPTORES GNSS	9
3.3. CORREÇÕES IONOSFÉRICAS	10
3.3.1. KLOBUCHAR	10
3.3.2. SUPIM	10
3.3.3. IGS	11
3.4. RTKLIB	11
3.5. EMBARCADERO C++ BUILDER	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS	12
5. ANÁLISES E RESULTADOS	12
6. CONCLUSÕES	18
APÊNDICE A	19
APÊNDICE B	20
APÊNDICE C	21
REFERÊNCIAS	22



LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Figura retratando o modelo atômico de Bohr obtidas através do Google Imagens.	7
Figura 2: Figura que expressa uma relação entre a altitude, densidade e o número de elétrons livres na camada ionosférica para explicar a relação entre eles e também com o erro ionosférico	8
Figura 3: Software Embarcadero C++ para recompilação do software RTKLib.	13
Figura 4: Recompilação dos aplicativos GUI da biblioteca RTKLib.	14
Figura 5: Recompilação dos aplicativos cUI da biblioteca RTKLib.	14
Figura 6: Saída gráfica da simulação dos pontos levando em conta a simulação ionosférica do IGS (modelo GIM).	15
Figura 7: Saída gráfica da simulação dos pontos levando em conta a correção ionosférica do modelo de Klobuchar.	16
Figura 8: Saída gráfica da simulação dos pontos levando em conta a simulação ionosférica do INPE (modelo SUPIM).	16
Figura 9: Resultado do erro médio calculado pelo programa criado levando em conta os pontos de uma estação do Brasil.	17
Figura 10: Resultado do erro médio calculado pelo programa criado levando em conta os pontos de uma estação do Rússia.	17
Figura 11: Resultado do erro médio calculado pelo programa criado levando em conta os pontos de uma estação do Estados Unidos.	17
Figura 12: Resultado do erro médio calculado pelo programa criado levando em conta os pontos de uma estação do Suécia.	18



LISTAS DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
RTKLib	Real Time Kinematic Library.
CRCRS	Conselho Regional de Contabilidade do Rio Grande do Sul.
ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica.
PIBITI	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação.
CNPq	Conselho Científico e Tecnológico.
GNSS	Global Navigation Satellite System.
SUPIM	Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model.
IGS	International GNSS Services.
GIM	Global Ionospheric Map.



RESUMO

Este documento apresenta uma análise do projeto que tem como objetivo a avaliação da correção do erro ionosférico em receptores GNSS (Global Navigation Satellite System), visando contribuir para a área científica e acadêmica. Inicialmente será abordado um embasamento teórico para fundar os conhecimentos sobre a ionosfera e dos softwares utilizados no projeto, seguidos do processo de recompilação do software utilizado para a comparação dos métodos de correção (RTKLib - Real Time Kinematic Library), assim como a obtenção dos arquivos para simulação, a análise dos resultados e por fim a comparação dos métodos para correção do erro ionosférico.

Palavras-Chave: Ionosfera, GNSS, RTKLib, Erro ionosférico, Correção ionosférica.



1. INTRODUÇÃO

O projeto consiste basicamente em uma análise da correção do erro ionosférico em receptores GNSS. O GNSS é um Sistema de Navegação por Satélite que possui a capacidade de oferecer posicionamento em qualquer ponto da superfície terrestre [6].

O erro ionosférico causa uma acurácia nas posições obtidas com receptores GNSS pela refração ionosférica que depende do conteúdo total de elétrons (TEC - Total Electron Content) na camada ionosférica. Este conteúdo total de elétrons é influenciado por diversas variáveis, dentre delas o ciclo solar, as estações do ano, a hora do dia, a localização geográfica e o campo magnético da Terra.

As mensagens recebidas pelos receptores trazem informações que permitem efetuar correções da ionosféricas. O objetivo principal do projeto é efetuar uma comparação e análise de resultados entre a correção efetuada pelo software RTKLib que utiliza o modelo de Klobuchar com a simulação da ionosfera do IGS (International GNSS Services), baseada no modelo GIM (Global Ionospheric Map), e a correção ionosférica desenvolvida pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) que é baseada no modelo SUPIM (Sheffield University Plasmasphere-Ionosphere Model) [1].

2. OBJETIVO DE TRABALHO

Os objetivos do trabalho consiste primeiramente em efetuar um estudo profundo sobre a ionosfera e o software RTKLib que será utilizado para simular os arquivos de posicionamento. Posteriormente será feita a recompilação, instalação e execução do software RTKLib a partir do seu código fonte assim como adicionar ao software a possibilidade de inclusão de outro tipo de correção ionosférica.

Utilizaremos a correção baseada na simulação ionosférica desenvolvida pelo INPE, baseada no modelo SUPIM, e a correção desenvolvida pelo IGS, baseada no modelo GIM, para efetuar a comparação com a correção padrão executada pelo software RTKLib, que é a correção baseada no modelo de Klobuchar. Ao final, resultados serão comparados entre todas as correções e uma análise da acurácia dos resultados será levantada.

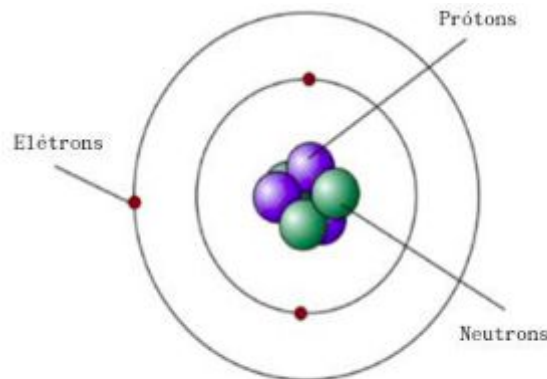
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção objetiva a realização de uma revisão teórica sobre o projeto, abordando conceitos sobre a ionosfera, as causas dos erros em dispositivos GNSS, os métodos de correções bem como uma abordagem sobre o funcionamento do software RTKLib, como os dados serão coletados e analisados.

3.1 IONOSFERA

O modelo tradicional do átomo é chamado de modelo de Bohr, onde um ou mais elétrons cercam o núcleo, que é composto de partículas subatômicas chamadas prótons e nêutrons. Os prótons têm carga positiva e os elétrons têm carga negativa de valor igual, mas oposto. Cargas opostas (positivas e negativas) têm uma força atrativa chamada força eletrostática ou coulombiana, enquanto as mesmas cargas (negativa e negativa ou positiva e positiva) têm uma força repulsiva [5].

Figura 1: Modelo atômico de Bohr.



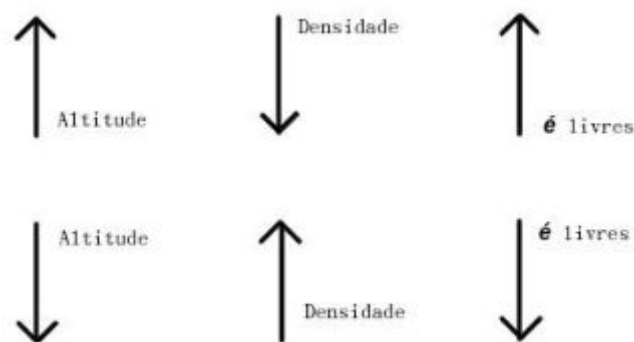
Fonte: Google Imagens.

A ionosfera é a região localizada entre 60km e 1000km de altitude sendo que em aproximadamente 300km há um pico na concentração de elétrons (cargas negativas) livres [5]. O nome ionosfera provém pelo fato de que em altitudes elevadas a densidade das partículas neutras (Neutron - sem carga) é baixa, fazendo com que os elétrons livres (criados pelo processo de ionização) possam sobreviver por um tempo considerável até se recombinarem com íons (átomos que vão perder ou ganhar elétrons). Ionização é o processo de produzir átomos ou moléculas com carga positiva ou negativa, adicionando ou eliminando um ou mais elétrons [5].

Na atmosfera superior da Terra, é muito mais comum a criação de íons carregados positivamente (elétron removido) enquanto que na atmosfera inferior quase todas os átomos e moléculas são neutros (mesmo número de prótons e elétrons). A parte principal da ionosfera é produzida principalmente pela radiação eletromagnética solar através de um processo chamado fotoionização (remoção de um elétron) [5]. Por depender da luz solar os maiores picos de densidade da ionosfera acontecem de dia (baixas altitudes) e à noite, a ionosfera não desaparece completamente, pois a recombinação de íons e elétrons (a quantidade média de tempo necessária para um íon e um elétron retornarem para formar um neutro) é comparável à taxa de rotação da Terra [5]. Ou seja, quanto mais densa for, maior será a taxa de recombinação. A quantidade de ionização presente é determinada pela produção dos íons (fotoionização) com a perda (recombinação) dos íons [5].

Ademais, a densidade de elétrons, que descreve o estado da ionosfera, pode variar em função do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclos de manchas solares, estação do ano, variações temporais, variações da radiação solar, influências da latitude, longitude e campo magnético da Terra, dentre outras influências. Nas zonas mais baixas os elétrons livres e íons tendem a reduzir bastante, pois sempre a recombinação prevalecerá sobre a ionização, devido à maior densidade de partículas. Nas zonas mais altas é muito baixa a densidade de gases, moléculas e átomos, e a quantidade de radiação, ou seja a energia provinda do espaço é muito alta, porém, não existem gases, átomos, ou moléculas livres o suficiente para ser ionizadas, portanto só haverá ionização à medida que se mergulha na atmosfera, até uma certa profundidade, assumindo-se, por exemplo, a atmosfera fluídica [15].

Figura 2: Relação entre Altitude, Densidade e e^- livres.



Fonte: Autor.



3.2 RECEPTORES GNSS

Os sinais GNSS são ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz [6] capazes de oferecer posicionamento em qualquer ponto da superfície terrestre fornecendo sinais em pelo menos duas frequências diferentes para compensar os atrasos ionosféricos em suas medições. A medição básica feita por um receptor GNSS é o tempo necessário para o sinal GNSS se propagar de um satélite para o receptor fazendo-se necessários no mínimo 4 satélites para se determinar as variáveis referentes às coordenadas x , y , z e ao tempo t .

O GNSS é visto como uma evolução natural do já popular sistema de posicionamento americano (GPS). Atualmente fazem parte do GNSS além do GPS, o sistema russo GLONASS, o europeu GALILEO entre outros.

- GPS: O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é o GNSS dos EUA, que fornece serviços de posicionamento e cronometria gratuitos em todo o mundo [6]. Foi originalmente desenvolvido para os militares dos EUA, é formado por uma constelação de 24 satélites (6 planos com 4 satélites cada). O GPS conta com dois tipos de serviço: Standard Positioning Service (SPS) e Precise Positioning Service (PPS). O primeiro é oferecido de maneira gratuita para usuários do mundo inteiro – e nível de confiança elevado. Já o segundo (PPS) oferece resultados ainda mais precisos, porém seu uso é restrito a militares e usuários autorizados. O modelo Standard Positioning Service, que também se divide em mais 3 segmentos: Segmento espacial: o sinal é transmitido por satélites, que apontam o posicionamento desejado; Segmento de controle: funciona para a manutenção do sistema; Segmento de usuários: concentra todas as aplicações desse tipo de sistema global de navegação por satélite e os seus respectivos receptores.
- GLONASS: O GLONASS é a abreviatura de Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (ou Sistema de Navegação Global por Satélite, simplesmente) foi inicialmente desenhado pela ex-URSS, em meados da década de 1970 [6]. São usados dois tipos de sinais de navegação: Sinal de precisão padrão (SP – Standard Precision) e Sinal de alta precisão (HP – High Precision). O primeiro, igual ao GPS, é oferecido a usuários da comunidade civil, enquanto o sistema HP possui uso restrito. O sistema também é formado por 24 satélites, sendo 3 planos orbitais, cada um com 8 satélites, além dos 03 segmentos: espacial, controle e monitoramento e usuário.
- GALILEO: É um sistema global de navegação por satélite sob a chancela dos países europeus. A parte interessante desse tipo de produto é que ele vai apresentar compatibilidade tanto com o GPS quanto com o GLONASS, oferecendo ambas as frequências como padrão.



3.3 CORREÇÕES IONOSFÉRICAS

Atualmente, a maior fonte de erro sistemático no posicionamento com receptores GPS de uma frequência é devido à refração ionosférica. O erro associado à refração ionosférica depende do conteúdo total de elétrons (TEC) na camada ionosférica, que por sua vez, é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica e atividade geomagnética, e é difícil de ser corrigido [9]. Os sinais do GPS, no seu caminho entre o satélite e a antena receptora, propagam-se na atmosfera dinâmica, atravessando diferentes camadas, que possuem características bem distintas. A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço [7]. O retardo é referido, também, como atraso ionosférico e aumenta o comprimento aparente do caminho percorrido pelo sinal.

3.3.1 KLOBUCHAR

As mensagens de navegação transmitidas pelos satélites do sistema GPS trazem informações que permitem efetuar correções da ionosfera para receptores GPS de uma frequência, utilizando o modelo de Klobuchar [4], também designado de modelo Broadcast. Estas informações são os coeficientes alfa e beta de um polinômio, estimados a partir de uma rede de estações GPS global. Vários estudos realizados mostraram que o modelo de Klobuchar pode remover apenas algo em torno de 50% a 60% do efeito total [8]. Desta maneira, é necessário dispor de uma estratégia mais efetiva de eliminar os efeitos da ionosfera, a qual tem sido investigada a partir do uso de modelos regionais para a ionosfera, que representam com maior eficácia o comportamento da ionosfera da região de estudo.

3.3.2 SUPIM

SUPIM é um modelo de primeiros princípios da ionosfera e plasmosfera da Terra que tem sido desenvolvido nas últimas três décadas [10,11,12]. No modelo, as equações da continuidade, movimento e do equilíbrio de energia, ambas dependentes do tempo e acopladas, são resolvidas ao longo das linhas de campo magnético fechadas para calcular os valores das densidades, fluxos e temperaturas dos elétrons e dos íons O^+ , H^+ , He^+ , N_2^+ , O_2^+ and NO^+ . SUPIM inclui uma das representações mais precisa do campo magnético da Terra que é um dipolo excêntrico. Na verdade, o campo magnético é obtido ao deslocar um dipolo

do centro da Terra por uma distância de 500 km na direção de 21oN, 147oE e o eixo cortando a superfície da Terra em torno de 82oN, 90oW e 75oS, 119oE [17]. A excentricidade, obviamente, faz o sistema de coordenada magnética ser diferente do geográfico. O modelo inclui numerosos processos físicos e químicos. Os principais são: produção de íons devido à radiação solar EUV, produções e perdas dos íons devido às reações químicas entre os constituintes ionizados e neutros, difusão ambipolar e térmica, colisões íon-íon e íon-partícula neutra, ventos atmosféricos, deriva eletromagnética ($E \times B$), condução térmica, aquecimento fotoelétrico, aquecimento friccional e um grande número de aquecimentos locais e mecanismos de esfriamento [16].

3.3.3 IGS

O IGS (International GNSS Service) também possui um modelo conhecido como Mapa Global da Ionosfera (GIM – Global Ionospheric Map). Estes mapas são disponibilizados gratuitamente pelo IGS na internet a partir de arquivos no formato IONEX e, uma das aplicações, é utilizá-los para realizar a correção das observáveis GPS do erro devido à ionosfera.

3.4 RTKLIB

O RTKLIB é um pacote de programas de código aberto para posicionamento padrão e preciso com o GNSS (sistema global de navegação por satélite). O RTKLIB consiste em uma biblioteca de programas portátil e vários APs (programas aplicativos) utilizando a biblioteca [14]. Neste conjunto de programas, daremos ênfase em apenas dois deles que serão usados na análise e comparação.

Os aplicativos utilizados serão o RTKPlot, para plotagem gráfica das localizações e o RTKPost, que é utilizado para análise de pós-processamento inserindo o padrão RINEX, dados de observação e ficheiros de mensagens de navegação (GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BeiDou e SBAS) [14]. O formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format) é um formato de intercâmbio de dados para dados brutos do sistema de navegação por satélite permitindo que o usuário pós-processe os dados recebidos para produzir um resultado mais preciso [18].



3.5 EMBARCADERO C++ BUILDER

É um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) produzido pela Embarcadero para o desenvolvimento de softwares na linguagem C++. O aplicativo inclui ferramentas que permitem desenvolvimento visual através de "arrastar e soltar", tornando a programação mais simples. Foi direcionado originalmente somente para a plataforma Windows [19].

O Embarcadero C++ Builder á princípio é pago, mas no ano atual (2019) disponibilizou uma versão limitada, porém gratuita, para estudantes e empresas pequenas com rendimento mensal menor do que R\$ 5.000,00.

4. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Inicialmente foi efetuado um estudo teórico para abranger os conhecimentos e validar os presentes e futuros conceitos sobre o tema estudado em questão, tendo como base principal o livro “Mark Moldwin - An Introduction To Space Weather” [5]. Posteriormente o software RTKLib foi estudado mais aprofundadamente para ter um maior entendimento e confiança na execução de suas funcionalidades, seus aplicativos e a resposta obtida através dele.

Um estudo sobre o método de correção de Klobuchar foi efetuado, assim como a simulação ionosférica do INPE e do IGS. Como o método de Klobuchar e as simulações, tanto do INPE quando IGS, geram arquivos IONEX, todos puderam ser simulados através do software RTKPost, que é um entre vários softwares que compõem a biblioteca do RTKLib.

Criação de um algoritmo para comparação exata dos resultados obtidos das simulações do software RTKpost, este programa é capaz de calcular as distâncias médias das amostras em comparação com a distância da base, concluindo assim que a menor distância, ou o menor erro, será do que apresenta uma melhor correção.

5. ANÁLISES E RESULTADOS

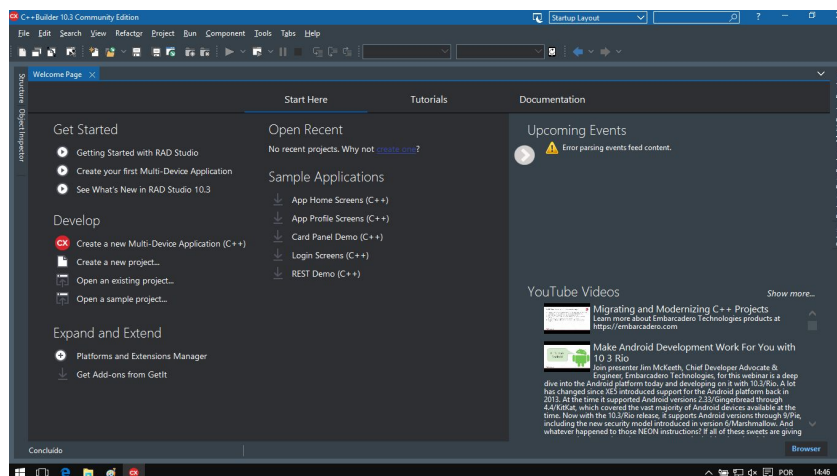
Como mencionado anteriormente, Inicialmente fez-se um estudo teórico envolvendo a camada ionosférica e as possíveis causas da acurácia do posicionamento em receptores GNSS. Também efetuou-se um estudo teórico dos programas RTKLib e o Embarcadero C++ Builder.

Após os estudos teóricos, seguiu-se para a recompilação dos aplicativos GUI (Interface Gráfica de Usuário) e CUI (Interface de Caracteres de Usuário) da biblioteca

RTKLib. GUI é uma interface de usuário que interage com aplicativos, podendo executar mais de uma tarefa simultaneamente enquanto na CUI o usuário tem que interagir com os aplicativos, através de comandos, e podendo executar somente uma tarefa por vez.

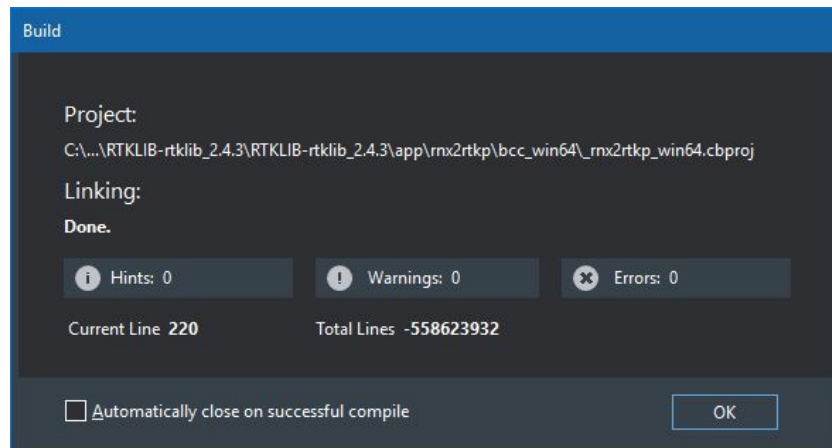
Utilizou-se o software Embarcadero C++ Builder para a recompilação, seguindo os passos descritos no manual do RTKLib [14, pág 87-88]. A conclusão da recompilação de ambas as aplicações (GUI e CUI) está representada pela Figura 4 e Figura 5.

Figura 3: Software Embarcadero C++ Builder



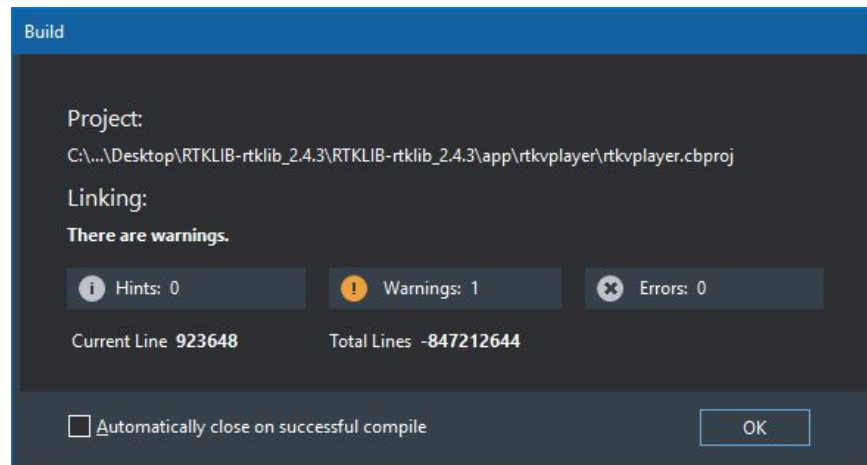
Fonte: Autor.

Figura 4: Recompilação dos aplicativos GUI.



Fonte: Autor.

Figura 5: Recompilação dos aplicativos CUI.



Fonte: Autor.

O modelo Klobuchar foi projetado para minimizar a complexidade computacional do usuário e o armazenamento do computador do usuário, de modo a manter um número mínimo de coeficientes para transmitir no link do usuário via satélite [20]. Esse modelo de transmissão é baseado em uma abordagem empírica [4] e estima-se que reduza o erro da faixa ionosférica de 50% RMS em todo o mundo. Nesse modelo, supõe-se que o conteúdo de elétrons esteja concentrado em uma camada fina a quilômetros de altura. Assim, o atraso inclinado é calculado a partir do atraso vertical no Ponto de Perfuração Ionosférico (IPP) multiplicado por um fator de obliquidade, isto é, a função de mapeamento [20].

O cálculo da equação de Klobuchar para a correção do erro ionosférico foi identificado no código do RTKLib através do caminho

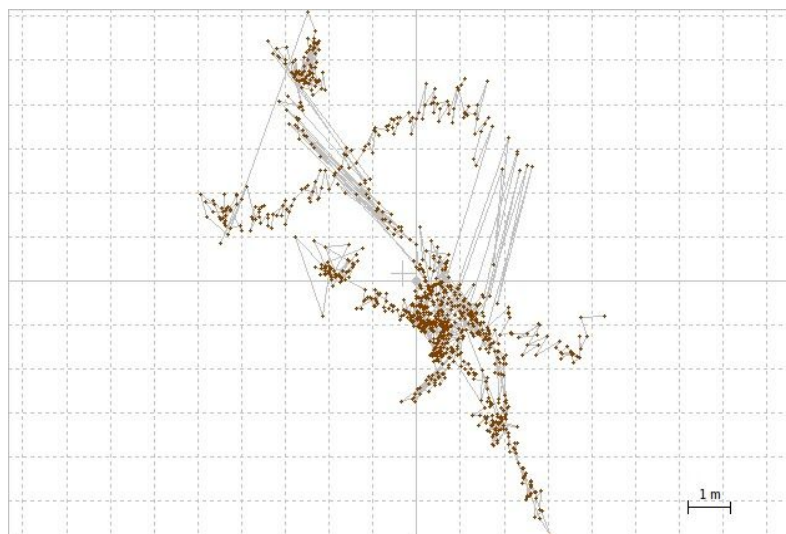
“/home/user/RTKLIB-rtklib_2.4.3/src/rtkcmn” a partir da linha 3427 até a linha 3475, como mostrado na Figura A.1 do apêndice A, comprovando que por padrão a correção efetuada pelo RTKlib é a de Klobuchar.

As componentes da equação são a latitude geodésica aproximada e a longitude, o ângulo de elevação e o azimute do satélite observado, e os coeficientes de Klobuchar transmitidos. O código pode ser analisado em trechos que consistem respectivamente em calcular o ângulo centrado na terra (semicírculo), calcular a latitude e longitude sub-ionosférica (semicírculo), encontrar a latitude geomagnética (semicírculo), encontrar o tempo local, encontrar o fator de inclinação e calcular o atraso ionosférico.

O próximo passo foi a obtenção dos arquivos necessário para a simulação do RTKLib, como por exemplo arquivos de broadcast, arquivos de correção de clock, de órbitas de satélites, calibração da antena, entre outros. Todos estes arquivos, inclusive o RINEX para a simulação, foram obtidos do site www.igs.org e a consiguração foi efetuada conforme o manual criado pelo aluno (Apêndice C).

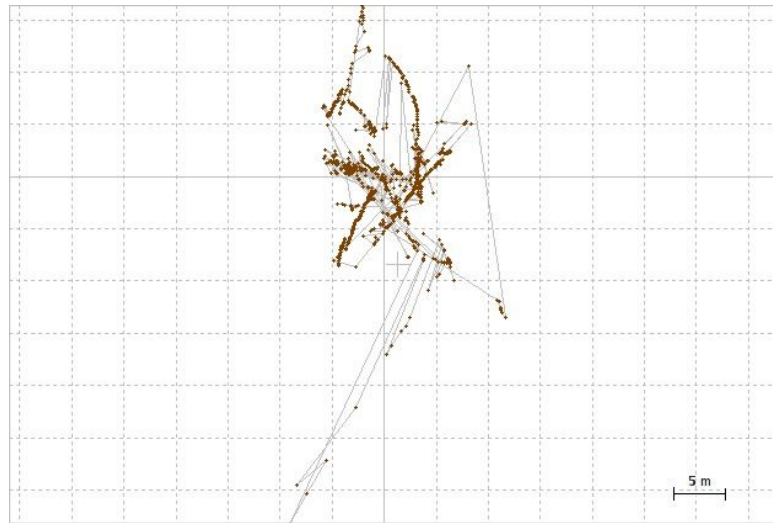
A simulação do programa RTKPost utilizou arquivos IONEX, referente ao dia 10.11.2018 às 00:00:00, para simulação ionosférica com correção baseada no modelo de Klobuchar, arquivos baseados na simulação ionosférica do INPE (modelo SUPIM) e arquivos baseados na simulação ionosférica do IGS (modelo GIM).

Figura 6: IGS.



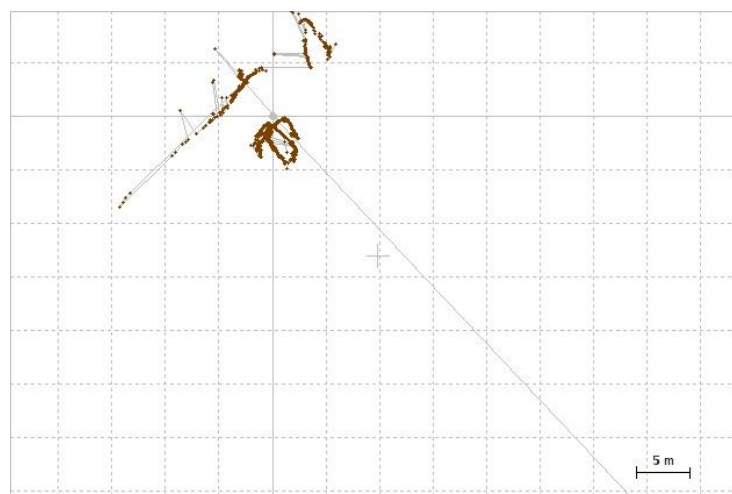
Fonte: Autor.

Figura 7: Klobuchar



Fonte: Autor.

Figura 8: SUPIM.



Fonte: Autor.

Para uma comparação mais exata entre a correção baseada no modelo de Klobuchar, a simulação ionosférica do INPE (modelo SUPIM) e a simulação ionosférica do IGS (modelo GIM) foi criado um programa em linguagem C (Apêndice B) para efetuar a leitura dos arquivos de saída e então calcular o erro médio em relação a base escolhida.

Foram testadas 4 estações bases diferentes (arquivos RINEX) para expandir os resultados e ter uma melhor conclusão sobre as correções ionosféricas. Os resultados das médias dos erros em relação a estação base de cada país estão indicados pelas figuras abaixo.

Figura 9: Brasil.

```
v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/3$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_supim.txt
Media: 184684.625000

v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/3$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_klobuchar.txt
Media: 184686.250000

v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/3$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_igs.txt
Media: 184681.750000
```

Fonte: Autor.

Figura 10: Rússia.

```
v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/2$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_klobuchar.txt
Media: 206268.500000

v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/2$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_igs.txt
Media: 206267.953125

v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/2$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_supim.txt
Media: 206267.187500

v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/2$ █
```

Fonte: Autor.

Figura 11: Estados Unidos.

```
v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/New Tests/files$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_klobuchar.txt
Media: 15761.893555

v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/New Tests/files$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_igs.txt
Media: 15541.673828

v1ct0r@inpe-PC:~/Desktop/New Tests/files$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_supim.txt
Media: 15523.097656
```

Fonte: Autor.

Figura 12: Suécia.

```
vlct0r@inpe-PC:/media/vlct0r/b3nt0/code$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_KLOBUCHAR.txt
Média: 7.855069

vlct0r@inpe-PC:/media/vlct0r/b3nt0/code$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_IGS.txt
Média: 4.996402

vlct0r@inpe-PC:/media/vlct0r/b3nt0/code$ gcc med.c -o med -lm && ./med
OUT_SUPIM.txt
Média: 6.134933
```

Fonte: Autor.

6. CONCLUSÕES

Analisando os resultados obtidos através das diversas simulações, pode-se concluir que a correção ionosférica utilizando o método de Klobuchar obteve um pior desempenho em todos os testes se comparada com as correções ionosféricas efetuadas pela simulação ionosférica do INPE (baseada no modelo SUPIM) e a simulação ionosférica do IGS (baseada no modelo GIM).

Ademais, serão efetuados mais testes para findar a veracidade referente a melhoria das correções e futuramente o trabalho será continuado com a tentativa de reimplementação, em linguagem C++, da correção ionosférica utilizada pela simulação ionosférica do INPE.

APÊNDICE A - KLOBUCHAR

Figura A.1: Equação de Klobuchar presente no arquivo *rtkcmn.c* do software RTKLib.

```

3438 extern double ionmodel(gtime_t t, const double *ion, const double *pos,
3439                          const double *azel)
3440 {
3441     const double ion_default[]={ /* 2004/1/1 */
3442         0.1118E-07,-0.7451E-08,-0.5961E-07, 0.1192E-06,
3443         0.1167E+06,-0.2294E+06,-0.1311E+06, 0.1049E+07
3444     };
3445     double tt,f,psi,phi,lam,amp,per,x;
3446     int week;
3447     ....
3448     if (pos[2]<-1E3||azel[1]<=0) return 0.0;
3449     if (norm(ion,8)<=0.0) ion=ion_default;
3450     ....
3451     /* earth centered angle (semi-circle) */
3452     psi=0.0137/(azel[1]/PI+0.11)-0.022;
3453     ....
3454     /* subionospheric latitude/longitude (semi-circle) */
3455     phi=pos[0]/PI+psi*cos(azel[0]);
3456     if (phi> 0.416) phi= 0.416;
3457     else if (phi<-0.416) phi=-0.416;
3458     lam=pos[1]/PI+psi*sin(azel[0])/cos(phi*PI);
3459     ....
3460     /* geomagnetic latitude (semi-circle) */
3461     phi+=0.064*cos((lam-1.617)*PI);
3462     ....
3463     /* local time (s) */
3464     tt=43200.0*lam+time2gpst(t,&week);
3465     tt-=floor(tt/86400.0)*86400.0; /* 0<=tt<86400 */
3466     ....
3467     /* slant factor */
3468     f=1.0+16.0*pow(0.53-azel[1]/PI,3.0);
3469     ....
3470     /* ionospheric delay */
3471     amp=ion[0]+phi*(ion[1]+phi*(ion[2]+phi*ion[3]));
3472     per=ion[4]+phi*(ion[5]+phi*(ion[6]+phi*ion[7]));
3473     amp=amp< 0.0? 0.0:amp;
3474     per=per<72000.0?72000.0:per;
3475     x=2.0*PI*(tt-50400.0)/per;
3476     ....
3477     return CLIGHT*f*(fabs(x)<1.57?5E-9+amp*(1.0+x*x*(-0.5+x*x/24.0)):5E-9);
3478 }

```



APÊNDICE B - PROGRAMA PARA COMPARAÇÃO DAS CORREÇÕES.

<https://github.com/da3mons/INPE-Code/blob/master/compare.c>

<https://github.com/da3mons/INPE-Code/blob/master/med.c>



APÊNDICE C - CONFIGURAÇÃO DO SOFTWARE RTKPOST DA BIBLIOTECA RTKLIB.

[https://github.com/da3mons/Manual-RTKLib/blob/master/Basic%20Manual%20for%
20Execute%20RTKLib%20-%20Victor%20Dallagnol%20Bento.pdf](https://github.com/da3mons/Manual-RTKLib/blob/master/Basic%20Manual%20for%20Execute%20RTKLib%20-%20Victor%20Dallagnol%20Bento.pdf)



REFERÊNCIAS

- [1] PETRY, A., SOUZA, J. R: VELHO, H. F. C. ; PEREIRA, A. G. ; Bailey, G. J.: First results of operational ionospheric dynamics prediction for the Brazilian Space Weather program. *Advances in Space Research*, v. 54, p. 22-36, 2014
- [2] PUNTEL, F. E.; PETRY, A; SOUZA, J. R: VELHO, H. F. C.. SISTEMA PARA PREVI-SÃO OPERACIONAL DA DINÂMICA DA IONOSFERA BASEADO NO MODELO SUPIM v2. São José dos Campos: INPE, 2015 (Manual).
- [3] Site do RTKLib: an open source program package for GNSS positioning <www.rtklib.com>. Acesso em julho de 2019.
- [4] Klobuchar, J., 1987. Ionospheric Time-Delay Algorithms for Single-Frequency GPS Users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* (3), pp. 325-331.
- [5] Mark Moldwin: *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press (3rd edition, 2008).
- [6] Teunissen, Peter J.G., Montenbruck, Oliver: *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, 2017.
- [7] LEICK, A.. *GPS Satellite Surveying*. 2.ed. New York: John Wiley and Sons, 1995. 560p
- [8] NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B. Three alternative empirical ionospheric models - are they better than GPS broadcast model?. *Proceeding of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning*, Columbus, OH, USA, Mar. 16-20, v.1, p.240-244, 1992.
- [9] CAMARGO, P.O. Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores de uma frequência. 1999. 191p. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- [10] BAILEY, G.J., and R. SELLEK, A mathematical model of the Earth's plasmasphere and its application in a study of He⁺ at L=3, *Ann. Geophysicae.*, 8, 171-190, 1990.
- [11] BAILEY, G.J., and R. SELLEK, and Y. RIPPETH, A modelling study of the equatorial topside ionosphere, *Ann. Geophysicae*, 11, 263-272, 1993.7
- [12] BAILEY, G.J., and N. BALAN, A low-latitude ionosphere-plasmasphere model, *STEP Handbook on Ionospheric Models*, ed. R.W. Schunk, Utah State University, 173-206, 1996.
- [13] HOLLWEG, G. V.; PETRY, A.; MATTOS, E.; PUNTEL, F. E. and KLIPP, T. S. . Pre-liminary evaluation of accuracy improvement in Arduino-based single-frequency GPS receiver using ionosphere simulation data. *IV Conference on Computational Interdisciplinary Sciences*, 2016, São José dos Campos. *CIS 2016 Proceedings*, 2016.
- [14] Takasu, T. RTKLIB ver. 2.4.2 Manual, http://rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf/, acessado em 06/07/2019 às 00:12h.
- [15] Ionosféra, <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ionosfera>, acessado em 06/07/2019 às 00:12h.
- [16] Bailey, G.J., Y.Z. Su, and N. Balan, The Sheffield University plasmasphere ionosphere model – a review, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 59, 1541-1552, 1997.



- [17] Fraser-Smith, A.C. Centered and eccentric geomagnetic dipoles and their poles, 1600-1985, Rev. Geophys., 25, pp. 1-16, 1987.
- [18] RINEX: <https://en.wikipedia.org/wiki/RINEX> acessado em 06/07/2019 às 00:12h
- [19] C++ Builder: https://pt.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B_Builder acessado em 16.07.2019
- [20] J. Sanz Subirana; J.M. Juan Zornoza and M. Hernández-Pajares. GNSS DATA PROCESSING - Volume I: Fundamentals and Algorithms. Maio de 2013