

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

RODRIGO TEIXEIRA FIGUEIRA

Correção no Apontamento de Imagens da Sonda Cassini

Guaratinguetá

2017

Rodrigo Teixeira Figueira

Correção no Apontamento de Imagens da Sonda Cassini

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica .

Orientador: Prof^o Dr. Rafael Sfair

Guaratinguetá

2017

F475c Figueira, Rodrigo Teixeira
Correção no apontamento de imagens da Sonda Cassini / Rodrigo
Teixeira Figueira – Guaratinguetá, 2017.
31 f : il.
Bibliografia: f. 31

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Rafael Sfair de Oliveira
Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Santos Sampaio

1. Análise de imagem. 2. Planetas. 3. Algoritmos. I. Título

CDU 523.4


Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

RODRIGO TEIXEIRA FIGUEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM
ENGENHARIA MECÂNICA "

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Profº Dr. MARCELO SANTOS SAMPAIO
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Profº Dr. Rafael Sfair
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. Othon Winter
UNESP-FEG



Profª. Drª. Silvia Maria Giuliatti Winter
UNESP-FEG

Dezembro , 2017

Dedico esse trabalho de conclusão de curso ao meu amigo e orientador Rafael Sfair.

AGRADECIMENTOS

As vezes coisas extraordinárias acontecem em nossas vidas e não temos ideia do porque. Acredito que nada é por acaso e que Deus é responsável por esses acontecimentos que nos trazem felicidade, conhecimento, confiança e que aumentam nossa auto estima. É impossível começar um agradecimento sem antes agradecer nosso criador e pedir sua benção todos os dias.

Agradeço a meus pais e irmãos por um papel muito importante em minha vida. Eles são responsáveis pela minha educação e pela formação do meu caráter. Essas duas qualidades foram e são essenciais para um bom relacionamento profissional com meus colegas de estudo e de trabalho. Eles também me proporcionaram todo o suporte necessário durante todo o tempo de faculdade.

Agradeço minha namorada pela paciência e por estar ao meu lado todos os dias da minha jornada sempre me dando atenção, carinho, e principalmente força para vencer os desafios que a universidade me proporcionou.

E não posso me esquecer das pessoas que me deram toda minha formação acadêmica. Desde os professores do ensino fundamental, ensino médio e técnico até os professores da faculdade. Todos eles me deram várias peças de um quebra cabeças gigante chamado conhecimento, que comecei a montar quando entrei na escola e provavelmente nunca irei terminar.

E um agradecimento especial ao Rafael que esteve do meu lado em 2012 durante minha iniciação científica e me acolheu novamente este ano para evoluirmos mais um pouco neste tema.

“É no fim dos caminhos mais difíceis que estão as maiores vitórias! “
(Patrícia Regina de Souza)

RESUMO

A meta desse trabalho de graduação é desenvolver um algoritmo em IDL que retorne parâmetros para a correção do apontamento de imagens do conjunto de anéis de Saturno capturadas pela sonda Cassini. O apontamento é calibrado corrigindo-se a distância radial de alguma estrutura do anel calculada pelas rotinas do SPICE. O algoritmo irá calcular a diferença entre os dados obtidos pelo SPICE e a posição real da estrutura na imagem. Ao calibrar a estrutura na imagem com uma certa correção radial, todos os pixels da imagem estarão calibrados quando submetidos ao mesmo fator. Com auxílio do filtro Canny, o foi possível identificar a posição exata do centro na falha de Keeler para todas as imagens trabalhadas. Os pontos calculados pelo SPICE foram então deslocados para o centro da falha de Keeler e o apontamento da câmera pôde ser calibrado segundo o fator de correção calculado. O método mostrou-se eficiente na calibração radial do apontamento das imagens da sonda Cassini e não apresentou defasagem significativa quando comparado com um método alternativo de correção de posicionamento de pontos.

PALAVRAS-CHAVE: Correção de apontamento. Filtro Canny. Distância do pixel.

ABSTRACT

In this work we present an IDL algorithm that calculates the parameters for the pointing corrections applied to images of the rings of Saturn taken by the Cassini spacecraft. SPICE routines are used to calculate the pixels where some ring structure is located in the image, but they are not precise enough. The algorithm presented in this work verifies the difference between the SPICE data and the actual position of some known structure in the image. Once the structure is calibrated, all the other pixels will be shifted when subjected to the same correction factor. Through an IDL code we were able to identify the exact position of the Keeler gap center in the images after applying the Canny filter. The SPICE data were then shifted to the center of the Keeler gap and the camera pointing could be calibrated according to the correction factor. The method was efficient in the radial calibration of the Cassini images and it did not present a significant offset when compared with an alternative method of point position correction.

KEYWORDS: Pointing correction. Canny filter. Pixel distance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Exemplo de imagens capturadas pelo ISS: (a) uma vasta extensão do conjunto de anéis de Saturno capturada pela WAC. (b) o anel F e a borda do anel A capturados pela NAC.	13
Figura 2	Representação gráfica do problema: Vetor posição da sonda (linha tracejada verde), vetores do FOV (linhas contínuas vermelhas), vetor posição do ponto de intersecção (linha traço-ponto preta), e o plano dos anéis (em azul).	17
Figura 3	Representação do CCD: (a) Boresight (Ponto central laranja) e Corners (Pontos vermelhos nos vértices), (b) Posição das medidas STEP e OFFSET.	18
Figura 4	Figura utilizada no projeto de iniciação científica. (a) Toda a extensão da imagem e os pontos calculados pelo SPICE para localização da Falha de Keeler. (b) Detalhe de uma porção da borda do anel A mostrando essa diferença do apontamento do instrumento.	19
Figura 5	Desvio no apontamento da câmera NAC. Os pontos em vermelho deveriam estar na falha de Keeler.	20
Figura 6	Etapas do processo do filtro Canny: (a) Imagem original; (b) Suavização; (c) Gradientes; (d) Máximos locais; (e) Limites; (f) Continuidade; (g) Imagem resultante.	21
Figura 7	Os pixels com a borda branca são os de gradiente máximo local e permanecerão na imagem. Todos os outros pixels serão removidos.	22
Figura 8	Correção dos parâmetros do Canny. (a) Imagem original; (b) Imagem calibrada com filtro Canny; (c) Imagem calibrada com filtro Canny usando parâmetros corrigidos.	23
Figura 9	Imagem <i>N1546720830_1</i> : (a) A linha vermelha é formada por todos os pontos que o SPICE calculou como sendo a falha de Keeler. (b) A linha verde é formada por todos os pontos que o filtro Canny identificou como centro da falha de Keeler. (c) A linha amarela são os pontos do SPICE calibrados.	24
Figura 10	Imagem <i>N1542049376_1</i> seguindo a mesma linha de raciocínio da Figura 9. . .	25
Figura 11	Imagem <i>N1493626926_1</i> seguindo a mesma linha de raciocínio da Figura 9. . .	26
Figura 12	Gráfico da defasagem por pixel da imagem <i>N1546720830_1</i> . Diferença média de 0,6 pixels do método para o ideal com desvio padrão de 0,73 pixels.	27
Figura 13	Gráfico da defasagem por pixel da imagem <i>N1542049376_1</i> . Diferença média de 0,7 pixels do método para o ideal com desvio padrão de 0,68 pixels.	27
Figura 14	Gráfico da defasagem por pixel da imagem <i>N1493626926_1</i> . Diferença média de 0,5 pixels do método para o ideal com desvio padrão de 4,04 pixels.	28
Figura 15	Correção de rotação para imagem <i>N1493626926_1</i> : A linha amarela são os pontos do SPICE depois do deslocamento; Linha verde são os pontos do centro da falha; Triângulo vermelho é formado pelos pontos P1, P2 e P3.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela comparativa entre os resultados do método apresentado neste trabalho e o programa de ajuste de pontos de Sicardy e Sfair (2011)	26
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	DESENVOLVIMENTO	15
2.1	Cálculo do apontamento	15
2.1.1	Funcionamento do SPICE	15
2.1.2	Cálculo da posição de cada pixel	16
2.1.3	Problema de Apontamento	18
3	MÉTODO	20
3.1	Correção do apontamento	20
3.1.1	Primeira etapa: Suavização	21
3.1.2	Segunda etapa: Gradientes	21
3.1.3	Terceira etapa: Máximos Locais	22
3.1.4	Quarta etapa: Limites	22
3.1.5	Quinta etapa: Continuidade	22
4	RESULTADOS	24
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
	REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

A missão para explorar mais de perto o planeta dos anéis, Saturno, contou com a sonda Cassini como protagonista. A nave espacial foi lançada em outubro de 1997 e levou aproximadamente sete anos para chegar em seu destino. Durante esse trajeto passou por outros planetas como Vênus e Júpiter para ganhar um impulso e obter algumas informações desses planetas. Em julho de 2004, Cassini se tornou a primeira espaçonave a orbitar Saturno e a partir daí iniciou sua missão exploratória.

Como foi a primeira vez que uma nave foi enviada para explorar Saturno ao longo de vários anos, a lista de tarefas da Cassini era muito extensa. Para cumprir todos os trabalhos a sonda estava equipada com mais de quinze sistemas de equipamentos diferentes, cada um responsável por obter um tipo de informação. Uma de suas principais metas foi enviar informações inéditas do famoso conjunto de anéis que tanto intriga e atrai pesquisadores, e o subsistema que auxiliou nessa tarefa foi o *Imaging Science Subsystem* (ISS).

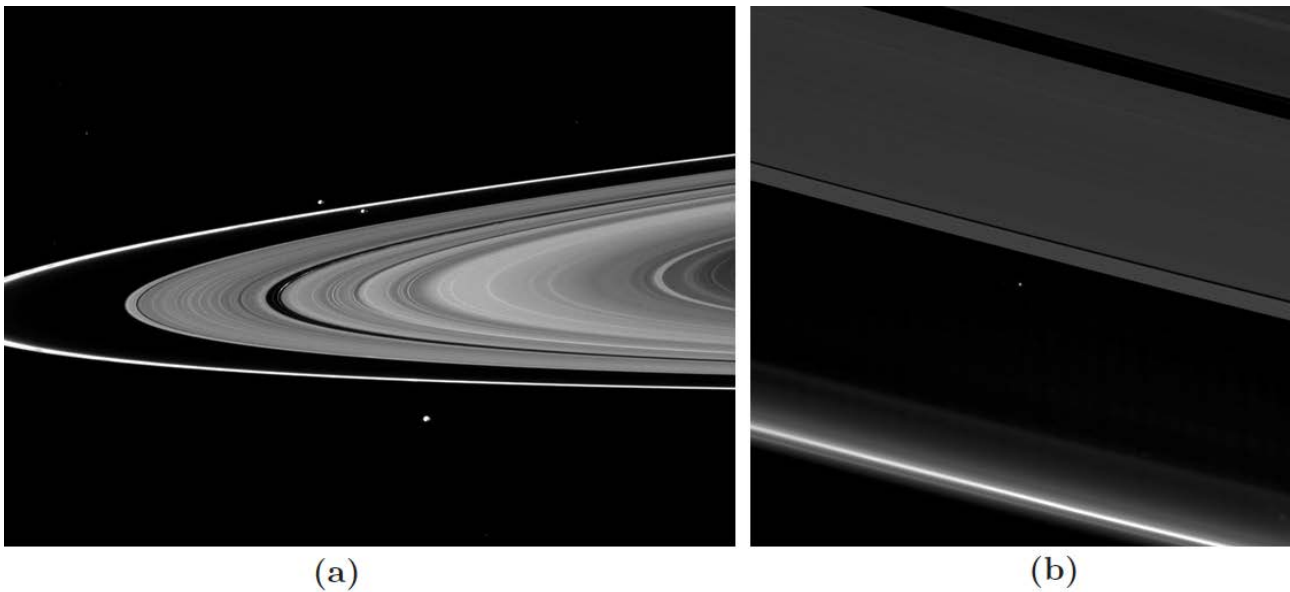
O ISS foi nomeado como os principais olhos da Cassini e foi responsável por todas as imagens que tornaram a sonda tão conhecida. Esse sistema era composto por duas câmeras digitais que eram sensíveis ao espectro de luz visível e ainda conseguiam capturar alguns comprimentos de onda infravermelho e ultravioleta. Uma das câmeras tinha um ângulo de abertura amplo e era conhecida como *Wide Angle Camera* (WAC) e sua principal aplicação era promover o contexto do alvo para o qual o ISS estava apontado. As imagens capturadas pela WAC cobriam longas extensões e podiam mostrar desde vastas extensões do conjunto de anéis (Figura 1a) até o planeta completo. Uma segunda câmera com ângulo de abertura mais estreito era conhecida como *Narrow Angle Camera* (NAC). A principal função da NAC foi obter imagens com mais detalhes, pois o ângulo de abertura estreito proporcionava uma maior resolução da imagem e essa característica permitia que suas imagens mostrassem alvos específicos como pequenos satélites, falhas e formações nos anéis, ou ainda crateras nas superfícies dos satélites maiores (Figura 1b) (DUNFORD; PIAZZA; THOMPSON, 2017).

As câmeras digitais do ISS produziam imagens com mais informações que as câmeras digitais comuns, porque cada pixel era sensível a um intervalo maior de comprimentos de onda de luz como dito anteriormente. Essas câmeras também tinham filtros especiais que podiam ser combinados para obter diferentes informações como por exemplo indicativos da composição do alvo. Além disso, elas foram tão bem desenvolvidas que tiveram sua vida útil duas vezes maior que o projetado. Essas câmeras trabalharam durante 20 anos sob condições severas do espaço sem perder a qualidade nas imagens.

Ambas as câmeras foram muito importantes para essa missão, pois as imagens capturadas por elas ajudaram cientistas a entender melhor os padrões de movimento e topografia dos satélites e a medir órbitas e formatos das luas. Outra tarefa importante das câmeras do ISS foi fornecer dados para construção de mapas de estruturas do sistema de anéis. Nestes mapas são mostrados, por exemplo, toda a extensão radial do conjunto de anéis e a posição radial de cada estrutura (DUNFORD; PIAZZA; THOMPSON, 2017).

A formação de mapas dos anéis baseado em imagens foi tema de um projeto de iniciação científica

Figura 1 – Exemplo de imagens capturadas pelo ISS: (a) uma vasta extensão do conjunto de anéis de Saturno capturada pela WAC. (b) o anel F e a borda do anel A capturados pela NAC.



Fonte: (DUNFORD; PIAZZA; THOMPSON, 2017)

na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá em 2012. A proposta era criar um mapa longitudinal do anel F de Saturno composto pela concatenação de imagens onde poderiam ser localizadas azimuthalmente algumas estruturas peculiares desse anel. Um problema apontado ao longo do desenvolvimento deste projeto serviu como inspiração para esse trabalho de graduação (FIGUEIRA, 2012).

A composição desse mapa utilizou vários conjuntos de imagens do anel F. Para fazer a combinação dessas imagens é necessário saber exatamente a porção do anel que uma imagem cobria e sua posição angular, assim pode-se verificar o local exato onde a imagem subsequente do conjunto se encaixa. O cálculo da parcela que cada imagem contribui para composição do anel é executado por algoritmos do CSPICE que usa lógica de programação "C" com um pacote de extensão composto por várias funções chamado SPICE e será introduzido adiante (ver seção 2.1.1). O programa desenvolvido em CSPICE determina o lugar exato onde cortar a imagem baseado nos dados de telemetria da sonda e do planeta no instante que a imagem foi capturada. Depois que o CSPICE calculou as informações necessárias para concatenação do mapa, algoritmos em IDL interpretam esses dados e trabalham as imagens do conjunto cortando, rotacionando e fazendo a composição gráfica do mapa.

Durante a execução desse projeto observou-se um desvio entre o valor real e o valor calculado para o apontamento das imagens capturadas pela câmera NAC. O apontamento da câmera é a direção para a qual o instrumento está voltado no instante em que a imagem foi capturada. A verificação do apontamento é feita quando se calcula a distância entre algum pixel da imagem e um referencial. Esse desvio foi observado quando se precisou determinar a distância entre algum pixel do anel F e o centro de Saturno. Os passos para se calcular a distância radial de algum pixel da imagem serão descritos no capítulo seguinte (FIGUEIRA, 2012).

O apontamento é uma informação importantíssima, porque é com ela que se iniciam diversas outras análises como medições de distâncias e determinação de órbitas, por exemplo. Esse trabalho de graduação tem como objetivo desenvolver um método para correção do apontamento das imagens

capturadas pelo ISS da sonda Cassini, com foco nas imagens da câmera NAC.

O problema será remodelado até o ponto em que o apontamento é calculado para se verificar a diferença entre o valor calculado e o valor real quando os pontos são plotados na imagem. Então será explicado como a imagem deve ser tratada afim de que seja possível identificar a posição correta para os pontos calculados. Por fim, serão apresentados alguns exemplos de imagens com apontamentos corrigidos e serão discutidos os pontos de melhorias que ainda podem ser implementadas neste método.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 CÁLCULO DO APONTAMENTO

Para analisar o problema identificado em 2012 no trabalho de iniciação científica "Mapeamento Longitudinal do Anel F de Saturno" é preciso primeiro seguir os mesmos passos para cálculo do apontamento do instrumento. A única diferença é que ao invés dos cálculos serem feitos em algoritmos "C", eles foram executados por algoritmos IDL com pacote de extensão SPICE. Optou-se pela utilização do IDL como base de programação pois é uma forma de simplificação do problema. Com isso o programa que calcula o apontamento da câmera é o mesmo que trabalha as imagens. Todos os parâmetros das funções utilizadas durante o cálculo estão comentadas no código do programa e ficarão disponíveis para consulta e edição.

A distância radial é usada para verificação do apontamento do instrumento. Para calcular a distância radial de uma estrutura do anel presente em uma imagem, é necessário uma combinação de funções do pacote SPICE e o entendimento da geometria das câmeras. Com esses dois conceitos é possível calcular a distância radial de qualquer ponto nos anéis presente em uma imagem. Para melhor ilustrar o funcionamento do método é necessário verificar como os resultados foram obtidos e como o problema se apresenta.

2.1.1 Funcionamento do SPICE

O SPICE é um sistema de informações criado pela *Navegation and Ancillary Information Facility* (NAIF) para auxiliar cientistas e engenheiros no planejamento de missões espaciais. Os dados armazenados pelo SPICE estão divididos em blocos chamados *Kernels*, que contém dados das sondas, planetas, instrumentos e informações de planejamento de missões. O SPICE possui também uma biblioteca de funções que é capaz de interpretar os dados dos kernels e efetuar diversos cálculos para obter os resultados desejados, no caso, a distância radial de alguma estrutura do conjunto de anéis que aparece em pixels das imagens (BAALKE; ACTON, 2017).

O cálculo do apontamento do instrumento é baseado na geometria do problema. Para obter os vetores de apontamento dos instrumentos é preciso antes ter algumas informações de telemetria da sonda no exato momento em que a imagem foi capturada. Esse instante de tempo é uma informação muito importante, pois todas as rotinas do SPICE usadas nesse projeto estão em função dele. O tempo da imagem (MID_TIME) é obtido de um arquivo com extensão ".LBL". O MID_TIME que está em formato padrão contendo ano, mês, dia e hora é convertido para um formato de contagem em segundos.

Uma vez determinado e convertido o tempo da imagem é possível calcular a primeira informação de telemetria da sonda que é a posição da mesma em relação ao referencial de Saturno (IAU_SATURN). Existe uma função no SPICE que retorna o vetor posição de um corpo em relação a outro no referencial desejado em um determinado instante de tempo. Esta função foi configurada para retornar a posição da sonda Cassini em relação a Saturno, no referencial do próprio planeta, no momento em que a imagem foi capturada (Figura 2 - Vetor Verde).

Em seguida é preciso criar um plano coplanar ao conjunto de anéis de Saturno. Esse plano é criado a partir de um ponto e de um vetor normal ao plano. A função do SPICE que cria o plano foi ajustada para gerá-lo passando pelo centro de Saturno. Em outras palavras, as coordenadas x , y e z do ponto são iguais a zero (0,0,0), e as do vetor normal ao plano são (0,0,1). Isso equivale a dizer que o plano está no equador do planeta e ele serve como referência para o programa localizar o conjunto de anéis no espaço (Figura 2 – Plano Azul).

Outra informação que deve ser obtida é o chamado *Field of View* (FOV) do instrumento que capturou a imagem que está sendo trabalhada (Figura 2 - Vetores Vermelhos). O FOV é um conjunto de vetores unitários do campo de visão de um determinado instrumento. Os vetores são divididos em dois grupos: o *Boresight* (BS) e os *Bounds* (Corners). O BS é o vetor do centro do *Charge-Coupled Device* (CCD) e os Corners são os vetores dos quatro vértices do CCD e todos esses vetores estão representados no referencial da própria câmera. Existe uma função no SPICE que retorna além do conjunto de vetores, o formato do CCD (quadrado ou circular) e o nome do referencial do instrumento (TURNER, 2001).

Para executar os cálculos geométricos todos os vetores devem estar no mesmo referencial e para isso foi determinado como base para cálculos o referencial IAU-SATURN (WINTERLE, 2014). Então antes de executar algum cálculo é necessário rotacionar os vetores do referencial da câmera para o referencial de Saturno. Existe uma função no pacote do SPICE que calcula uma matriz de rotação de um referencial para o outro em um determinado instante de tempo. Esta função foi configurada para rotacionar os vetores da câmera para o referencial de Saturno no momento em que a imagem foi capturada (ACTON, 2001).

Por último, uma função do SPICE utiliza as informações obtidas anteriormente para calcular a distância radial do ponto de intersecção de algum vetor da câmera com o plano. Essa função segue a seguinte sequência:

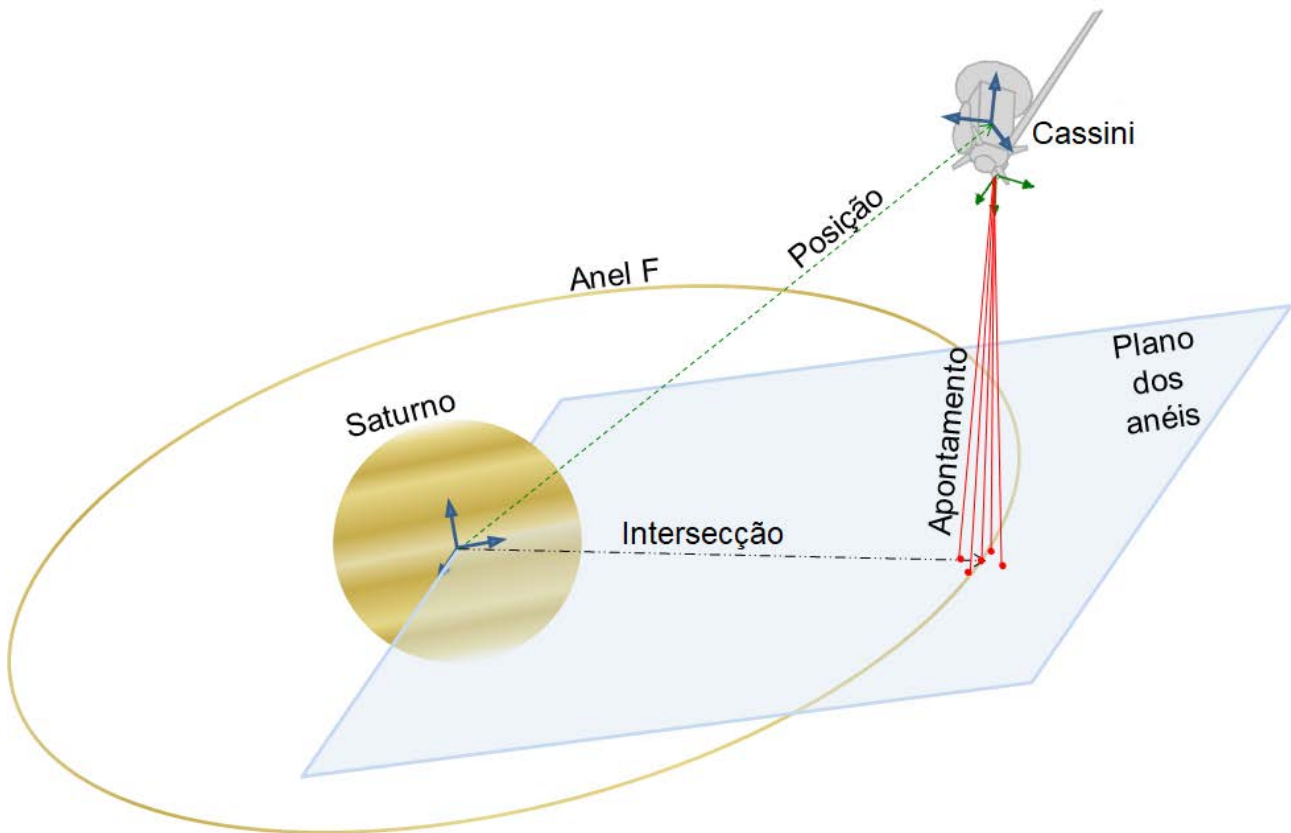
1. Toma como base o instante em que a imagem foi obtida.
2. Verifica a posição da sonda com relação a Saturno neste instante e torna este ponto a origem do vetor da câmera.
3. Prolonga um vetor unitário da câmera, que já está rotacionado para o referencial de Saturno, até cruzar o plano criado para representar os anéis.
4. Por fim, retorna um vetor posição com as coordenadas do ponto de intersecção entre o plano e o vetor prolongado (Figura 2 - Vetor Preto).

A distância radial desse pixel é a norma vetor posição do ponto de intersecção. Essa função efetua o cálculo de apenas um vetor por vez. Para verificar a distância radial dos outros vetores do FOV basta configurar o programa para executar um laço como *FOR* ou *WHILE* (GUMLEYM, 2002).

2.1.2 Cálculo da posição de cada pixel

Na maioria dos casos o alvo não vai estar bem no centro da imagem, representado pelo BS (Figura 3 - Ponto Laranja), ou nos vértices, representados pelos *Corners* (Figura 3 - Pontos Vermelhos). É necessário então que cada pixel da imagem tenha um vetor correspondente no CCD da câmera. O pixel pode ser considerado um quadrado, portanto podem existir infinitos vetores que passam pela área desse pixel. Por definição o vetor do pixel será o vetor que passa pelo centro do pixel. Os vetores BS e

Figura 2 – Representação gráfica do problema: Vetor posição da sonda (linha tracejada verde), vetores do FOV (linhas contínuas vermelhas), vetor posição do ponto de intersecção (linha traço-ponto preta), e o plano dos anéis (em azul).



Fonte: Autoria própria

Corners não passam no centro de nenhum pixel. Na verdade o BS passa pela aresta dos pixels centrais e os *Corners* passam pelas arestas dos pixels dos cantos da imagem (Figura 3b).

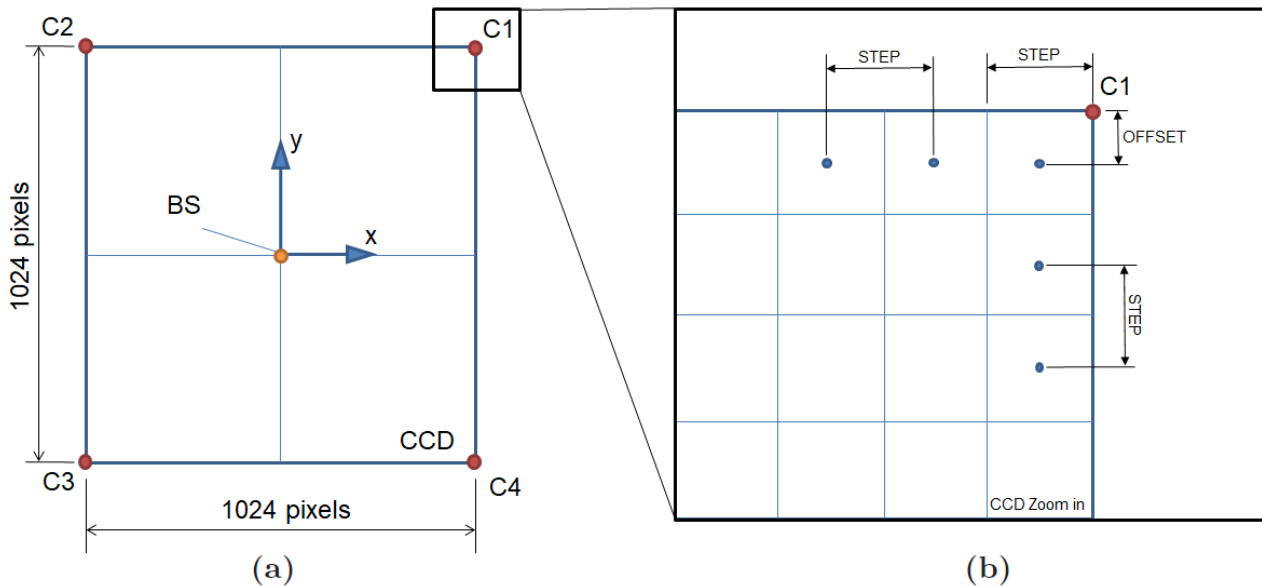
O cálculo do vetor do pixel foi baseado nas coordenadas dos vetores BS e dos *Corners* representados no referencial do instrumento. Todos esses dados são obtidos pela função que retorna o FOV do instrumento. Analisando o BS gerado pela função, verifica-se que no centro do CCD as coordenadas x e y tem valor zero e que a coordenada z é perpendicular a esse plano. Também conclui-se que cada *Corner* tem coordenadas respectivas ao quadrante que ocupa (Figura 3a).

Tomou-se o *Corner* do primeiro quadrante (C1) como base para o cálculo dos vetores dos pixels da imagem. O CCD das duas câmeras é um quadrado medindo 1024x1024 pixels (PORCO, 2004). O valor da coordenada x de C1 representa metade da aresta de todo o CCD. Então para calcular a aresta de cada pixel (STEP) basta multiplicar a coordenada x do C1 por 2 e dividir o resultado por 1024. O STEP tem o mesmo valor tanto para abscissa quanto para ordenada uma vez que o pixel e o CCD são quadrados (Figura 3b).

O vetor do primeiro pixel (Pix1) é calculado com base nas coordenadas do vetor C1. Para criar um vetor que passe pelo centro de Pix1 é necessário subtrair uma quantia do vetor C1, pois, como mencionado anteriormente, C1 não passa pelo centro do pixel e sim pela aresta superior direita do mesmo. Essa quantia será chamada de OFFSET e é igual a metade do STEP tanto para abscissa quanto para ordenada. Foi adotado para todos os pixels a mesma coordenada $z = 0,99999067$ de C1.

Com isso, todos os vetores dos pixels podem ser aproximados para um vetor unitário no sistema de coordenadas da câmera (Figura 3).

Figura 3 – Representação do CCD: (a) Boresight (Ponto central laranja) e Corners (Pontos vermelhos nos vértices), (b) Posição das medidas STEP e OFFSET.



Fonte: Autoria própria

Depois de aplicado o OFFSET para o primeiro pixel, basta variar a coordenada x ou y de Pix1 para obter o vetor dos demais pixels da imagem. Essa variação deve ser múltiplo do STEP e nunca deve ser maior que os limites do CCD, que são os *Corners*. Quando o vetor do pixel é determinado, ele pode ser rotacionado para o referencial de Saturno para que seja calculada a distância do ponto de intersecção dele no plano dos anéis.

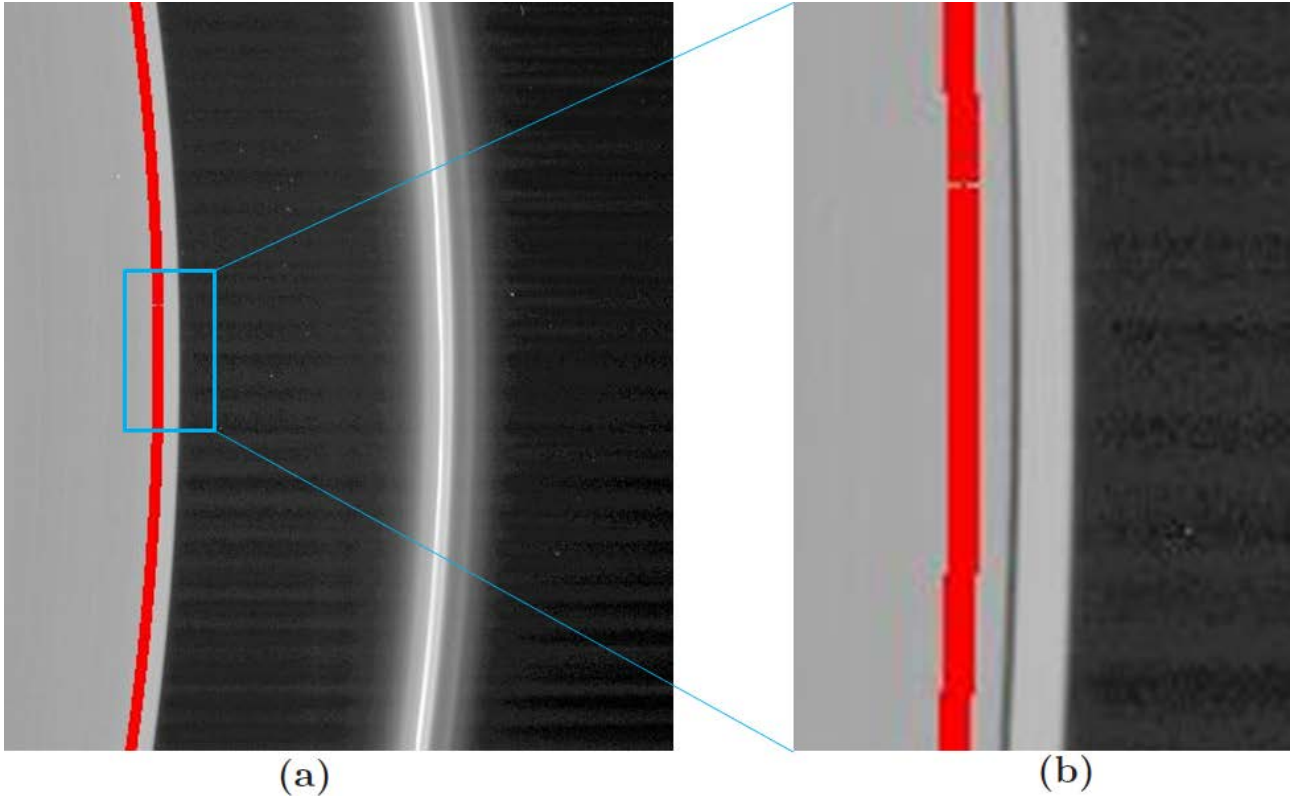
O programa faz a varredura na imagem e calcula a distância de todos os pontos de intersecção dos vetores dos pixels com o plano dos anéis. Ele grava em um arquivo apenas os pixels que apresentaram intersecção dentro de um determinado intervalo radial escolhido de acordo com o objetivo analisado. Depois disso é possível sobrepor estes pontos na imagem e verificar se o apontamento calculado está coerente com a posição do objeto observado.

2.1.3 Problema de Apontamento

Em 2012 quando foram trabalhadas imagens para confecção do mapa longitudinal do anel F de Saturno, foi verificado que as imagens da câmera NAC apresentavam um desvio no apontamento que variava de imagem para imagem (Figura 4). Quando o programa foi configurado para retornar a posição da falha de Keeler, o mesmo retornou pontos que seguiam o perfil da falha, porém estavam defasados (FIGUEIRA, 2012). Essa pequena diferença no apontamento deve-se a precisão do SPICE. Para o desenvolvimento do trabalho na época esse desvio não interferiu muito no resultado final pois o importante para o momento era que o programa calculasse corretamente a posição angular de cada imagem no anel. Com o posicionamento angular correto, as imagens foram cortadas e unidas para compor o mapa. Porém quando o mapa foi composto não foi possível calibrar a posição radial de cada

imagem. O resultado foi um mapa com as estruturas montadas corretamente, porém com uma pequena defasagem no alinhamento radial de algumas imagens (Figura 4).

Figura 4 – Figura utilizada no projeto de iniciação científica. (a) Toda a extensão da imagem e os pontos calculados pelo SPICE para localização da Falha de Keeler. (b) Detalhe de uma porção da borda do anel A mostrando essa diferença do apontamento do instrumento.



Fonte: Autoria própria

Surgiu então a necessidade de um programa que fizesse a calibração do apontamento da câmera. Essa calibração permitiria que o mapa fosse corretamente alinhado para mostrar as estruturas do anel livre de defasagens.

Um tempo depois do encerramento do projeto, tomou-se conhecimento de um programa chamado CAVIAR. O CAVIAR é usado por um grupo fechado de cientistas e é responsável pela correção no apontamento das imagens do ISS utilizando como referência o fundo de estrelas. Ele identifica estrelas na imagem e compara com a posição que deveriam estar através de um catálogo. O próprio programa calcula o deslocamento e a rotação que devem ser aplicados na imagem para que todos os pontos estejam em sua posição correta. Assim todos os pixels da imagem estão calibrados e prontos para serem utilizados em outras análises. Mas o CAVIAR não está disponível publicamente e tem restrições também quanto a instalação em alguns sistemas operacionais. Além disso, é um programa que demanda uma capacidade computacional maior pois utiliza como fonte de pesquisa todo um catálogo de estrelas. No próximo capítulo apresentaremos uma forma de realizar as correções sem a necessidade do CAVIAR.

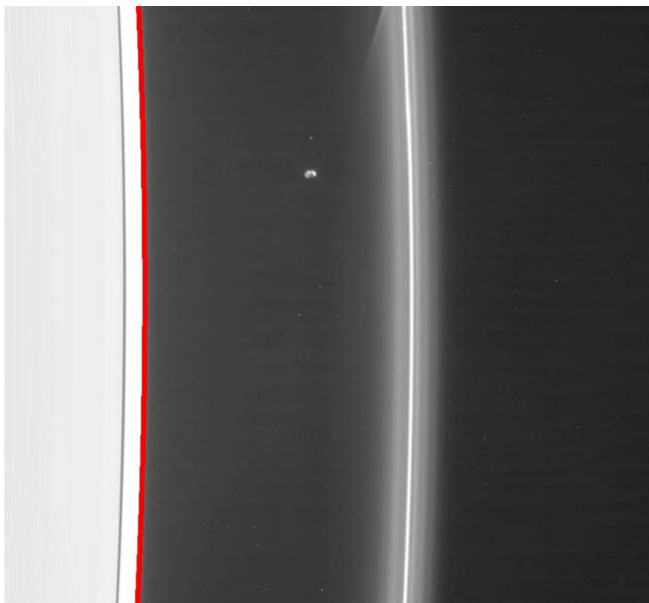
3 MÉTODO

3.1 CORREÇÃO DO APONTAMENTO

O programa para correção do apontamento da câmera proposto por esse trabalho tem uma abordagem similar ao do CAVIAR, mas usando outros elementos como referencial. A ideia é utilizar uma estrutura bem conhecida do anel que possa servir como referência, calcular qual deslocamento que deve ser adotado para calibrar essa imagem e aplicar esse deslocamento para todos os pixels (SFAIR; KLEIN, 2013). Para as imagens utilizadas nesse trabalho, a estrutura definida como referência para os cálculos é a falha de Keeler. O centro da falha de Keeler é localizada aproximadamente a 250 quilômetros da borda do anel A e nela orbita um pequeno satélite chamado Daphinis que está a uma distância de 136.504 quilômetros até o centro do planeta (PORCO; THOMAS P. C. AND WEISS; RICHARDSON, 2007). Essa falha foi definida como referência pois é uma estrutura estreita com apenas 37 quilômetros de largura e suas bordas são bem definidas (TAJEDDINE, 2017).

O primeiro passo é configurar o SPICE para calcular o apontamento da câmera no momento em que ela capturou uma imagem. O SPICE deve retornar um vetor com todos os pixels que estão a uma distância de 136.505 quilômetros do centro de Saturno (V_{keeler}), o que corresponde a posição radial da falha de Keeler. Quando esses pontos são plotados sobre a imagem, percebe-se que eles seguem o formato da falha porém estão defasados de alguns pixels (Figura 5). Observou-se que em alguns casos o perfil dos pontos podem estar rotacionados em relação à imagem.

Figura 5 – Desvio no apontamento da câmera NAC. Os pontos em vermelho deveriam estar na falha de Keeler.



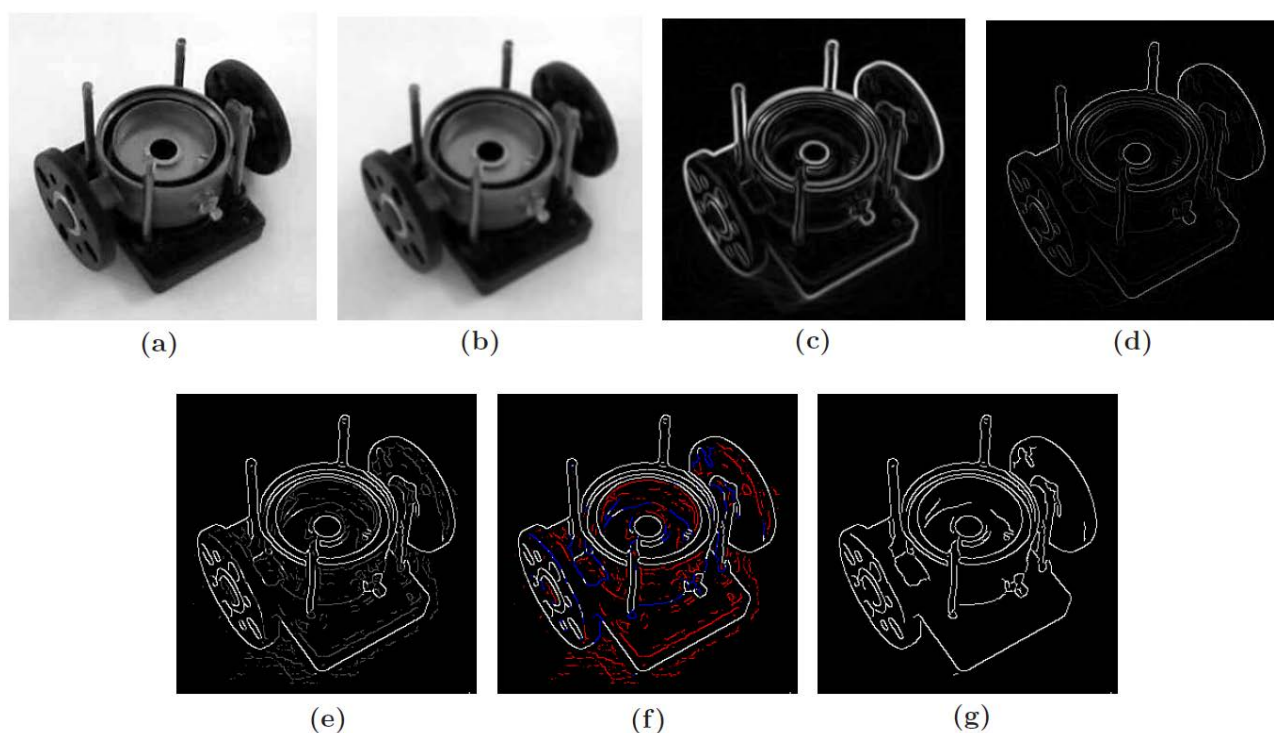
Fonte: Autoria própria

Para calcular a correção é preciso determinar exatamente quais são os pixels que estão dentro da falha de Keeler (ou outro referencial). Então o é preciso identificar as bordas da falha de Keeler e calcular os pixels localizados no centro da mesma. As bordas são identificadas quando existe um

gradiente de luminosidade de um pixel quando comparado com sua vizinhança. Essa análise pode ser feita por diversos filtros detectores de bordas, cada um com uma sistemática diferente.

Para este trabalho foi selecionado o filtro Canny como mecanismo de detecção de bordas (CANNY, 1986). O filtro Canny foi desenvolvido por John F.Canny em 1986, e mesmo sendo antigo, esse filtro ainda é usado em várias pesquisas. Além disso ele tornou-se um dos métodos padrão para detecção de bordas devido a sua resposta otimizada (MOESLUND, 2009). A detecção das bordas da imagem pelo filtro Canny acontece em 5 etapas e a figura a seguir resume essa lógica e mostra o que acontece com a imagem em cada etapa do processo de detecção de bordas:

Figura 6 – Etapas do processo do filtro Canny: (a) Imagem original; (b) Suavização; (c) Gradientes; (d) Máximos locais; (e) Limites; (f) Continuidade; (g) Imagem resultante.



Fonte: (MOESLUND, 2009)

3.1.1 Primeira etapa: Suavização

É aplicado um filtro Gaussiano na imagem que irá suavizar ruídos que possam existir. É possível variar o ganho da função para otimizar os resultados. Com isso a imagem fica sem nitidez parecendo que foi borrada. A remoção dos ruídos é importante pois eles podem ser confundidos com bordas nas etapas seguintes (Figura 6b).

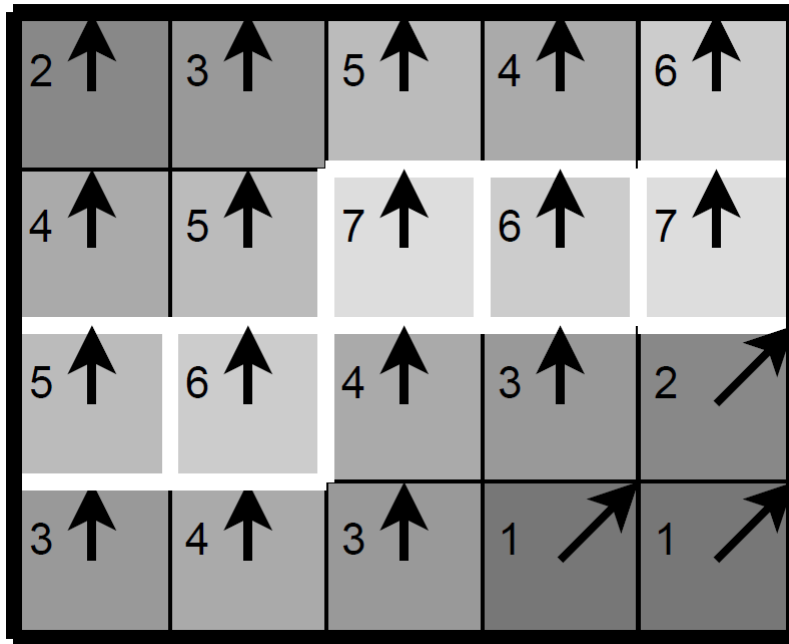
3.1.2 Segunda etapa: Gradientes

O algoritmo do filtro Canny faz a varredura na imagem para localizar todos os pixels onde existe gradiente de luminosidade, ou seja, diferença entre a luminosidade do pixel e sua vizinhança. Quando identificado o gradiente, o pixel recebe o valor e a direção desse gradiente. Nesta etapa as bordas aparecem borradas não sendo possível determinar sua posição correta (Figura 6c).

3.1.3 Terceira etapa: Máximos Locais

Nesta etapa o pixel com gradiente máximo local permanece na imagem e a vizinhança na direção do gradiente é excluída. Os pixels que permanecem fazem parte da borda e essa etapa faz com que as bordas da imagem ganhem nitidez (Figura 6d). Na figura é mostrado um exemplo de gradiente na direção vertical. Os pixels acima e abaixo dos gradientes máximos serão eliminados.

Figura 7 – Os pixels com a borda branca são os de gradiente máximo local e permanecerão na imagem. Todos os outros pixels serão removidos.



fonte: (MOESLUND, 2009)

3.1.4 Quarta etapa: Limites

O filtro Canny utiliza limites superior e inferior para controlar uma faixa de gradientes onde apenas os pixels que tiverem o gradiente dentro desse intervalo são mantidos. Gradientes maiores que o limite superior são classificados como fortes, os que são menores que o limite inferior são eliminados e os que estão entre esses limites são classificados como fracos (Figura 6e).

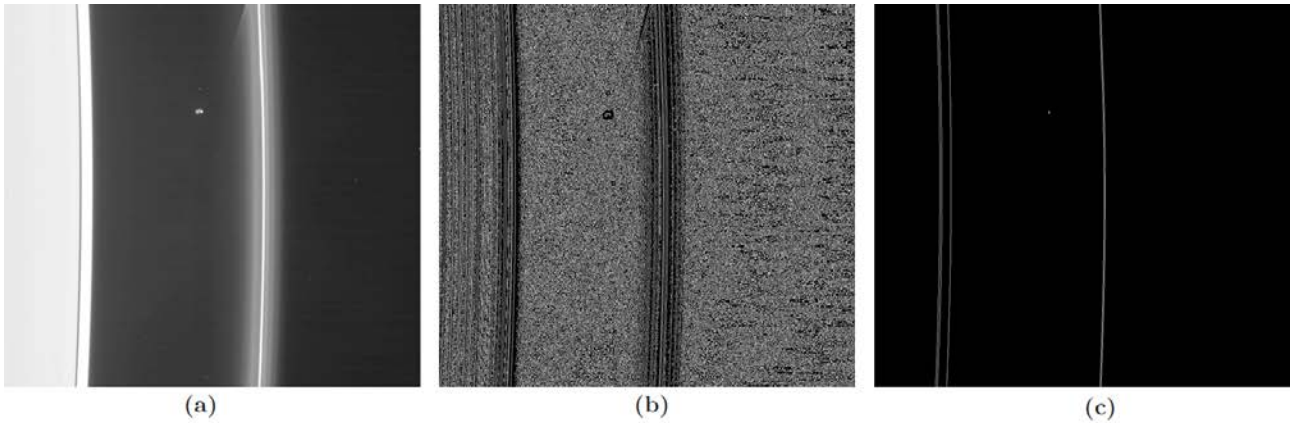
3.1.5 Quinta etapa: Continuidade

Pixels com gradientes fortes são incluídos na imagem resultante enquanto pixels com gradiente fraco passam por uma verificação de continuidade. Se eles fazem ligação com uma borda de gradientes fortes eles são mantidos, caso contrário são excluídos (Figura 6f). Esse último passo é usado para eliminar algum ruído residual causado por uma variação de cor na imagem, por exemplo. Depois de definidas todas as bordas, a imagem filtrada é montada em código binário, ou seja, pixels das bordas (fortes e fracos) recebem valor de luminosidade 1 enquanto todos os outros recebem 0.

Quando o filtro Canny foi aplicado para uma das imagens dos conjuntos (Figura 8a), o resultado apresentou mais ruídos que o esperado (Figura 8b). Para reduzir estas bordas indesejadas foi necessário

modificar os parâmetros máximo, mínimo e ganho do filtro até que a imagem resultante fosse apenas as bordas dos anéis e da falha. Após várias tentativas os limites máximo, mínimo e ganho foram ajustados para 0,985; 0,977 e 0,05, respectivamente, e o resultado mostrou-se satisfatório (Figura 8c).

Figura 8 – Correção dos parâmetros do Canny. (a) Imagem original; (b) Imagem calibrada com filtro Canny; (c) Imagem calibrada com filtro Canny usando parâmetros corrigidos.



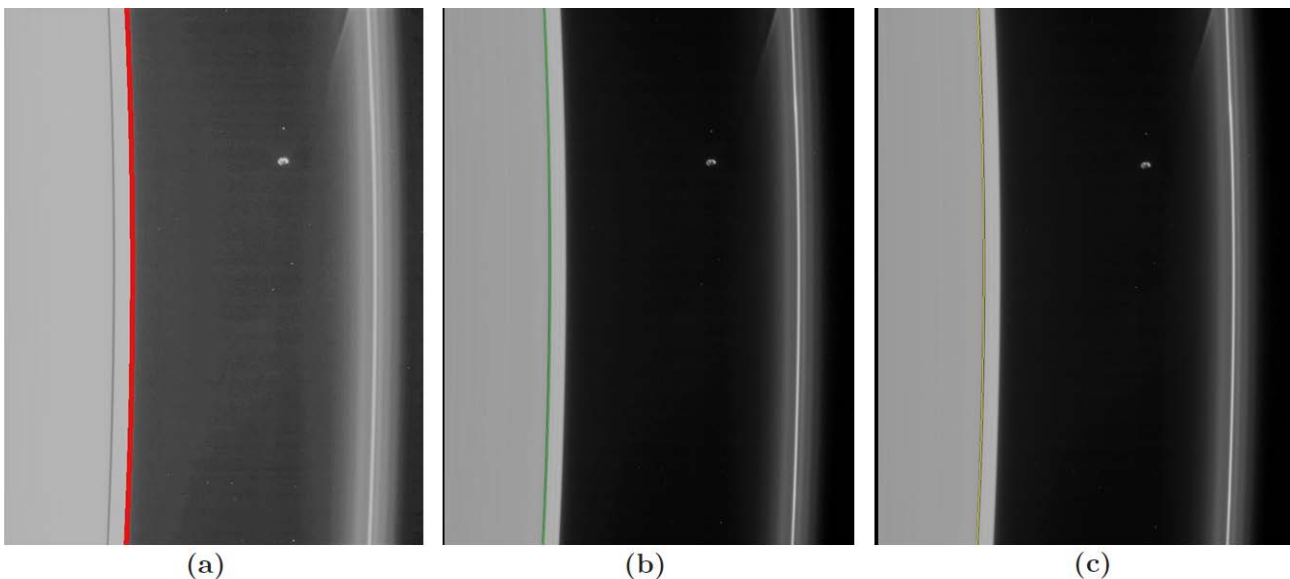
Fonte: Autoria própria

O SPICE toma como base para comparação apenas o pixel na posição central do vetor de pontos calculado pelo SPICE (P_{center}). O cálculo da diferença será baseado apenas nesse pixel, pois assim garantimos que os pontos calculados pelo SPICE vão manter seu perfil depois de aplicada a correção. O programa busca a posição das bordas da falha de Keeler para a linha correspondente ao P_{center} na imagem filtrada (ou coluna dependendo da geometria). Quando as bordas são localizadas, o pixel que está no centro delas é definido como alvo (P_{alvo}). Então o programa calcula a diferença entre o P_{center} e o P_{alvo} . Por fim, essa diferença é aplicada para todos os outros pixels calculados pelo SPICE.

4 RESULTADOS

Os programas foram testados para imagens com Saturno em diferentes orientações com intuito de verificar se os cálculos do SPICE estavam coerentes independentemente da geometria do problema. As imagens a 9, 10 e 11 mostram uma comparação dos resultados calculados pelo SPICE (Vermelho), o resultado ideal que seria o centro da falha de Keeler (Verde) e o resultado da correção pelo método proposto por esse trabalho (Amarelo) para as imagens trabalhadas neste projeto. O SPICE apresentou resultados esperados pois o perfil dos pontos gerados estavam acompanhando a falha nas imagens e houve uma defasagem no posicionamento radial. Houve uma defasagem angular na imagem *N1493626926_1* que será comentada nos próximos parágrafos. O método de detecção de borda e determinação do centro da falha também mostrou resultados esperados identificando a posição correta do centro da falha nas três imagens. E as imagens calibradas ficaram com o apontamento mais próximo do real que os cálculos do SPICE.

Figura 9 – Imagem *N1546720830_1*: (a) A linha vermelha é formada por todos os pontos que o SPICE calculou como sendo a falha de Keeler. (b) A linha verde é formada por todos os pontos que o filtro Canny identificou como centro da falha de Keeler. (c) A linha amarela são os pontos do SPICE calibrados.

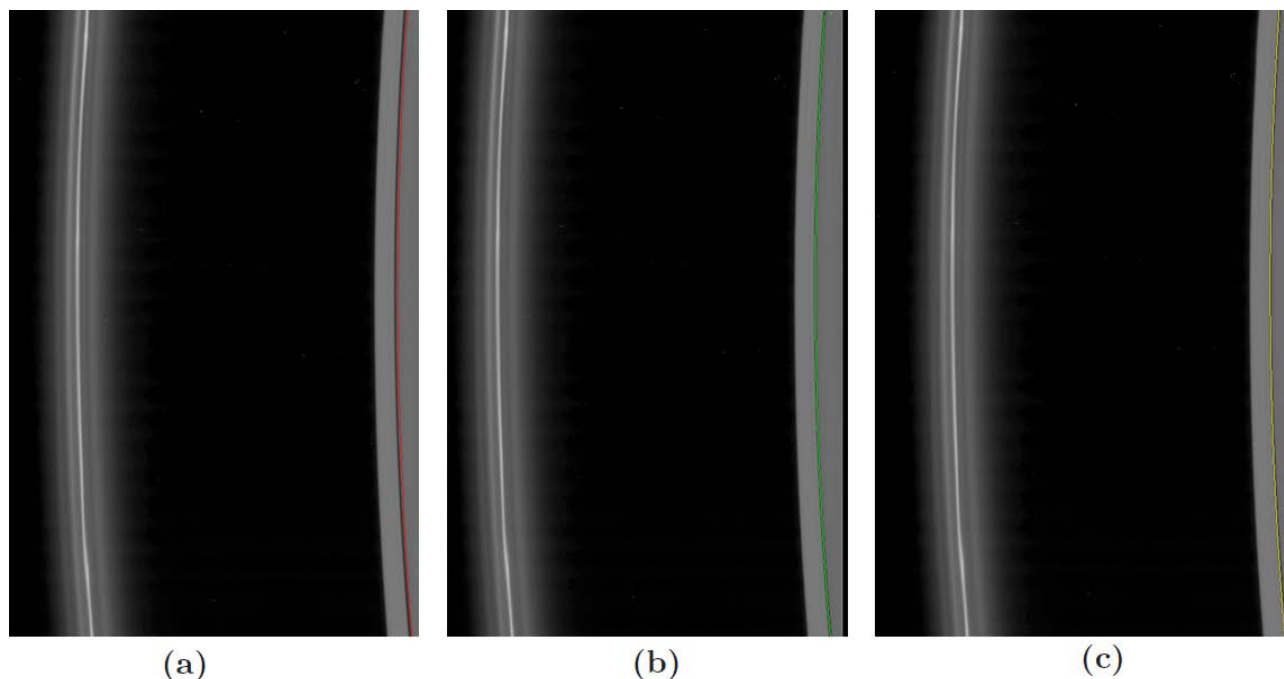


Fonte: Autoria própria

Comparando o resultado ideal com o resultado obtido por esse método é possível verificar sua eficiência quando calculamos a diferença de apontamento para cada pixel das imagens. Os gráficos das figuras 12 e 13 mostram a diferença entre o resultado ideal e o calculado por esse método. Pode-se verificar que esse método apresentou bons resultados para as imagens *N1546720830_1* e *N1542049376_1* com menos de um pixel de diferença em média e desvio padrão menor que 1 pixel.

Verificou-se que a imagem *N1493626926_1* não foi calibrada pois suas extremidades não atingiram o centro da falha de Keeler como mostrado pela figura 11(c) e o gráfico da defasagem por pixel da imagem mostrou a necessidade da aplicação de uma correção angular para esse caso. Até então

Figura 10 – Imagem *N1542049376_1* seguindo a mesma linha de raciocínio da Figura 9.



Fonte: Autoria própria

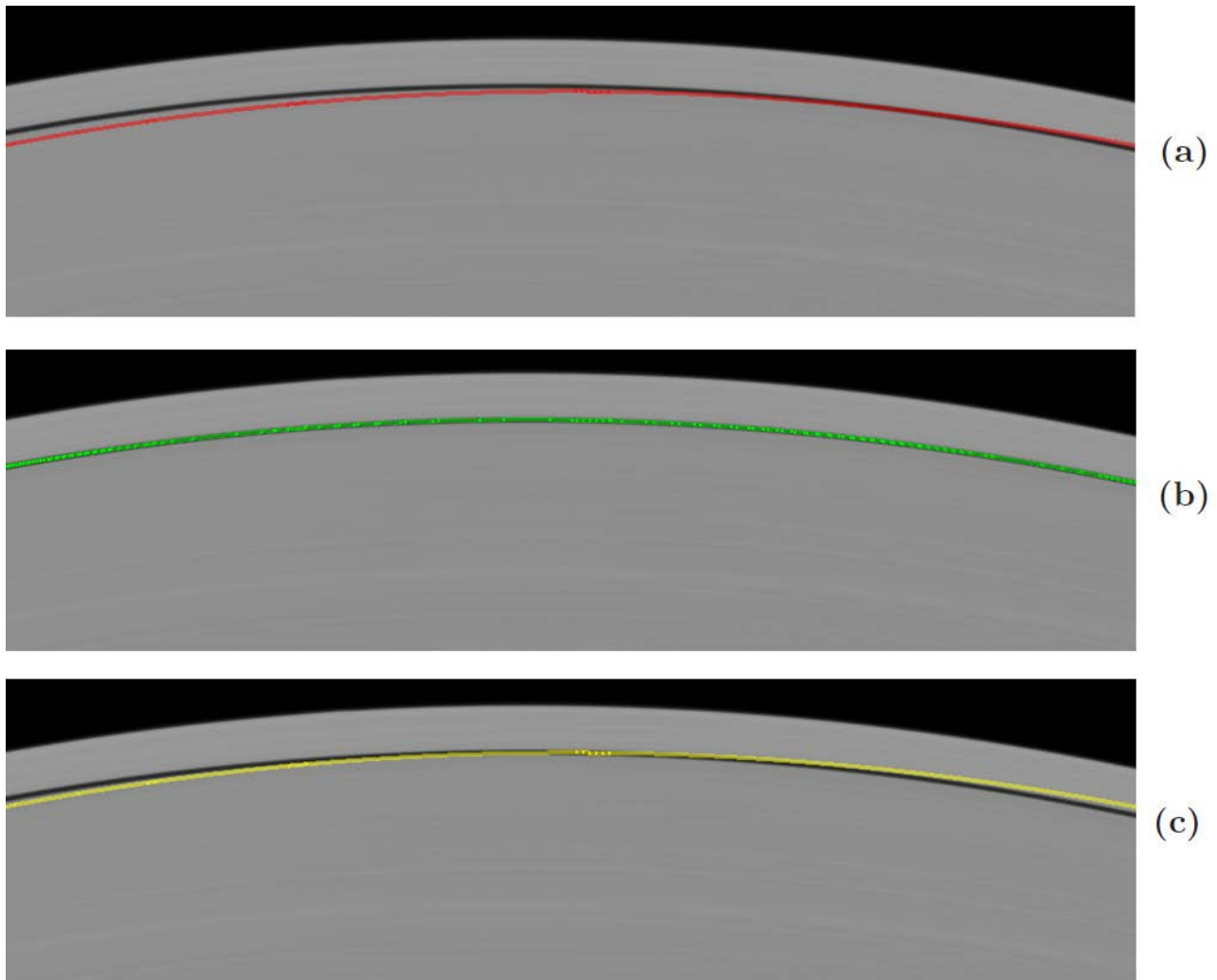
nenhuma das imagens testados apresentou tal desvio e depois dessa imagem começou-se a trabalhar em uma atualização no código para calcular um possível fator de rotação para corrigir este desvio. Como a imagem *N1493626926_1* foi a última a ser trabalhada, esta atualização ainda está em desenvolvimento e não foi implementada. Contudo já foi possível calcular manualmente o ângulo de correção dessa imagem e o resultado obtido foi de 0,78 graus que é muito próximo do coeficiente angular da curva de tendência apresentada no gráfico da figura 14 ($0,0137 \text{ rad} = 0,785 \text{ graus}$), o que serve como indicativo que a lógica que será implementada retornará resultados confiáveis.

A correção da rotação será baseada em três pontos: o pixel central que foi deslocado para o centro da falha de Keeler (P1), o pixel calculado pelo SPICE de uma das extremidades da imagem (P2) e o pixel calculado pelo método da mesma extremidade da imagem (P3). O ângulo (α) entre as semirretas (P1P2) e (P1P3) será a rotação necessária para calibrar a imagem tendo P1 como centro de rotação (Figura 15).

Tivemos a oportunidade de comparar nossos resultados com um programa de ajuste de pontos escrito por Sicardy & Sfair (SFAIR, 2011). Foram fornecidos à esse programa o conjunto de pontos calculados pelo SPICE e o conjunto de pontos da falha de Keeler para as três imagens. O programa efetua translações, rotações e mudança de escala então retorna o deslocamento e o ângulo que precisa ser aplicado ao conjunto do SPICE para que os pontos coincidam com os pontos do centro da Falha. O ângulo calculado pelo programa de ajuste de pontos foi aplicado para rotacionar a imagem *N1493626926_1* (Figura 16).

A tabela 1 mostra um comparativo entre o método proposto neste trabalho e o programa de ajuste de pontos de Sicardy & Sfair (SFAIR, 2011). As colunas "Deslocamento" mostram o quanto o P_{center} calculado pelo SPICE está defasado do centro da falha. Este é o valor aplicado para todos os pontos na hora da calibração. As colunas "Rotação" mostram o ângulo que deve ser aplicado para corrigir

Figura 11 – Imagem N1493626926_1 seguindo a mesma linha de raciocínio da Figura 9.



Fonte: Autoria própria

os pontos depois do deslocamento. E as colunas "Defasagem da Extremidade" mostram quanto os pontos da extremidade da imagem ficaram defasados do centro da falha depois de aplicado apenas o deslocamento. Caso esse valor seja muito grande é necessário aplicar uma rotação na imagem.

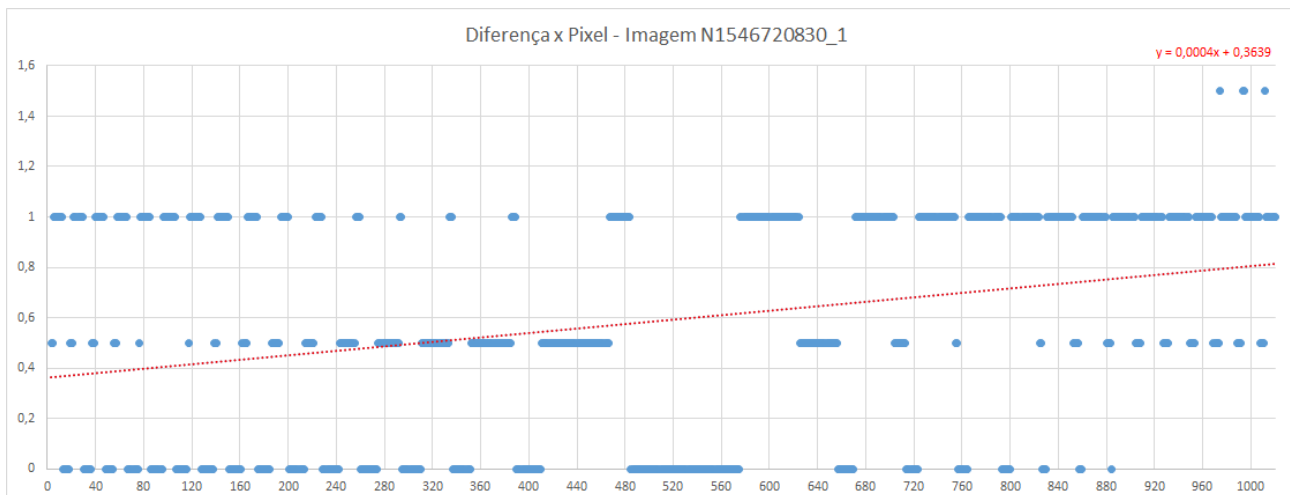
Tabela 1 – Tabela comparativa entre os resultados do método apresentado neste trabalho e o programa de ajuste de pontos de Sicardy e Sfair (2011)

Imagem	Resultado na Análise			Programa de Pontos (Sicardy & Sfair)		
	Deslocamento (Pixel)	Rotação (Grau)	Defasagem da Extremidade (Pixel)	Deslocamento (Pixel)	Rotação (Grau)	Defasagem da Extremidade (Pixel)
N1546720830-1	-28	-	1	-28	0,02	1
N1542049376-1	-4	-	2	-3	0,03	1
N1493626926-1	4	0,78	7	4	0,79	7

Fonte: Autoria própria

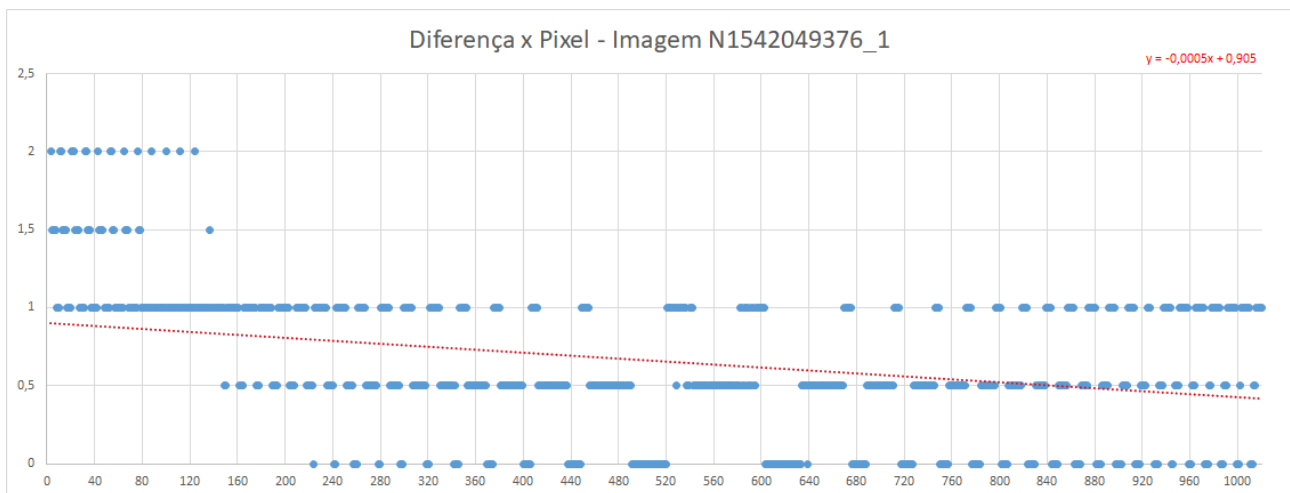
Com a tabela 1 é possível verificar uma boa concordância dos resultados do método desenvolvido

Figura 12 – Gráfico da defasagem por pixel da imagem *N1546720830_1*. Diferença média de 0,6 pixels do método para o ideal com desvio padrão de 0,73 pixels.



Fonte: Autoria própria

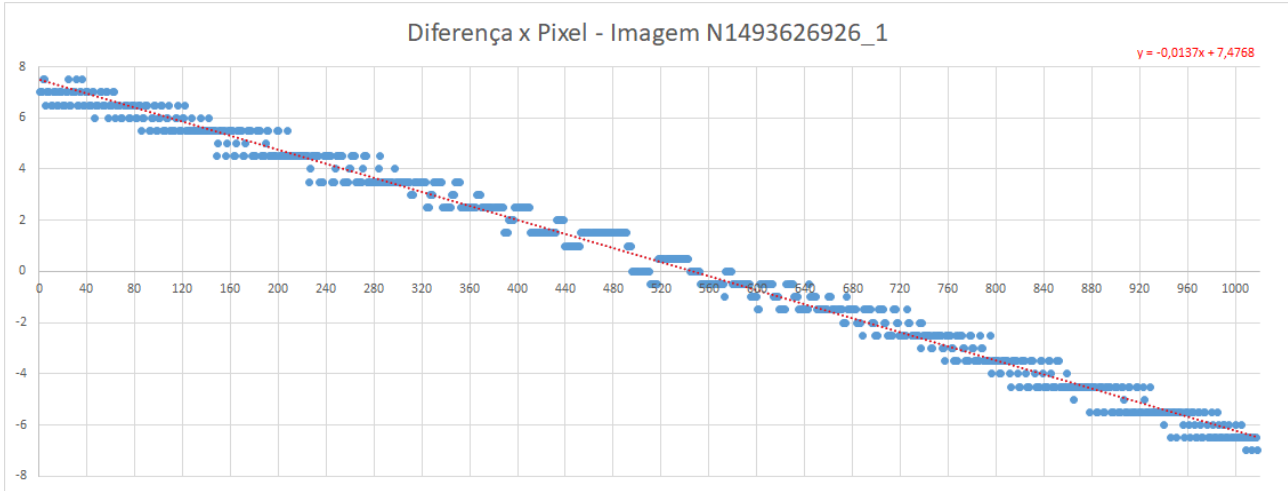
Figura 13 – Gráfico da defasagem por pixel da imagem *N1542049376_1*. Diferença média de 0,7 pixels do método para o ideal com desvio padrão de 0,68 pixels.



Fonte: Autoria própria

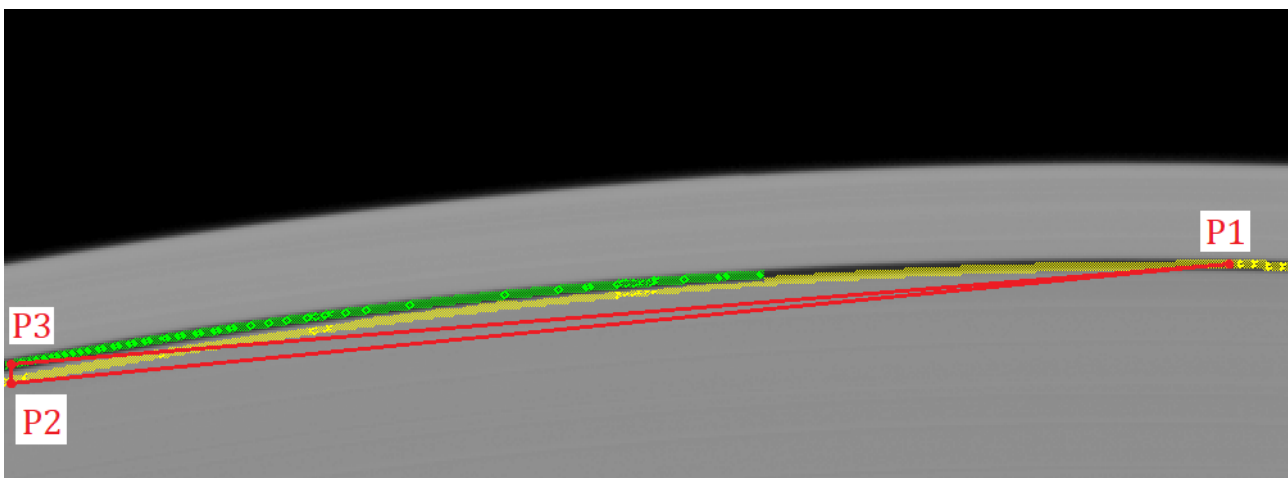
nesse trabalho quando comparado com método mais complexo e computacionalmente custoso de ajuste de pontos. Quando foi aplicado o deslocamento e o ângulo de rotação calculados pelo programa de pontos na imagem *N1493626926_1*, a calibração foi concluída.

Figura 14 – Gráfico da defasagem por pixel da imagem *N1493626926_1*. Diferença média de 0,5 pixels do método para o ideal com desvio padrão de 4,04 pixels.



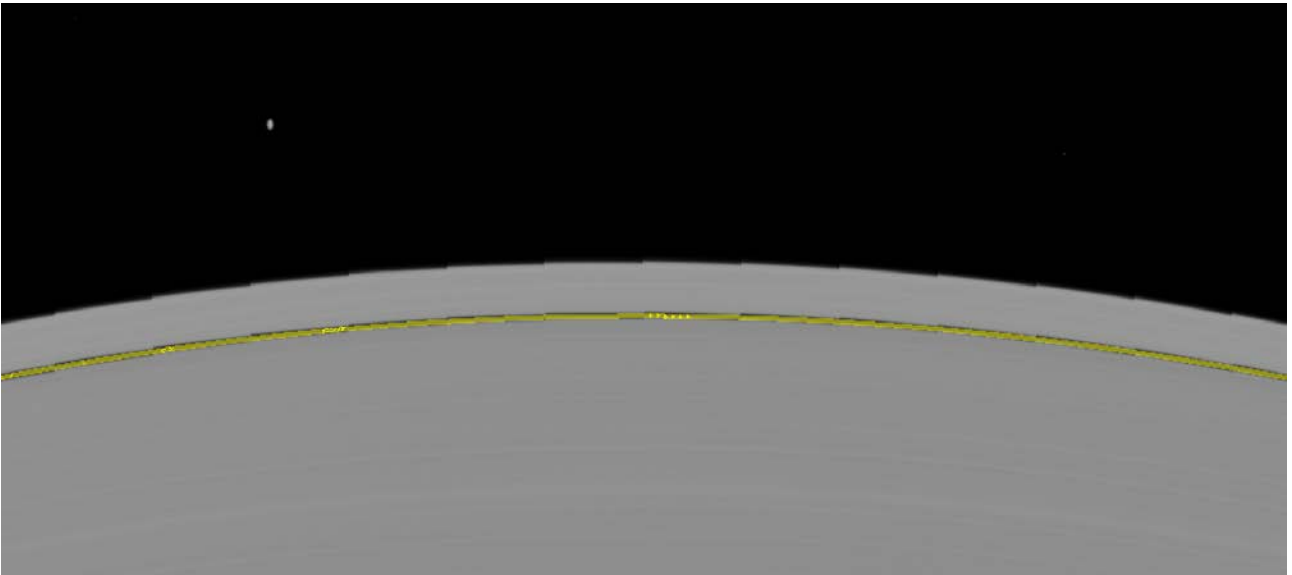
Fonte: Autoria própria

Figura 15 – Correção de rotação para imagem *N1493626926_1*: A linha amarela são os pontos do SPICE depois do deslocamento; Linha verde são os pontos do centro da falha; Triângulo vermelho é formado pelos pontos P1, P2 e P3.



Fonte: Autoria própria

Figura 16 – Resultado da calibração do apontamento e rotação da imagem *N1493626926_1*.



Fonte: Autoria própria

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As imagens capturadas pela câmera NAC tendem a ter um erro no apontamento. Devido a alta resolução da câmera, o mínimo desvio no apontamento calculado resulta em uma diferença de alguns pixels na imagem. Neste trabalho foram consideradas imagens em que a resolução de cada pixel era de aproximadamente 7 quilômetros o que significa uma alta resolução comparando com a ordem de grandeza das quantidades estudadas no problema. Portanto faz-se necessário um programa que auxilie na correção do apontamento para que os resultados das análises não sejam comprometidos.

O método proposto nesse trabalho, que utiliza uma estrutura conhecida do anel como referência para calibração do apontamento, mostrou várias vantagens que o fazem uma boa opção na hora da calibração do apontamento das imagens. Primeiro, por ser um método simples ele não demanda um grade potencial para processamento, podendo ser utilizado em máquinas com configurações básicas e em qualquer sistema operacional. Segundo, é que por ser um método novo e por ainda estar em desenvolvimento seu uso é liberado para todos, isso facilita e agiliza o acesso ao código. Terceiro, é que o código está aberto a modificações e melhorias podendo ampliar suas aplicações. O principal ponto positivo é que esse método apresentou resultados muito bons que garantem que a imagem calibrada estará mais próxima do real que as imagens originais.

Esse método também apresenta algumas desvantagens que precisam ser aprimoradas. Para a lógica funcionar é necessário que a falha de Keeler esteja visível na imagem. Em imagens com um campo de visão mais amplo a falha de Keeler não é visível e o filtro Canny não consegue localizar suas bordas. Para imagens desse tipo é necessário que seja determinada outra estrutura do anel como referência. Além disso, esse método foi testado apenas para imagens capturadas quase perpendicularmente ao plano dos anéis e ainda não foi testado para imagens inclinadas. E por último, ainda existem muitos passos que podem ser implementados e automatizados pois o código está em desenvolvimento.

Quando o programa foi testado para uma imagem onde o centro de Saturno estava na parte inferior, observou-se que o SPICE gerou um perfil de pontos que seguia o perfil da falha mas estava com uma pequena rotação. Esse resultado mostrou que as imagens podem estar sujeitas tanto a deslocamento linear quanto deslocamento angular. Como esse evento não havia sido observado nas imagens anteriores, não foi considerada a necessidade da correção na rotação dos pontos calculados pelo SPICE. Este fato despertou a necessidade de uma melhoria no código que calculasse o ângulo para calibração dos pontos.

Também será implementada no futuro uma análise fracionada de imagens que cobrem uma área muito extensa, como as capturadas pela câmera WAC. Quando a imagem tem um campo de visão amplo, a correção que deve ser aplicada pode variar devido ao ângulo de incidência do apontamento do instrumento. Isso pode provocar diferentes correções para cada setor da imagem.

De toda forma, oferecemos aqui uma opção que pode ser utilizada para fins científicos quando for necessário corrigir o apontamento das imagens da sonda Cassini.

REFERÊNCIAS

- ACTON, C. **NAIF Toolkit Docs**. 2001. Disponível em: <https://naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/toolkit_docs/C/spice>. Acesso em: 25 nov. 2017.
- BAALKE, R.; ACTON, C. **SPICE Concept**. 2017. Disponível em: <<https://naif.jpl.nasa.gov/naif/spiceconcept>>. Acesso em: 25 nov. 2017.
- CANNY, J. A computational approach to edge detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, PAMI-8, n. 679, p. 679 – 698, 1986.
- DUNFORD, B.; PIAZZA, E.; THOMPSON, J. **Cassini: The Grand Finale: The journey**. 2017. Disponível em: <<https://saturn.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 25 nov. 2017.
- FIGUEIRA, R. **Mapeamento longitudinal do anel F de Saturno**. Guaratinguetá: DFQ/UNESP, 2012. Relatório de iniciação científica.
- GUMLEYM, L. **Practical IDL Programming**. Medison: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- MOESLUND, T. **Canny Edge Detection**: class notes. [S.l.: s.n.], 2009.
- PORCO, C. C.; THOMAS P. C. AND WEISS, J. W.; RICHARDSON, D. C. Saturn's small inner satellites: Clues to their origins. **SCIENCE**, v. 318, n. 1602, p. 1602 – 1607, 2007.
- PORCO, C. C. e. a. Cassini imaging science: Instrument characteristics and anticipated scientific investigations at saturn. **Space Science Reviews**, v. 115, n. 363, p. 363 – 497, 2004.
- SFAIR, R. **Dinâmica de Anéis e Pequenos Satélites de Urano**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, São Paulo - Brasil, 2011. Período sanduíche em Observatoire de Paris-Meudon.
- SFAIR, R.; KLEIN, K. **A User Guide for Detecting Atlas in Cassini ISS NAC Images**. [S.l.: s.n.], 2013.
- TAJEDDINE, R. e. a. Dynamical phenomena at the inner edge of the keeler gap. **Elsevier - Icarus**, v. 289, n. 80, p. 80 – 93, 2017.
- TURNER, S. Cassini_iss ik kernel. In: EDBERG, S. J. (Ed.). **SPICE Kernels**. [S.l.]: Jet Propotion Laboratory, 2001. p. 1–16.
- WINTERLE, P. **Vetores e geometria analítica**. São Paulo: Pearson, 2014.