



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**CARACTERIZAÇÃO DO CORRELACIONADOR DE  
SINAIS DO INTERFERÔMETRO RÁDIO *BRAZILLIAN*  
*DECIMETRIC ARRAY***

Matheus de Carvalho Abelha

Relatório Final de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientada pelo Dr. José Roberto Cecatto

INPE  
São José dos Campos  
2023







MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**CARACTERIZAÇÃO DO CORRELACIONADOR DE  
SINAIS DO INTERFERÔMETRO RÁDIO *BRAZILLIAN*  
*DECIMETRIC ARRAY***

Matheus de Carvalho Abelha

Relatório Final de Iniciação Científica do programa PIBIC, orientada pelo Dr. José Roberto Cecatto

INPE  
São José dos Campos  
2023



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela oportunidade e cooperação. Ao CNPq pelo financiamento com a bolsa de Iniciação Científica. Agradeço ao professor Dr. José Roberto Cecatto pela orientação, paciência e ensinamentos que me permitiram compreender melhor a importância da Radioastronomia para ciência. Também aos colegas da Divisão de Astrofísica pelo auxílio, acolhimento e experiências trocadas nesse período de trabalho conjunto, em especial ao Dr. Cesar Strauss, ao técnico Khristhiano Souza e ao engenheiro Telmo Machado.



## RESUMO

Interferômetros rádio são instrumentos extensos e complexos, compostos por diversos subsistemas integrados, cada um com uma função específica, operando em sincronismo para garantir seu funcionamento adequado. Tratam-se de conjuntos de antenas dispostas em uma configuração selecionada, conhecida por arranjos, as quais são apontadas para uma fonte celeste emissora de rádio, registrando a radiação emitida. O sinal registrado de todas as antenas passa pelo subsistema receptor e, em seguida, é inserido no subsistema correlacionador, no qual é transformado em dados interferométricos da fonte rádio observada. O devido entendimento sobre o funcionamento do correlacionador de sinais deve ser obtido conhecendo-se em detalhes cada parte de seu *hardware* constituinte, suas respectivas funções e os resultados de testes operacionais. Em complemento, seu *software* de controle deve ter requisitos devidamente estabelecidos, ser testado e validado. Neste trabalho, foram realizados alguns procedimentos relativos à caracterização e testes operacionais do *hardware* do subsistema correlacionador de sinais do interferômetro *Brazilian Decimetric Array*, assim como a participação no desenvolvimento parcial do *software* de correlação. Dentre as etapas metodológicas para a caracterização, podem ser citadas: 1 - Programações para testes de comunicação entre o computador e o FPGA; 2 - Atualização da síntese de frequências; 3 - Manutenção e aperfeiçoamento dos componentes e estruturas do equipamento. Assim, assume-se que os resultados deste trabalho foram satisfatórios, considerando a disponibilidade de tempo, entretanto, o objetivo de gerar o arquivo para imageamento no formato interferométrico padrão não foi possível dentro deste prazo, contudo, espera-se para próximos trabalhos testar novas atualizações para o *hardware*, visando sua continuidade, bem como sua integração e valorização à instrumentação astronômica do INPE, tendo influxo para ser referência internacional de radiointerferômetro.

Palavras-chave: Radioastronomia. Interferometria. Correlacionador.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Janelas atmosféricas de absorção do espectro eletromagnético . . . . .	6
2.2 Diagrama representativo da cadeia de RF . . . . .	7
2.3 Esquemático do funcionamento de um interferômetro multiplicador . . . . .	9
3.1 Esquemático da configuração do arranjo de antenas do BDA . . . . .	16
3.2 Vista de satélite da configuração do arranjo de antenas do BDA . . . . .	17
3.3 Vista a nível do solo <i>in situ</i> das linhas de base do BDA . . . . .	18
3.4 Imagem do FPGA utilizado no correlacionador do BDA . . . . .	19
3.5 Imagem do <i>hardware</i> do correlacionador do BDA, com a caixa aberta, em teste de bancada . . . . .	20
3.6 Esquemático simplificado do sistema do BDA . . . . .	21
3.7 Esquemático do <i>software</i> da célula de correlação . . . . .	22
3.8 O esquemático do <i>software</i> do circuito completo do correlacionador . . . . .	23
3.9 Fluxo típico de programação em uma FPGA . . . . .	24
3.10 Diagrama de blocos básico do funcionamento do interferômetro . . . . .	26
3.11 Programação do registrador primário . . . . .	26
3.12 Vista em planta dos cabos de alimentação e comunicação do BDA . . . . .	29
4.1 Placa FPGA em operação com LEDs funcionando como contador de 8 bits . . . . .	31
4.2 Monitor serial do computador durante a comunicação serial . . . . .	32
4.3 Parte do código em Verilog da célula de correlação (esquerda) e tela do GTKWave (direita) com os sinais simulados e correlacionados . . . . .	33
4.4 Vista interna do painel de uma das antenas . . . . .	36





## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Operador Ex-OR para as componentes $C_1$ e $C_2$ . . . . .	12
2.2 Operador Ex-OR para as componentes $S_1$ e $S_2$ . . . . .	12
2.3 Operador Ex-OR para as componentes $C_1$ e $S_2$ . . . . .	13
2.4 Operador Ex-NOR para as componentes $S_1$ e $C_2$ . . . . .	13
3.1 Características relevantes da placa FPGA Altear Stratix III . . . . .	20
4.1 Tabela de parâmetros A e M para $R = 1$ . . . . .	35
4.2 Lista de trabalhos relacionados ao projeto aprovados para apresentação na quadragésima quinta Reunião Anual da SAB (Fonte: Autor) . . . . .	37



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASIC	–	<i>Application specific integrated circuit</i>
BDA	–	<i>Brazilian Decimetric Array</i>
CAD	–	<i>Computer Aided Design</i>
CME	–	<i>Coronal Mass Ejections</i>
FPGA	–	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
PLL	–	<i>Phase-Locked Loop</i>
RF	–	Rádio Frequência
SAB	–	Sociedade Astronômica Brasileira
SICINPE	–	Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação
UFMG	–	Universidade Federal de Minas Gerais
VHDL	–	<i>VHSIC Hardware Description Language</i>
VHSIC	–	<i>Very High Speed Integrated</i>
VLBI	–	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO . . . . .	2
1.2 JUSTIFICATIVA . . . . .	2
1.3 OBJETIVOS . . . . .	3
1.3.1 OBJETIVOS GERAIS . . . . .	3
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 RADIOASTRONOMIA . . . . .	5
2.2 PRINCÍPIOS FÍSICOS DE RADIOASTRONOMIA . . . . .	5
2.3 INTERFEROMETRIA RÁDIO . . . . .	8
2.4 CORRELACIONADOR DE SINAIS . . . . .	11
<b>3 METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>15</b>
3.1 ESTUDOS E MÉTODOS INICIAIS . . . . .	15
3.2 <i>BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY</i> . . . . .	16
3.3 CARACTERÍSTICAS DO CORRELACIONADOR DE SINAIS . . . . .	18
3.4 PROGRAMAÇÃO DO CORRELACIONADOR E TESTES DE BAN- CADA . . . . .	23
3.5 ATUALIZAÇÃO DA SÍNTESE DE FREQUÊNCIA . . . . .	25
3.6 ATUALIZAÇÃO DOS COMPONENTES DAS ANTENAS . . . . .	27
<b>4 ANÁLISE E RESULTADOS</b> . . . . .	<b>31</b>
4.1 RESPOSTA DO CORRELACIONADOR . . . . .	31
4.2 SÍNTESE DE FREQUÊNCIAS . . . . .	33
4.3 ATUALIZAÇÕES DE EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS . . . . .	36
4.4 APRESENTAÇÃO NA REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASI- LEIRA DE ASTRONOMIA . . . . .	37
<b>5 CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	<b>41</b>



# 1 INTRODUÇÃO

A Radioastronomia é uma ciência vertente da Astronomia que estuda os objetos celestes pelo registro e análise das ondas eletromagnéticas, na faixa de rádio, que esses corpos emitem. Fazendo uso dela, cientistas podem visualizar detalhes invisíveis desses objetos no espectro do visível, como, por exemplo, sinais de rádio provenientes de nebulosas e quasares, a presença de partículas energizadas ou mesmo buracos negros.

Conseguir estudar esses fenômenos permite à ciência ter um melhor entendimento não somente do funcionamento do Universo, sua formação e desenvolvimento, mas também da origem do próprio Sistema Solar e da vida na Terra. Além do estudo de objetos celestes de céu profundo, a Radioastronomia também se faz útil em análises de fenômenos terrestres (SCHUH; BEHREND, 2012), como a rotação terrestre, abalos sísmicos e outros; e observações de atividade solar (SAWANT et al., 2000), como ejeções de massa coronal, que afetam os satélites e astronautas em órbita terrestre (OLIVEIRA; ZESTA, 2019).

Para que este estudo seja possível, as antenas, chamadas de radiotelescópios, são os instrumentos ou detectores responsáveis pela captação desses sinais de rádio. De forma geral, para uma dada frequência de operação, a resolução angular, ou seja o detalhamento da imagem gerada por esses equipamentos, está diretamente ligada ao comprimento de onda e inversamente ao diâmetro do paraboloide (VIOLIN et al., 2010). Dessa forma, seriam necessárias antenas com dimensões impraticáveis para se conseguir resoluções próximas de um telescópio óptico ou quando se tem fontes fracas. Para contornar esse problema, os radioastrônomos usam o princípio da síntese de abertura. Por esse princípio, amostra-se a área de uma antena de grandes dimensões (diâmetro) usando-se antenas de dimensões relativamente pequenas. Com isso, tem-se o uso da técnica de interferometria aplicada à radioastronomia, de forma que duas ou mais antenas em conjunto, ligadas em pares, são capazes de realizar observações e seus sinais são amplificados e combinados através de um correlacionador, tornando possível obter-se imagens com resolução e sensibilidade muito melhores dos objetos celestes.

No Brasil, esse tipo de técnica é utilizada no projeto *Brazilian Decimetric Array* (BDA), que é um interferômetro rádio composto por um conjunto de 26 antenas, radiotelescópios, que foi projetado e construído pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com apoio e participação de outras instituições nacionais e estrangeiras, e está localizado em Cachoeira Paulista no estado de São Paulo,

com objetivo principal de se realizar observações de fenômenos solares energéticos transientes (SAWANT et al., 2000), além de investigações de fenômenos galáticos e extra-galáticos. Assim, o objeto de estudo deste trabalho é o BDA, porém a descrição, interpretação dos resultados e análises feitas, não se restringem a compreender o sistema do rádio interferômetro, mas também de sintetizar a análise das aplicações e potencialidades de seus subsistemas, mais especificamente dentro desse escopo, objetiva-se caracterizar o correlacionador do BDA.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação para esse estudo se dá em diversos aspectos, mas principalmente a caráter particular. A intenção inicial foi adquirir um tema de pesquisa capaz de conciliar Astronomia, que sempre foi uma área de interesse pessoal, com a Engenharia Aeroespacial, que será minha formação acadêmica, mas que ao mesmo tempo não fosse limitado a somente uma iniciação científica e pudesse ser continuado em uma dissertação de mestrado.

Tendo estas condições em mente, o tema foi definido também pensando em como poderia ser relevante para o desenvolvimento de pesquisa e tecnologia da área no Brasil, sendo uma linha de pesquisa promissora não somente no país, mas no mundo todo. Com isso, surge concomitantemente a possibilidade de aproximar a Universidade Federal de Minas Gerais dos institutos de pesquisa ligados ao estudo do espaço.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Este tema de pesquisa se mostra relevante principalmente para o desenvolvimento da tecnologia brasileira de um correlacionador para interferometria, que poderá ser utilizado em outros radiotelescópios brasileiros no futuro. Com este conhecimento, será possível colocar em operação o BDA e, assim, contribuir para o funcionamento de um sistema de observação, estudo e alerta de atividades solares como *Coronal Mass Ejections* (CME) e de observação, estudo e monitoramento da ocorrência de *Solar Flares*, que são prejudiciais ao funcionamento de dispositivos espaciais e aos astronautas, também causando tempestades geomagnéticas na Terra e apagões de rádio e energia.

Além das aplicações práticas citadas, o correlacionador permite o uso da técnica de interferometria para o estudo mais detalhado de corpos e fenômenos celestes, que conduz a um entendimento melhor e mais claro do Universo, da própria formação da Terra e do surgimento da vida.



Mais adiante e fora do escopo deste estudo, pode ser citado que a interferometria de linha de base muito longa, no caso específico chamado de *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), pode ser utilizada para estudos de fenômenos terrestres como rotação planetária, duração dos dias, deformações de massa, abalos sísmicos, derretimento das camadas polares, medição do nível dos oceanos e até mesmo planejamento urbano, conseqüente de estudos de sismos.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 OBJETIVOS GERAIS**

O objetivo geral deste trabalho é a caracterização do *hardware* do subsistema correlacionador de sinais do interferômetro rádio *Brazilian Decimetric Array* (BDA).

#### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conhecer os parâmetros instrumentais do *hardware* do subsistema correlacionador de sinais do BDA através dos seus referenciais teóricos;
- Participar do desenvolvimento do protótipo do *software* de funcionamento do correlacionador;
- Participar da realização dos testes de bancada



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RADIOASTRONOMIA

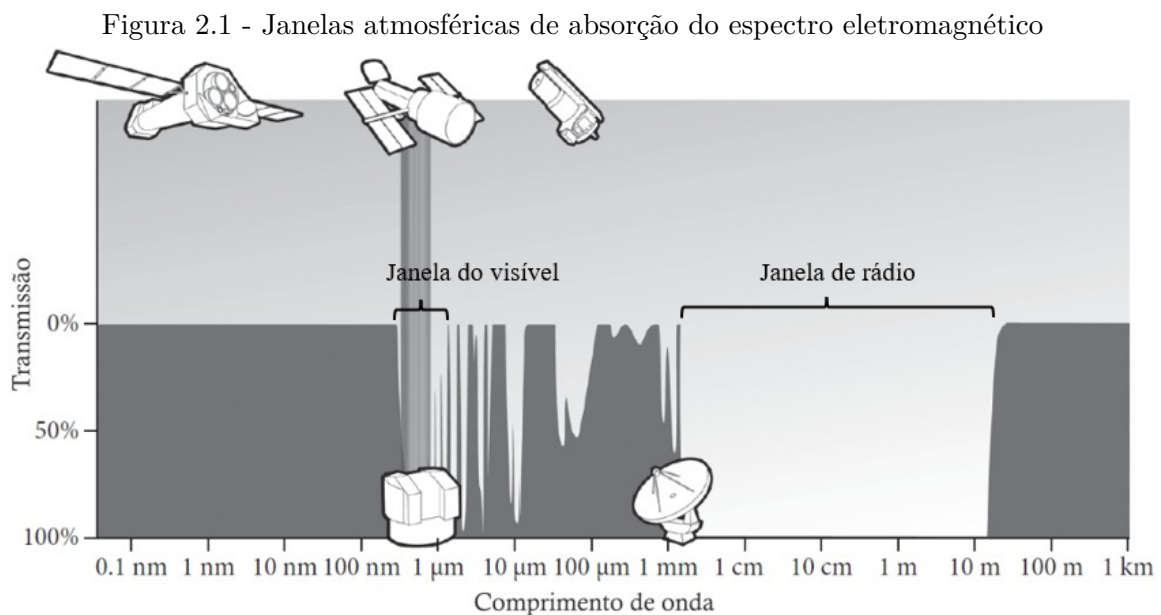
A Radioastronomia teve sua origem por volta de 1931 com Karl G. Jansky, quando foi designado para estudar frequências de interferência em rádio provenientes de tempestades. Isso para auxiliar Alexander Graham Bell a desenvolver uma antena que fosse capaz de minimizar a estática, termo utilizado por engenheiros para se referir aos ruídos gerados por radiofrequências não moduladas, no momento quando radiava sinais de radiotelefonia pelo oceano (VALLEY; TELESCOPE, 1998). Com o experimento, ele foi capaz de identificar a estática decorrente das tempestades, mas foi incapaz de identificar a procedência das outras fontes de ruído. Inicialmente, ele imaginou que a origem desse ruído seria o Sol, mas essa estática era observada quatro minutos mais cedo a cada dia que se passava, o que poderia ser explicado pela diferença entre “dias solares” e “dias siderais”, que ocasionam uma diferença de aproximadamente quatro minutos na duração do dia, e são compensados no calendário com a implementação dos anos bissextos.

Em 1937, Grote Reber deu continuidade às descobertas de Jansky, construindo um protótipo do rádio telescópio moderno no seu quintal. Após pouco sucesso na tentativa de observar radiação em comprimentos de onda menores, pois acreditava que seriam mais fortes e fáceis de detectar, Reber modificou a antena para observar radiações no comprimento de 1,87 metros, e então captou fortes emissões ao longo do plano da Via Láctea. Em 1944 ele publicou os primeiros mapas estelares em rádio frequências e, até o final da Segunda Guerra Mundial, foi o único rádio astrônomo no mundo (VALLEY; TELESCOPE, 1998).

### 2.2 PRINCÍPIOS FÍSICOS DE RADIOASTRONOMIA

A Astronomia como uma ciência no geral consiste da observação de objetos celestes, e os fenômenos físicos associados a estes, que se localizam além das fronteiras do planeta Terra. De acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, ou Radiação de Corpo Negro, todo corpo no universo que está a uma temperatura acima do zero absoluto emite radiação (KRAUS et al., 1966). As componentes, e suas intensidades respectivas, dessa emissão são bem definidas pelas curvas de Planck para radiação de corpo negro, nas quais são representadas as intensidades de radiação para cada comprimento de onda emitido pelo corpo, e essas intensidades estão diretamente associadas com a temperatura em que o corpo se encontra. A astronomia óptica está historicamente interessada em observar fenômenos e objetos que emitem, refletem ou absorvem com-

primentos de onda na faixa do espectro visível ao olho humano, pois o olho humano é o primeiro, e mais simples, instrumento astronômico utilizado para observações desses fenômenos. Os telescópios espaciais mais famosos, como o telescópio Hubble e o James Web's Space Telescope (JWST), são capazes de realizar observações em faixas do espectro no infravermelho, já não mais visível ao olho humano, e conseguem revelar propriedades e características do universo antes desconhecidas. Então, essas observações e os tipos de telescópios que serão utilizados são dependentes do que se deseja observar, e das limitações físicas estruturais, como o tamanho dos telescópios que será discutido mais a frente, e as janelas atmosféricas, que determinam quais comprimentos de onda conseguem penetrar a atmosfera terrestre e serem observados, sendo essencialmente frequências pertencentes ao espectro do visível e rádio, como pode ser visto na figura 2.1, e para quais casos será necessário se construir telescópios espaciais para realizarem a detecção dessas demais radiações.



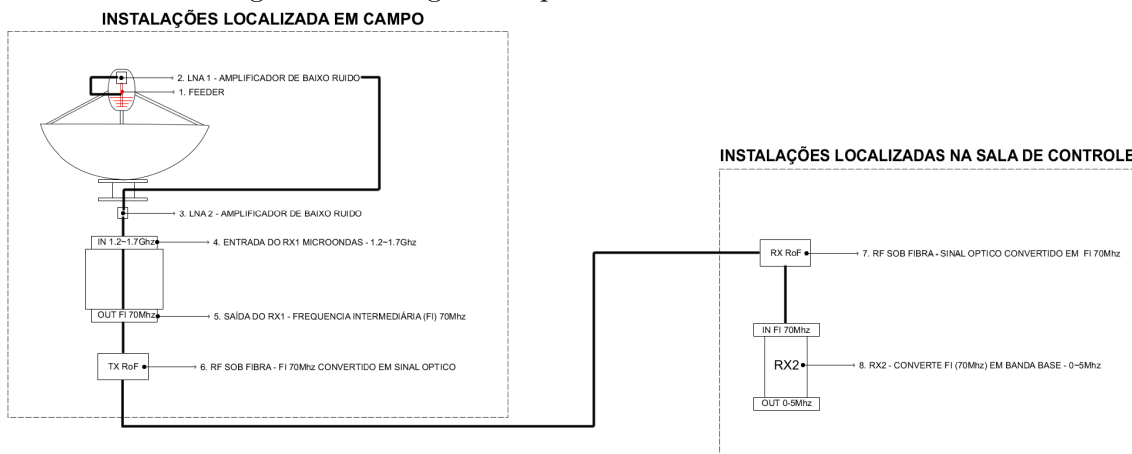
Fonte: Adaptado de Condon e Ransom (2016)

Então, utilizar radiotelescópios para observações astronômicas apresenta diversas vantagens, dentre elas a possibilidade de observar objetos em céu profundo e/ou que possuem baixa potência de emissão de radiação. Radiotelescópios são compostos, em sua maioria, de um prato refletor em diversos formatos possíveis, sendo os parabólicos os mais conhecidos, que refletem as ondas captadas para um foco central, onde se localiza um receptor que recebe e amplifica uma banda de frequência desse sinal para que ele seja forte o suficiente para ser medido e analisado. Como a energia

das emissões em rádio que chegam na Terra é baixa, os radiotelescópios necessitam de pratos, ou “áreas coletoras”, maiores para que possam ser capazes de detectar essas emissões. Outro detalhe importante é a resolução do telescópio que, de maneira simplificada, pode ser entendida como a capacidade se distinguir dois objetos que estejam muito próximos, e um conseqüente nível de detalhamento maior. A resolução angular é diretamente proporcional à razão do comprimento de onda observado pelo diâmetro do prato (KRAUS et al., 1966), ou seja, na frequência de rádio tem-se comprimentos de onda relativamente grandes e, com isso, seriam necessários diâmetros maiores possíveis para se obter uma boa razão. Com isso, tem-se a limitação física da construção de radiotelescópios capazes de observar fontes de emissão muito fracas, já que seriam necessárias dimensões do prato estruturalmente inviáveis.

Na Figura 2.2 é possível ver um esquemático exemplo de um radiotelescópio moderno, no caso de uma das antenas do BDA, cujos detalhes serão explicados mais a frente no trabalho.

Figura 2.2 - Diagrama representativo da cadeia de RF



Fonte: Elaborado pelo servidor do INPE, Técnico Khristhiano L.R. de Souza (2014)

Como uma maneira de contornar este problema dimensional, utiliza-se a técnica de interferometria, na qual são utilizados conjuntos de vários detectores, radiotelescópios relativamente pequenos, operando simultaneamente, para permitir a construção de imagens com resolução espacial satisfatória e com maior detalhamento, sendo possível obter informações mais detalhadas e precisas de estrelas, galáxias, planetas ou outro objeto qualquer no espaço. Um exemplo da importância da resolução espacial

pode ser demonstrado na observação de sistemas binários de estrelas, nos quais, em alguns casos, não é possível definir através de observações diretas se o objeto observado é somente uma estrela ou um conjunto de duas ou mais estrelas.

Os interferômetros, no geral, podem operar nas bandas do óptico, infravermelho e rádio, este último sendo o estudado neste trabalho, tratando-se de um instrumento extenso e complexo, composto por diversos elementos e subsistemas integrados funcionando em sincronismo, e com os sinais sendo registrados em fase. A interferometria se caracteriza pelo desenvolvimento de uma metodologia que supere a problemática da resolução espacial.

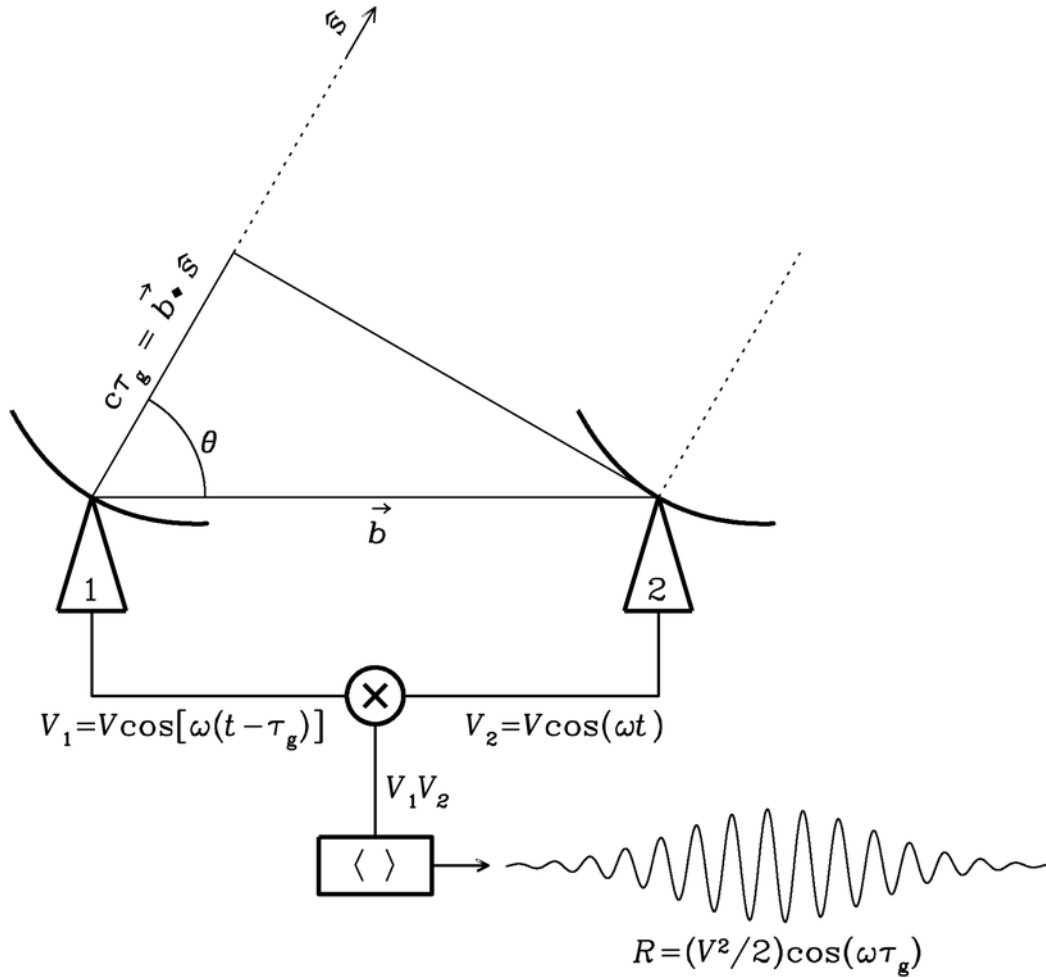
### **2.3 INTERFEROMETRIA RÁDIO**

Na interferometria rádio, o arranjo do radiotelescópio se constitui no conjunto das antenas, dispostas em uma determinada configuração geométrica, para a captação da radiação eletromagnética da fonte de rádio, nas frequências espaciais de interesse, e sua conversão em sinal de voltagem.

As ondas eletromagnéticas advindas de objetos celestes observados, pela considerável distância que se encontram do instrumento astronômico, podem ter suas direções de propagação consideradas como paralelas entre si. Estes objetos também possuem uma posição relativa variável no céu terrestre, como consequência do movimento de rotação da Terra em torno do seu próprio eixo. Desta forma, é possível que estes objetos se encontrem na posição de zênite, ou seja, logo acima dos instrumentos, de forma que a radiação chegue perpendicular à superfície coletora, ou que eles estejam com um determinado ângulo de inclinação em relação à normal da superfície que eles se encontram.

Neste último caso, a onda eletromagnética não é captada ao mesmo tempo por todas as antenas constituintes do arranjo, como pode ser visto na Figura 2.3, representado por  $c\tau_g$ , existindo uma diferença de distância que a onda deve percorrer entre ser captada pelo receptor de uma antena e pelo receptor da seguinte. Esta diferença deve ser levada em consideração para se obter uma coerência de fase dos sinais, e é analisada como um atraso de fase geométrico (CONDON; RANSOM, 2016).

Figura 2.3 - Esquemático do funcionamento de um interferômetro multiplicador



Fonte: Condon e Ransom (2016).

Para um melhor entendimento do princípio de funcionamento de um interferômetro, na Figura 2.3 é representado um esquemático simplificado de interferômetro multiplicador quasi-monocromático, com somente um par de antenas, observando uma banda estreita de rádio centrada em  $\nu = \omega/(2\pi)$ . A letra  $\hat{s}$  representa o vetor unitário na direção de uma fonte pontual distante,  $\vec{b}$  é o vetor da linha de base, apontando da antena 1 para 2. As voltagens das antenas 1 e 2 são dadas pelas Equações 2.1 e 2.2, respectivamente.

$$V_1 = V \cos[\omega(t - \tau_g)] \quad (2.1)$$

$$V_2 = V \cos[\omega t] \quad (2.2)$$

Na qual  $\tau_g = \vec{b} \cdot \hat{s} / c$  representa o atraso geométrico, a distância a mais que a onda eletromagnética plana deve percorrer do momento que ela é captada em uma antena até ser captada na seguinte, e  $\theta$  define o ângulo de inclinação da fonte em relação ao vetor de linha de base, ou  $\gamma = 90^\circ - \theta$  em relação ao vetor normal da superfície do solo, que não está representada na figura.

Estas tensões são amplificadas, multiplicadas e é feita uma média temporal pelo correlacionador, que gera uma resposta de saída  $R$ , dada na Equação 2.3, proporcional à densidade de fluxo da fonte pontual e cuja fase  $\omega\tau_g$  depende do atraso e da frequência. (CONDON; RANSOM, 2016).

$$R = \langle V_1 V_2 \rangle = (V^2/2) \cos(\omega\tau_g) \quad (2.3)$$

A coerência de fase dos sinais de todas as antenas é o que garante o funcionamento do instrumento como um interferômetro, e pode ser obtida pelo ajuste do atraso das fases da onda de rádio incidindo sobre as antenas, em relação a uma antena de referência. Isto deve ser obtido tanto pelo ajuste dos atrasos geométricos, gerados pelas diferenças de propagação do sinal entre a fonte emissora e cada uma das antenas, como citado anteriormente, quanto pela fase dos sinais de cada antena, passando por toda a cadeia de componentes eletrônicos e cabeamento do respectivo receptor, chamado de atraso instrumental, até a entrada do subsistema correlacionador de sinais (PERLEY et al., 1989). Cada par de antenas, que se encontram em distâncias determinadas umas das outras, define o que é chamada de uma linha de base e, por consequência, caracteriza uma dada frequência espacial do sinal proveniente da fonte rádio observada.

Na técnica de interferometria são utilizados correlacionadores, normalmente um por rádio interferômetro. Tais dispositivos podem ser vistos, de maneira simplificada, como um multiplicador e integrador de sinais provenientes de cada par de antenas. Na prática, para a correlação dos dados de cada linha de base, o correlacionador precisa das componentes real e imaginária do sinal de cada antena. Desta forma, obtém-se o sinal complexo de uma, o qual é multiplicado pelo complexo de todas as outras e, em seguida, integrados para a geração dos sinais de todos os pares formados com aquela antena. O mesmo procedimento é efetuado para todas as outras antenas



do arranjo, excluindo-se os pares que se repetem. O sinal complexo é necessário para permitir a obtenção das informações tanto de amplitude quanto de fase de cada linha de base do interferômetro. Todos os sinais, assim gerados na saída do correlacionador, correspondem aos dados interferométricos de todas as frequências espaciais registradas da fonte rádio observada (PERLEY et al., 1989).

## 2.4 CORRELACIONADOR DE SINAIS

Os correlacionadores podem ser do tipo de *hardware*, em que há um dispositivo eletrônico físico, circuito impresso com microprocessador, ligado ao rádio interferômetro e que realiza o processo de correlação; ou de *software*, no qual todo processo é realizado somente através de computação, do tipo GPU (*Graphing Processing Unit*). Dentro da categoria de hardware existem os do tipo ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*), que já são desenvolvidos e fabricados para um propósito específico e determinado, e do tipo FPGA (*Field-Programmable Gate Array*), que são circuitos eletrônicos adaptáveis e programáveis em linguagens de programação como Verilog e VHDL, que oferecem uma solução ótima com possibilidade de customização e um baixo orçamento. (ASIF et al., 2017).

Um dos componentes do correlacionador é o digitalizador, que tem a função de receber as componentes analógicas dos sinais e digitalizar para um sinal digital de valores "alto" e "baixo", ou 1 e 0, respectivamente.

Antes de se discutir o procedimento de um interferômetro de multiplicação complexa, é apresentada a multiplicação entre dois números complexos quaisquer,  $z_1$  e  $z_2$ . Tem-se que o produto entre eles se dá pela multiplicação das Equações 2.4 e 2.5 originando a relação 2.7.

$$z_1 = a + bi \tag{2.4}$$

$$z_2 = c + di \tag{2.5}$$

Nas quais, " $a$ ", " $b$ ", " $c$ " e " $d$ " são números reais e constantes, e " $i$ " representa o imaginário  $\sqrt{-1}$ .

$$z_1 z_2 = (a + bi)(c + di) \tag{2.6}$$

$$z_1 z_2 = (ac - bd) + (ad + bc)i \quad (2.7)$$

Para um correlacionador de multiplicação complexa, tem-se que levar em conta as componentes reais e complexas de um sinal recebido, representadas pelos cossenos e senos, respectivamente. Nas Equações 2.8 e 2.9 são representadas as saídas do correlacionador para correlação das componentes de cossenos e senos. Nelas, o símbolo  $\oplus$  representa o operador lógico Ex-OR (*Exclusive OR*), e  $\bar{\oplus}$  o operador lógico Ex-NOR (*Exclusive NOR*). (RAMESH et al., 2006).

$$C_1 \oplus C_2 + S_1 \oplus S_2 \quad (2.8)$$

$$C_1 \bar{\oplus} S_2 + S_1 \bar{\oplus} S_2 \quad (2.9)$$

Como os sinais já foram amostrados pelo digitalizador, as operações são representadas na Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4.

Tabela 2.1 - Operador Ex-OR para as componentes  $C_1$  e  $C_2$

$C_1$	$C_2$	$C_1 \oplus C_2$
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Tabela 2.2 - Operador Ex-OR para as componentes  $S_1$  e  $S_2$

$S_1$	$S_2$	$S_1 \oplus S_2$
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Tabela 2.3 - Operador Ex-OR para as componentes  $C_1$  e  $S_2$

$C_1$	$S_2$	$C_1 \oplus S_2$
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	0

Tabela 2.4 - Operador Ex-NOR para as componentes  $S_1$  e  $C_2$

$S_1$	$C_2$	$S_1 \oplus \overline{C_2}$
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	1



### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 ESTUDOS E MÉTODOS INICIAIS

Por se tratar de um trabalho focado na caracterização de um equipamento eletrônico já em desenvolvimento, o início do processo foi focado no estudo e revisão literária de diversas referências bibliográficas.

Inicialmente, foi fundamental que diversos conceitos e informações fossem estudados a respeito de Astronomia, Radioastronomia e interferometria rádio, através da leitura de referências como “*Radio Astronomy*” de Kraus et al. (1966), “*Synthesis Imaging in Radio Astronomy II*” de Taylor et al. (1999) e “*Basics of Radioastronomy for the Goldstone-Apple Valley Radio Telescope*” de Miller (1998).

Também foram necessários a revisão e o aprendizado de conceitos mais aprofundados em eletrônica e em correlacionadores de sinais, assim como dos manuais de funcionamento e operação do microprocessador Altera Stratix III e demais componentes, sendo a referência mais relevante para esse processo o artigo “*The 1024 channel digital correlator receiver of the Gauribidanur radioheliograph*” de Ramesh et al. (2006). Com isso, foram realizados testes iniciais de operação e comunicação com a interface gráfica Quartus II, discutido na análise de resultados. A programação do correlacionador é realizada, atualmente, através da porta de Ethernet, pelo uso do dispositivo Ethernet Blaster II, também da Altera.

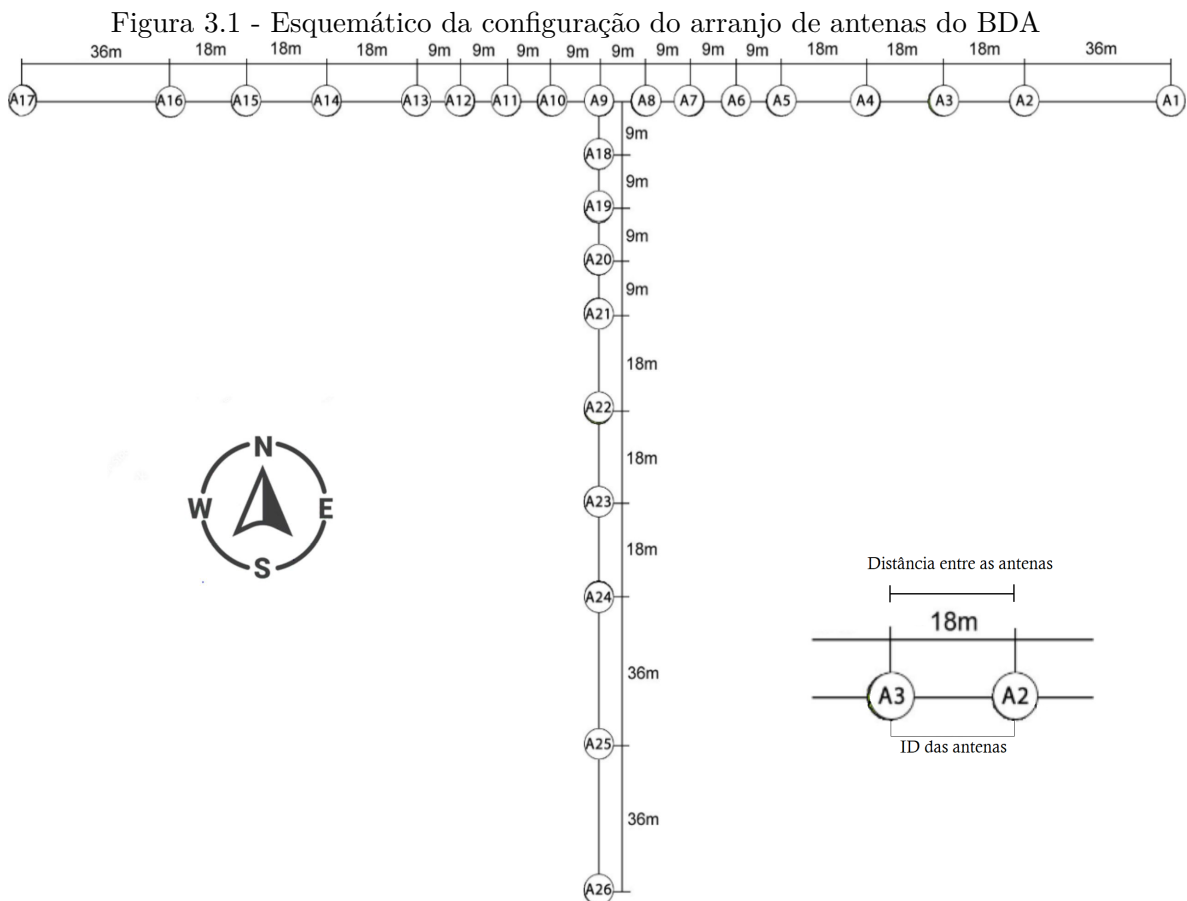
Para a sequência do desenvolvimento do correlacionador, foi necessário também o estudo de linguagens de programação em FPGA, no caso o Verilog, assim como os manuais de operação do Altera Stratix III, (ALTERA, 2020), a fim de utilizar tutoriais de programação e a pinagem correta para comunicação.

Os dois marcos mais significativos no desenvolvimento do trabalho foram as programações da comunicação serial realizada entre o computador e o correlacionador, através do adaptador serial FT232RL, e o desenvolvimento em Verilog da célula correlacionadora de um par de antenas, que será o mesmo modelo para os demais pares.

Além do estudo das referências, o restante do processo se deu a partir dos trabalhos em laboratório na Divisão de Astrofísica do INPE, sendo necessárias viagens, inicialmente semanais e posteriormente quinzenais ao longo do ano de 2022, da cidade de Belo Horizonte a São José dos Campos e também a Cachoeira Paulista para as atividades de atualização e desenvolvimento *in situ* do BDA .

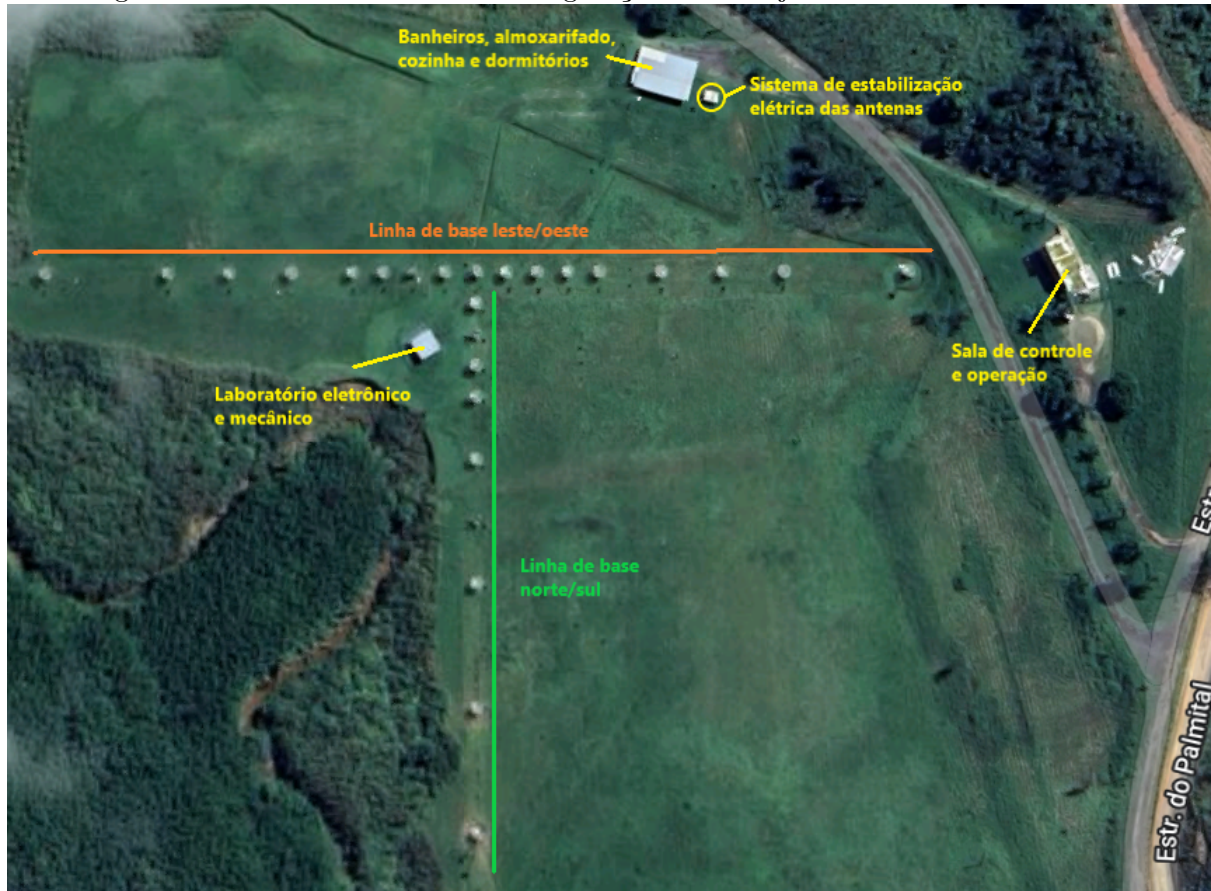
### 3.2 BRAZILIAN DECIMETRIC ARRAY

O rádio interferômetro estudado neste trabalho é denominado *Brazilian Decimetric Array* (BDA), está localizado na cidade de Cachoeira Paulista, no estado de São Paulo, e é composto por um conjunto de 26 antenas parabólicas de 4 metros de diâmetro, em malha, com uma área efetiva de 7,5 metros quadrados. O arranjo de antenas tem uma configuração em forma de “T”, como pode ser visto no esquemático da Figura 3.1 e na vista aérea da Figura 3.2, com linhas de base de 252 metros na direção Leste-Oeste e 162 metros na direção Sul. O BDA é capaz de realizar observações em frequências entre 1200 MHz e 1700 MHz (SAWANT et al., 2000), com intenção de se adicionar futuramente também as frequências de 2,7 GHz e 5,5 GHz.



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2022)

Figura 3.2 - Vista de satélite da configuração do arranjo de antenas do BDA



Fonte: Adaptado de Google (2022)

Na Figura 3.3 é possível visualizar, do nível do solo *in situ*, as linhas de base norte/sul e leste/oeste apresentada nas vistas aéreas. Na imagem também pode-se observar que não existem barreiras físicas grandes, como montanhas ou construções altas, além de árvores em volta do equipamento, o que o torna mais suscetível a interferências de rádio advindas de diversas fontes aéreas, como transmissão de dados de satélites e aeronaves, e terrestres nos arredores, como torres de comunicação, televisão, microondas, redes de alta tensão e outros dispositivos geradores de frequência no espectro de rádio. Por isso, são importantes respaldos jurídicos que garantam faixas de frequências reservadas à radioastronomia, como prevê o "Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil" referenciado em [Anatel \(2020\)](#).

Além disso, são necessários diálogos com os órgãos locais, como a prefeitura de Cachoeira Paulista, para negociar acordos que limitem a expansão sem controle da



cidade na direção da área reservada ao INPE, que prevê o controle de frequências utilizadas em telecomunicações para evitar, ou reduzir, possíveis interferências nas observações.

Figura 3.3 - Vista a nível do solo *in situ* das linhas de base do BDA



Fonte: Autor

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DO CORRELACIONADOR DE SINAIS

No caso do BDA, o correlacionador utilizado no projeto tem como constituinte uma placa do tipo FPGA, do modelo Altera Stratix III (EP3SL150F1152C3), como é vista na Figura 3.4, e está sendo programada em linguagem Verilog. Em 2015, a empresa Altera foi adquirida pela Intel e, desde então, os *softwares* programadores das FPGAs desta família são desenvolvidos e atualizados por esta companhia. Durante a escrita deste trabalho, o BDA ainda se encontra em fase de desenvolvimento e é possível ver uma imagem do correlacionador em teste de bancada na Figura 3.5, na qual estão representados: (1) placa de FPGA; (2) Programador FPGA (Ethernet Blaster II);



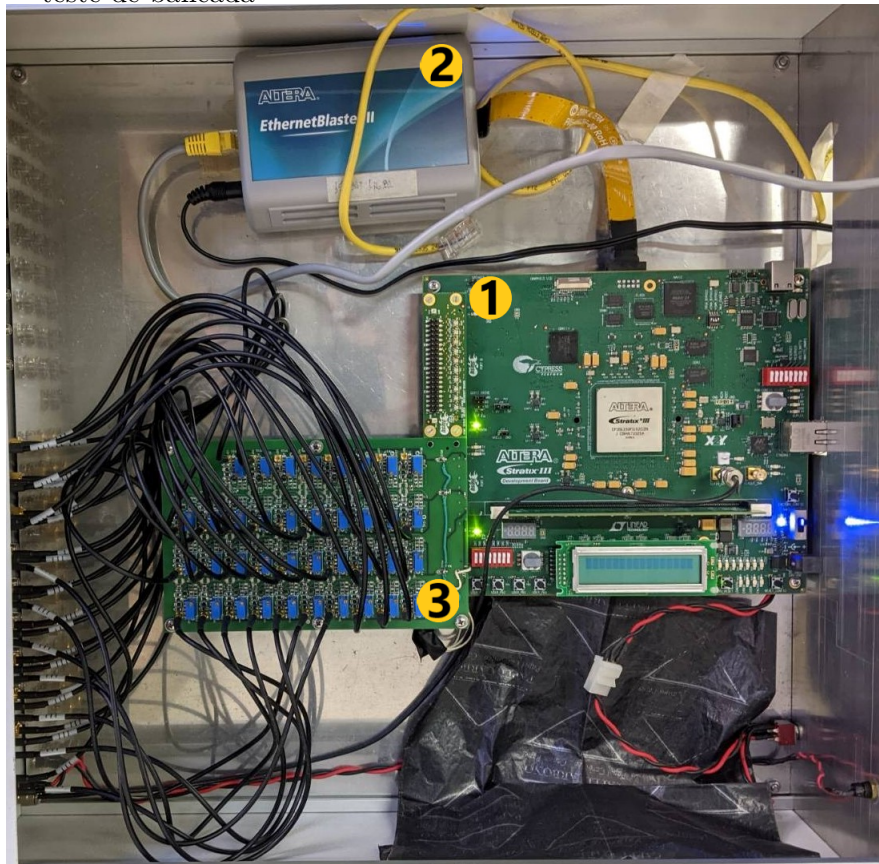
(3) Digitalizador.

Figura 3.4 - Imagem do FPGA utilizado no correlacionador do BDA



Fonte: Autor

Figura 3.5 - Imagem do *hardware* do correlacionador do BDA, com a caixa aberta, em teste de bancada



Fonte: Autor

Alguns dados relevantes da placa FPGA podem ser vistos na Tabela 3.1.

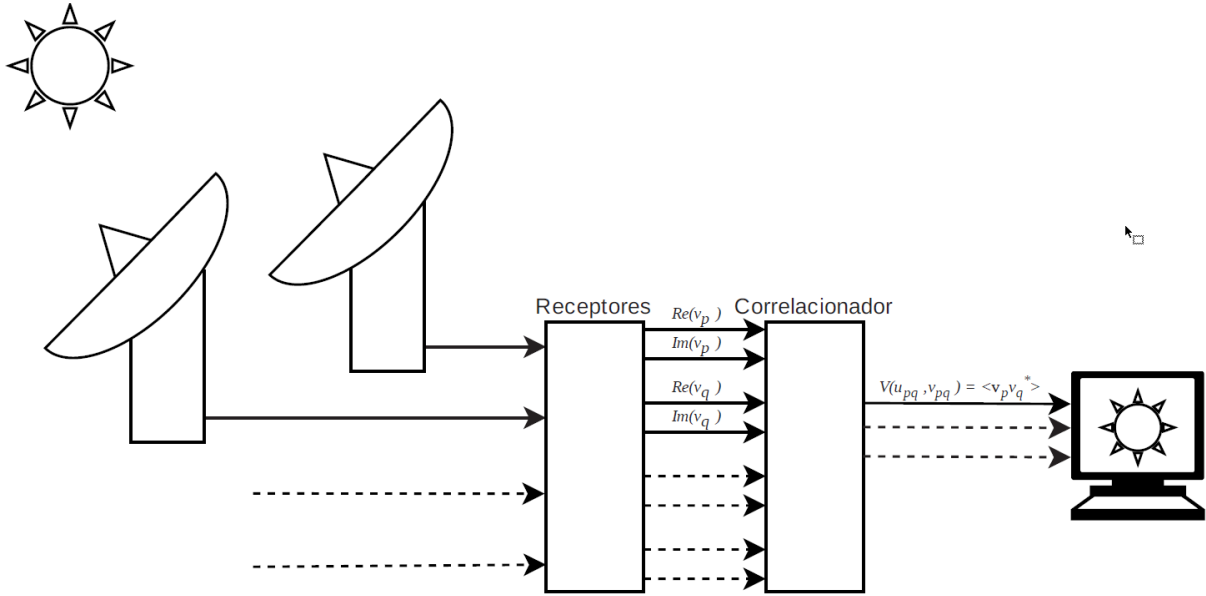
Tabela 3.1 - Características relevantes da placa FPGA Altera Stratix III

Linguagem FPGA	Verilog
Níveis de digitalização	2
Taxa de amostragem	10 MHz
Frequência de <i>Clock</i>	50 MHz
Tempo de integração	100 ms
Antenas (máximo estimado)	50

Fonte: Adaptado de [Strauss et al. \(2022\)](#)

O sistema de funcionamento do correlacionador, associado ao restante do equipamento, pode ser exemplificado no esquemático da Figura 3.6.

Figura 3.6 - Esquemático simplificado do sistema do BDA



Fonte: Strauss et al. (2022)

Sejam duas antenas,  $P$  e  $Q$ , formando uma linha de base no sistema. O sinal da fonte observada recebido pelas antenas é amplificado pelos receptores e o sinal com parte real das antenas  $P$  e  $Q$  são representados por  $Re(v_p)$  e  $Re(v_q)$ , respectivamente. Com defasagem de  $90^\circ$ , obtém-se os sinais complexos representados por  $Im(v_p)$  e  $Im(v_q)$ . O correlacionador então calcula a visibilidade da linha de base, que representa a média da multiplicação da voltagem da antena  $P$ ,  $v_p$ , com o conjugado voltagem da antena  $Q$ ,  $v_q^*$ , de acordo com a Equação 3.1. O computador, então tendo recebido essas visibilidades, utiliza de análise de Fourier e obtém a distribuição de brilho da fonte astronômica (STRAUSS et al., 2022).

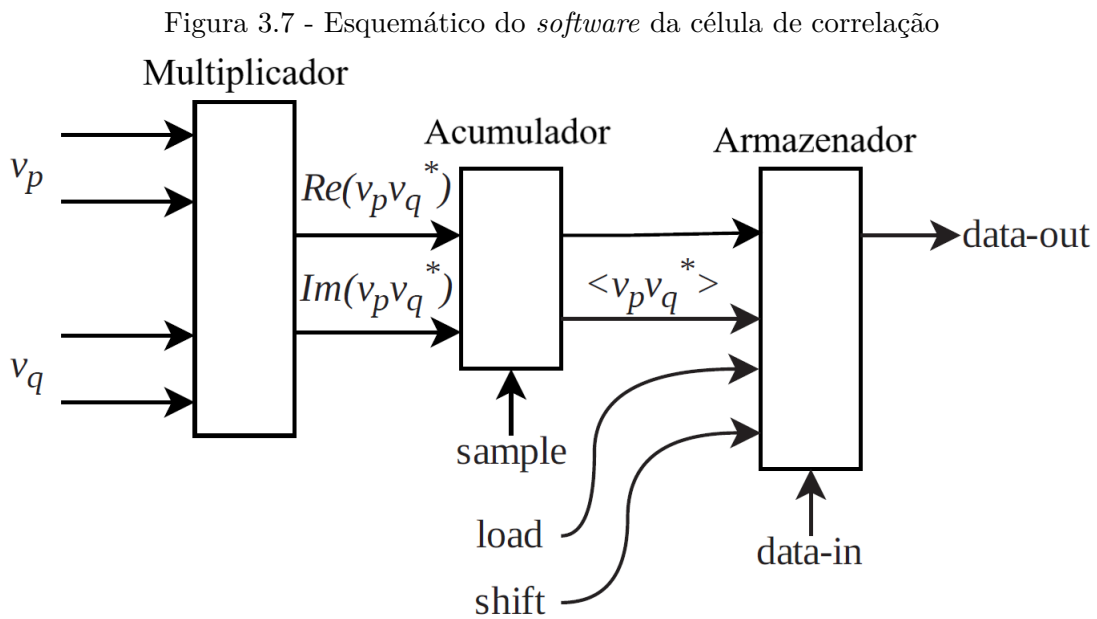
$$V(pq) = \langle v_p \cdot v_q^* \rangle \quad (3.1)$$

Para entender melhor o funcionamento do correlacionador apresentado na Figura 3.5, tem-se que os sinais recebidos das antenas, já em componentes real e complexa, entram na placa digitalizadora, representada em (3), que tem a função de transformar o sinal analógico para digital de dois níveis. O FPGA, representado em (1), realiza todos os cálculos em paralelo e o programador, Ethernet Blaster II representado em (2), permite atualizar o *software* do FPGA.

A célula de correlação, desenvolvida em Verilog e programada no FPGA, consiste na

multiplicação dos sinais. O acumulador calcula a média das voltagens e são armazenadas no bloco chamado de armazenador, para posteriormente serem descarregadas. O sinal de *sample* tem o objetivo de produzir a cadência de amostragem, no caso de 10 MHz, e os sinais de *load* e *shift* servem para realizar o descarregamento dos dados armazenados no acumulador, sendo o *load* enviado ao final do período de integração, e o *shift* para deslocar os dados para saída (STRAUSS et al., 2022).

O esquemático do *software* de funcionamento da célula correlacionadora pode ser visto na Figura 3.7.



Fonte: Adaptado de Strauss et al. (2022)

A multiplicação complexa, que é realizada no *software* da célula de correlação, é baseado nas equações 3.2, 3.3 e 3.4.

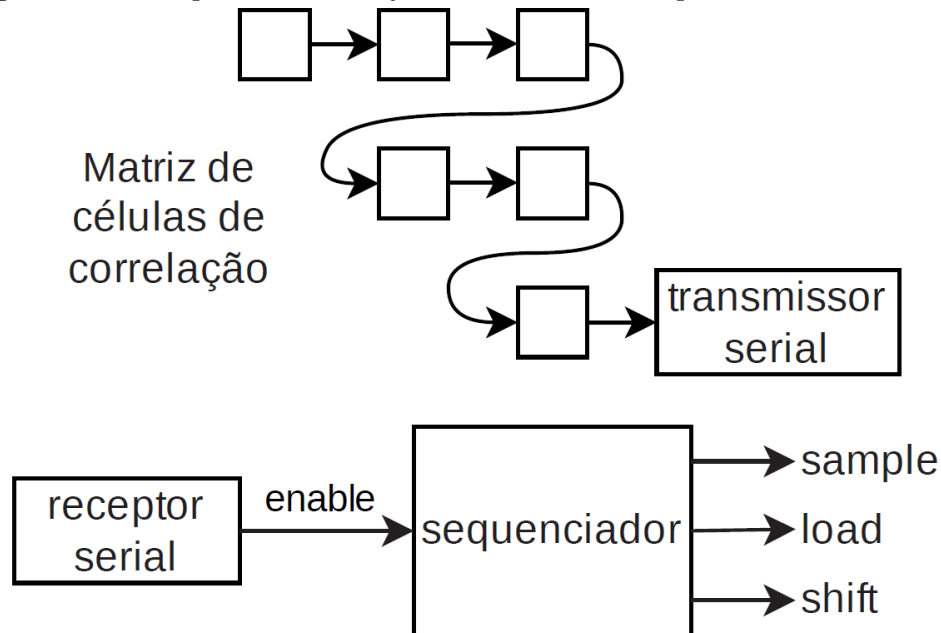
$$v_p v_q^* = [Re(v_p) + i.Im(v_p)].[Re(v_q) - i.Im(v_q)] \quad (3.2)$$

$$Re(v_p v_q^*) = Re(v_p)Re(v_q) + Im(v_p)Im(v_q) \quad (3.3)$$

$$Im(v_p v_q^*) = Im(v_p)Re(v_q) - Re(v_p)Im(v_q) \quad (3.4)$$

As células de correlação são então organizadas em cadeia dentro de uma matriz, com todas as combinações  $P$  e  $Q$  de linhas de base, com um transmissor serial ao final para transmitir os dados para o computador. Então, o sinal é recebido pelo receptor serial e o sequenciador então envia os sinais de *sample*, *load* e *shift* para serem recebidos em etapas mostradas anteriormente (STRAUSS et al., 2022). O esquemático do *software* do circuito completo do correlacionador pode ser visto na Figura 3.8.

Figura 3.8 - O esquemático do *software* do circuito completo do correlacionador



Fonte: Strauss et al. (2022)

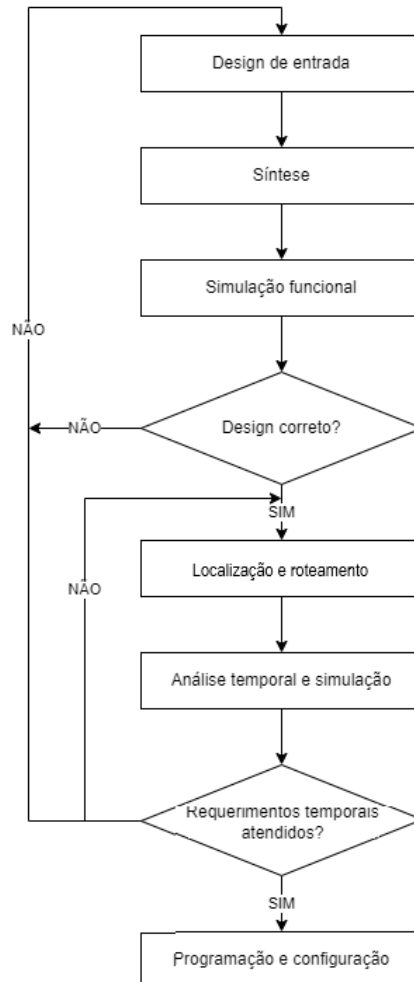
### 3.4 PROGRAMAÇÃO DO CORRELACIONADOR E TESTES DE BANCADA

Para a programação inicial que foi realizada no correlacionador, seguiu-se o manual "My First FPGA Design Tutorial" da Altera (2008), utilizando o *software* Quartus II da Altera. Como não se tinha acesso ao código programado na memória de trabalhos passados, as programações foram realizadas na memória volátil do correlacionador e não na não-volátil, para evitar que o binário do programa de correlação fosse

sobrescrito.

A primeira programação utilizando Verilog foi também um teste inicial de comunicação entre o computador e o FPGA, um contador de 4 e 8 bits nos LEDs do correlacionador, ainda não utilizando o linguagem de Verilog e sim a lógica por diagramas de blocos disponível no próprio Quartus II. Alterando-se parâmetros específicos para estudo da resposta do correlacionador e comportamento dos LEDs, foram realizados diversos testes de programação, aumentando gradativamente a complexidade dos códigos com intuito de alcançar o primeiro módulo de correlação de fato. O diagrama representativo do processo de programação do FPGA é demonstrado na figura 3.9.

Figura 3.9 - Fluxo típico de programação em uma FPGA



Fonte: Adaptado de Altera (2009).



- No diagrama de fluxo pode ser visto que primeiro é feito um *design de entrada*, seja por um diagrama de blocos elaborado através do próprio Quartus II, ou por um código escrito em Verilog, que será a lógica implementada no dispositivo.
- Na *síntese*, o design criado anteriormente é sintetizado em um circuito que consiste de elementos lógicos, que é a designação dos pinos que serão utilizados na placa, se referindo aos LEDs, *clock*, eventuais botões que existam na placa etc.
- A *simulação funcional* consiste na verificação funcional e teste do circuito sintetizado para verificar eventuais erros de direcionamento ou seleção de portas. Ainda não são levadas em conta as variáveis temporais.
- A etapa de *localização e roteamento* faz a conexão de caminhos entre as portas e elementos lógicos selecionados com os componentes de fato do FPGA.
- Então é feita uma *análise temporal*, na qual se verifica alguma inconsistência de valores de atraso, por exemplo, com o tempo de simulação. Na mesma etapa é feita uma *simulação temporal* para testar o funcionamento correto e *timing*.
- Por fim, caso esteja tudo correto e funcionando nos passos anteriores, é possível realizar a *programação e configuração* na memória da FPGA.

Todo este processo é descrito no manual "*Quartus II Introduction Using VHDL Design*" da Altera (2009).

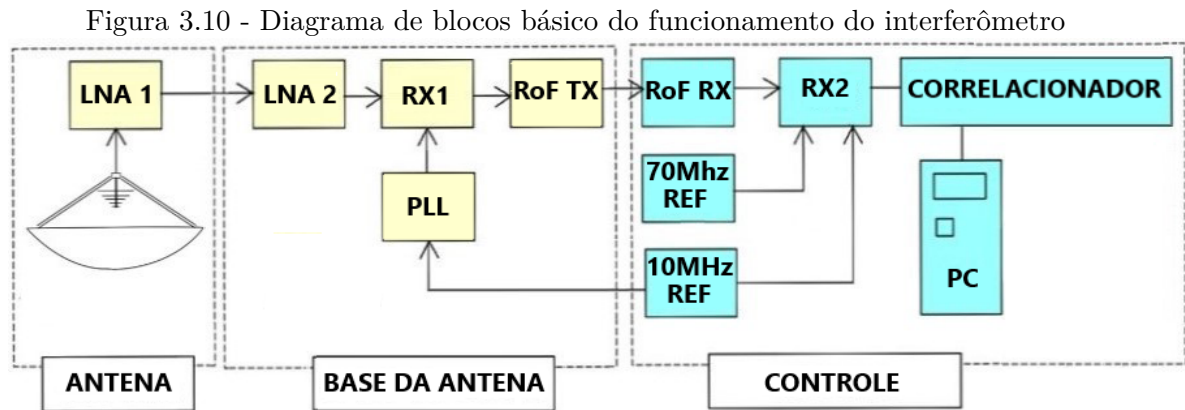
### 3.5 ATUALIZAÇÃO DA SÍNTESE DE FREQUÊNCIA

Durante a realização das atividades, devido a necessidade de redução de custos e atualização de componentes antigos, foi desenvolvido um equipamento controlador utilizando Arduino para as sínteses de frequência nas antenas.

No documento "Projeto do Receptor 1-6 GHz do 'Brazilian Decimetric Array'" de Silva et al. (2009), é possível ver um diagrama de blocos do sistema elétrico da torre base de uma das antenas. A atualização descrita nessa etapa consiste em substituir os blocos "*Tower Base Computer*" e "*Tower Base Monitoring and Control Unit*" por um único Arduino. A imagem do diagrama não foi adicionada no trabalho pois não

foi possível obter uma boa resolução da imagem redimensionando-a para respeitar o tamanho das margens do texto.

Na Figura 3.10 é possível ver um esquemático simplificado desde a recepção do sinal na antena, até a chegada do sinal correlacionado no computador. A etapa de atualização da síntese de frequência se refere ao bloco da "PLL" no diagrama.



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2022)

Para programar uma determinada frequência de observação, o manual de especificação técnica da PLL (*Phase-Locked Loop*) (PSEMI, 2005) mostra que é necessário calcular três parâmetros principais  $A$ ,  $M$  e  $R$  e enviá-los em forma de bits para esse equipamento, como pode ser visto na Figura 3.11. Nessa imagem, os termos MSB e LSB significam, respectivamente, *Most Significant Bit* (bit mais significativo) e *Less Significant Bit* (bit menos significativo).

Figura 3.11 - Programação do registrador primário

Interface Mode	Enh	Bmode	Smode	R <sub>5</sub>	R <sub>4</sub>	M <sub>8</sub>	M <sub>7</sub>	Pre_en	M <sub>6</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>0</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>
Parallel	1	0	0	M2_WR rising edge load				M1_WR rising edge load								A_WR rising edge load							
				D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>	D <sub>7</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>0</sub>
Serial*	1	0	1	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	B <sub>6</sub>	B <sub>7</sub>	B <sub>8</sub>	B <sub>9</sub>	B <sub>10</sub>	B <sub>11</sub>	B <sub>12</sub>	B <sub>13</sub>	B <sub>14</sub>	B <sub>15</sub>	B <sub>16</sub>	B <sub>17</sub>	B <sub>18</sub>	B <sub>19</sub>
Direct	1	1	X	0	0	0	0	Pre_en	M <sub>6</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>0</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>

↑ MSB (first in)
↑ (last in) LSB

Fonte: Machado et al. (2022)



Outro detalhe importante é a quantidade de bits necessária para cada parâmetro, o que limita os valores disponíveis para atribuição, sendo que o índice de  $A$  varia de 0 a 3 (4 bits),  $M$  entre 0 e 8 (9 bits) e  $R$  entre 0 e 5 (6 bits). Dessa forma, os valores inteiros possíveis para os parâmetro são:  $0 < A < 15$ ;  $0 < M < 511$ ;  $0 < R < 63$ .

As frequências da PLL devem ser programadas de acordo com a Equação 3.5.

$$F_{obs} = F_{in} - 905 + 70 \quad (3.5)$$

Na qual  $F_{obs}$  representa a frequência na qual será feita a observação,  $F_{in}$  e 905 MHz são as frequências que devem ser programadas na PLL e 70 MHz é a frequência intermediária. A obtenção do parâmetros deve respeitar a relação apresentada na Equação 3.6.

$$F_{in} = [10.(M + 1) + A].[f_r/(R + 1)] \quad (3.6)$$

Tal que  $f_r$  é a frequência de referência de 10 MHz. É importante ressaltar que existe mais de um conjunto solução de valores  $A$ ,  $M$  e  $R$  para a Equação 3.6, que se obtém uma determinada frequência  $F_{in}$ .

Então, para se realizar observações na frequência de 1405 MHz, por exemplo, com uma frequência intermediária de 70 MHz, a frequência de programação, substituindo os valores na Equação 3.5, deve ser de 2240 MHz. Com isso, um dos conjuntos de valores dos parâmetros  $A$ ,  $M$  e  $R$  que atendem esse resultado é 4, 21, 0, respectivamente.

Tanto a frequência  $F_{in}$  quanto a de 905 MHz têm seus valores de  $A$ ,  $M$  e  $R$  estipulados baseados na Equação 3.5.

### 3.6 ATUALIZAÇÃO DOS COMPONENTES DAS ANTENAS

Como o BDA é um projeto que foi implantado relativamente há um tempo considerável, muitos dos seus componentes necessitam de atualizações e melhorias, decorrentes da obsolescência e avanços tecnológicos dos dispositivos constituintes, mas também das intempéries consequentes de se localizar em campo aberto e, portanto, exposto às condições ambientais adversas.

Para isso, é necessário o estudo de equivalências dos dispositivos atuais com os novos

existentes no mercado, e restauração dos que estiverem em condições para que esse procedimento seja o suficiente. A atualização da síntese de frequência é um exemplo dessa necessidade.

Os servomotores utilizados no sistema de rastreamento, dois por antena, devem ser testados *in situ* para controle por programação e verificação de níveis de corrente e voltagem, e também da sala de controle, para averiguar se está sendo possível enviar comandos de rastreamento.

Também deve ser testada a continuidade e perdas de potência dos cabos, assim como possíveis infiltrações ou danos por umidade, já que há presença esporádica de água corrente na área, seguindo a planta do projeto, vista na Figura 3.12.



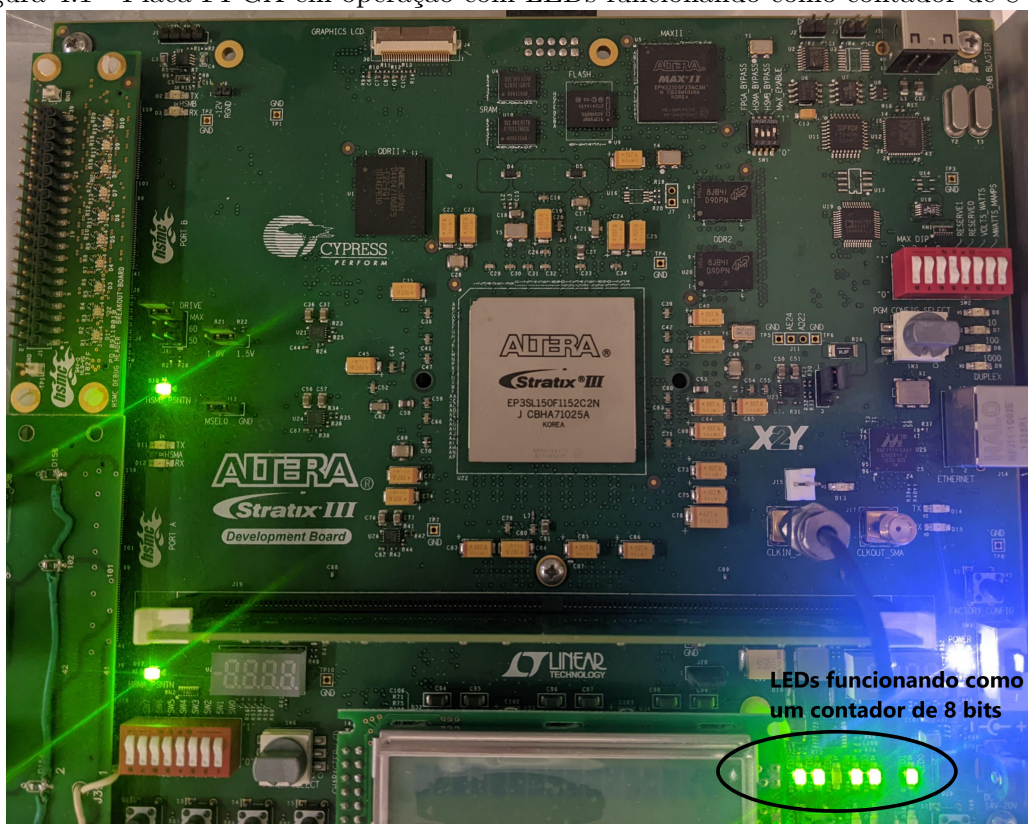


## 4 ANÁLISE E RESULTADOS

### 4.1 RESPOSTA DO CORRELACIONADOR

A primeira programação, seguindo o manual "*My First FPGA Design Tutorial*" da Altera (2008), consistiu na comunicação e acionamento dos LEDs da placa FPGA funcionando como um contador de 8 bits, como pode ser visto parcialmente na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Placa FPGA em operação com LEDs funcionando como contador de 8 bits

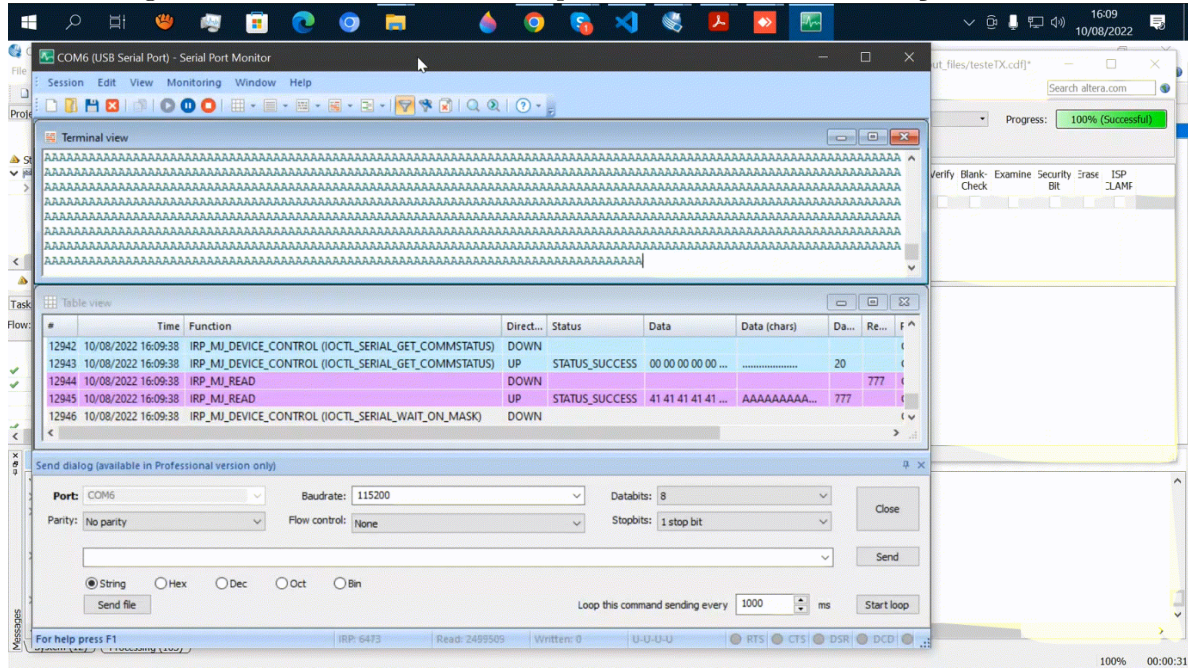


Fonte: Autor.

A comunicação serial entre o computador e o correlacionador foi realizada com o envio, inicialmente, de somente um byte, que representa um caractere ou dígito no monitor serial. Posteriormente, foi incrementado para o envio de seis bytes agora contendo uma palavra ou frase de até seis letras ou numerais, e a comunicação pode ser controlada por comandos enviados do *software* controlador para o correlacionador.

A Figura 4.2 mostra o envio de um byte e a análise pelo monitor serial.

Figura 4.2 - Monitor serial do computador durante a comunicação serial

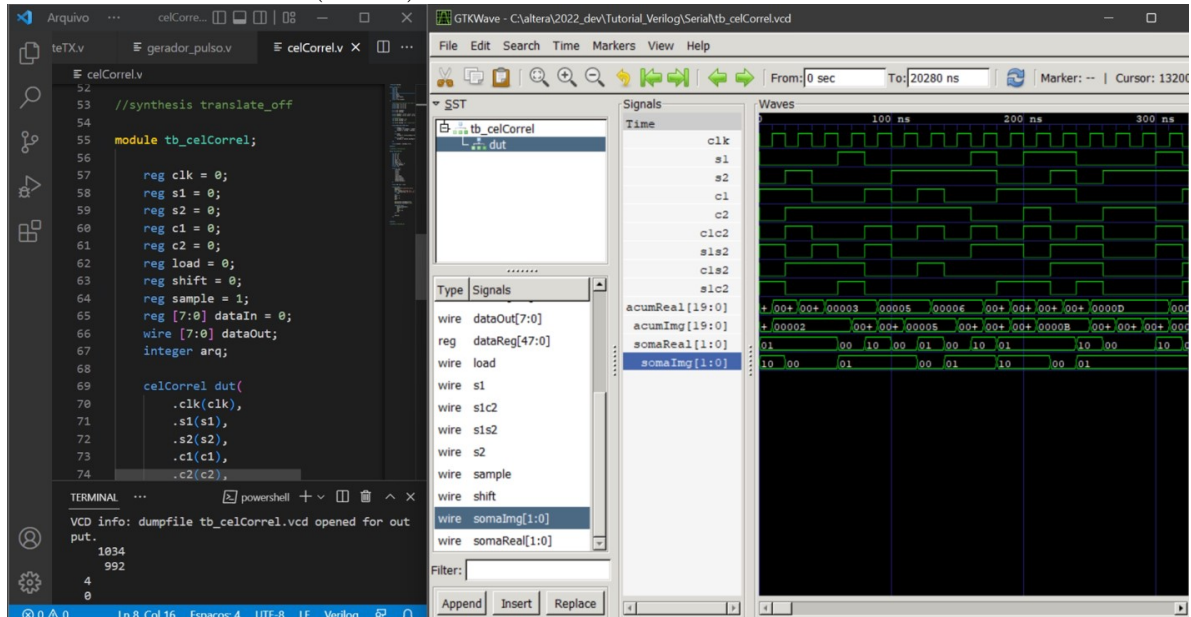


Fonte: Autor.

Foi possível realizar todas as programações com sucesso gradativamente, até chegar ao *software* da célula de correlação, com o qual foi realizada a correlação de dois sinais digitais simulados em linguagem Python e analisados com o *software* GTKWave para visualização dos sinais gerados e correlacionados, como pode ser visto na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Parte do código em Verilog da célula de correlação (esquerda) e tela do GTKWave (direita) com os sinais simulados e correlacionados



Fonte: Autor.

Na Figura 4.3 é possível visualizar o procedimento de correlação discutido na revisão bibliográfica, onde é realizada a multiplicação complexa das componentes seno e cosseno, que é representada pelas variáveis "`c1c2`", "`s1s2`", "`c1s2`" e "`s1c2`", e as saídas correlacionadas como "`somaReal`" e "`somaImg`", na janela do GTKwave.

## 4.2 SÍNTESE DE FREQUÊNCIAS

Como citado na metodologia, é possível encontrar mais de um conjunto solução de valores para os parâmetros  $A$ ,  $M$  e  $R$ . Desta forma, foi elaborada um simples código em MATLAB que consiste basicamente de quatro *loops* em cascata que, variando a frequência entre 1205 MHz e 1705 MHz, com passo de 5 MHz, calcula todos os conjuntos soluções possíveis por tentativa e erro, dentro dos limites dos parâmetros, e gera uma matriz com esses resultados.

O objetivo era gerar uma tabela de valores  $A$ ,  $M$  e  $R$  com intuito de ser encontrada uma relação que fosse implementada em forma de código no Arduino, e este fosse capaz de enviar os dados em bits para a PLL. Tendo isso em mente, o processo foi simplificado fixando o valor de  $R$  igual a 1 e calculando os demais valores. O resultado é apresentado na Tabela 4.1, na qual  $F_{in}$  representa a frequência a ser programada na PLL,  $F_{obs}$  a frequência na qual será feita a observação e é representada uma

coluna adicional com o dobro do valor de  $F_{in}$ . Por problemas de formatação, na tabela só serão apresentados os valores para frequências de observação entre 1205 MHz e 1610 MHz.

A partir da Tabela 4.1, foi possível identificar uma maneira de simplificar a cálculo que deve ser programado no Arduino, observando o dobro dos valores das frequências programadas. O procedimento que foi realizado é descrito a seguir.

Primeiramente se multiplica o valor de  $F_{in}$  por dois, que já está representado na tabela, e em seguida divide-se esse valor por 10, que será um número inteiro ( $F_{in}/10$ ). Dividindo por 10 novamente, é possível encontrar o valor do parâmetro  $A$  como o resto dessa última divisão. Para encontrar o parâmetro  $M$ , deve-se utilizar o quociente do passo anterior e subtrair 1.

Exemplificando para maior clareza: toma-se uma frequência de observação igual a 1405 MHz. O valor correspondente que deve ser programado na PLL,  $F_{in}$ , pode ser obtido na Tabela 4.1 e corresponde a 2240 MHz e, portanto, o dobro corresponde a 4480 MHz. Dividindo-se 4480 por 10 obtém-se o valor de 448 e, fazendo o resto da divisão por 10, encontra-se o valor do parâmetro  $A$ , que é 8 como pode ser verificado na tabela. O quociente é igual a 44 e, subtraindo-se 1, é encontrado o valor do parâmetro  $M$ , que é 43 como pode ser verificado na tabela.

A análise dos sinais gerados pela programação foge do escopo desse trabalho e, portanto, é apresentada somente na referência (MACHADO et al., 2022).



Tabela 4.1 - Tabela de parâmetros A e M para R = 1

<b>Fin</b> <b>(MHz)</b>	<b>Fobs</b> <b>(MHz)</b>	<b>2xFin</b> <b>(MHz)</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>Fin</b> <b>(MHz)</b>	<b>Fobs</b> <b>(MHz)</b>	<b>2xFin</b> <b>(MHz)</b>	<b>A</b>	<b>M</b>
2040	1205	4080	8	39	2255	1420	4510	1	44
2045	1210	4090	9	39	2260	1425	4520	2	44
2050	1215	4100	0	40	2265	1430	4530	3	44
2055	1220	4110	1	40	2270	1435	4540	4	44
2060	1225	4120	2	40	2275	1440	4550	5	44
2065	1230	4130	3	40	2280	1445	4560	6	44
2070	1235	4140	4	40	2285	1450	4570	7	44
2075	1240	4150	5	40	2290	1455	4580	8	44
2080	1245	4160	6	40	2295	1460	4590	9	44
2085	1250	4170	7	40	2300	1465	4600	0	45
2090	1255	4180	8	40	2305	1470	4610	1	45
2095	1260	4190	9	40	2310	1475	4620	2	45
2100	1265	4200	0	41	2315	1480	4630	3	45
2105	1270	4210	1	41	2320	1485	4640	4	45
2110	1275	4220	2	41	2325	1490	4650	5	45
2115	1280	4230	3	41	2330	1495	4660	6	45
2120	1285	4240	4	41	2335	1500	4670	7	45
2125	1290	4250	5	41	2340	1505	4680	8	45
2130	1295	4260	6	41	2345	1510	4690	9	45
2135	1300	4270	7	41	2350	1515	4700	0	46
2140	1305	4280	8	41	2355	1520	4710	1	46
2145	1310	4290	9	41	2360	1525	4720	2	46
2150	1315	4300	0	42	2365	1530	4730	3	46
2155	1320	4310	1	42	2370	1535	4740	4	46
2180	1345	4360	6	42	2375	1540	4750	5	46
2185	1350	4370	7	42	2380	1545	4760	6	46
2190	1355	4380	8	42	2385	1550	4770	7	46
2195	1360	4390	9	42	2390	1555	4780	8	46
2200	1365	4400	0	43	2395	1560	4790	9	46
2205	1370	4410	1	43	2400	1565	4800	0	47
2210	1375	4420	2	43	2405	1570	4810	1	47
2215	1380	4430	3	43	2410	1575	4820	2	47
2220	1385	4440	4	43	2415	1580	4830	3	47
2225	1390	4450	5	43	2420	1585	4840	4	47
2230	1395	4460	6	43	2425	1590	4850	5	47
2235	1400	4470	7	43	2430	1595	4860	6	47
2240	1405	4480	8	43	2435	1600	4870	7	47
2245	1410	4490	9	43	2440	1605	4880	8	47
2250	1415	4500	0	44	2445	1610	4890	9	47

Fonte: Autor

### 4.3 ATUALIZAÇÕES DE EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS

Além da atualização da síntese de frequências, também foi necessária, e realizada, a manutenção do sistema de rastreamento de pelo menos duas antenas, sendo apresentado um curto vídeo do seu funcionamento no Seminário de Iniciação Científica e Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (SICINPE) na edição de 2022. A Figura 4.4 mostra a parte interna da base de uma das antenas, durante o processo da análise de funcionamento dos componentes.

Figura 4.4 - Vista interna do painel de uma das antenas



Fonte: Autor.

Também foram realizados testes de perda de potência de sinal nos cabos, entre a

base da antena e a sala de controle, ou seja, entre "RoF TX" e "RoF RX" referenciados na Figura 3.10, encontrando-se valores de perda aceitáveis e dentro do previsto.

Os testes e verificações de correntes e tensões foram feitos em pelo menos duas antenas, garantindo o funcionamento e operação dentro do previsto.

#### 4.4 APRESENTAÇÃO NA REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ASTRONOMIA

A Tabela 4.2 traz uma relação de trabalhos que apresentaram alguns dos resultados do projeto, ou de produtos que adviriam no projeto, referentes ao ano de 2022, e que foram apresentados na XLV SAB (45<sup>a</sup> Reunião da Sociedade Astronômica Brasileira), no final do mês de setembro de 2022.

Tabela 4.2 - Lista de trabalhos relacionados ao projeto aprovados para apresentação na quadragésima quinta Reunião Anual da SAB (Fonte: Autor)

“Projeto de Correlacionador para o Interferômetro BDA”	Aprovado
“Desenvolvimento de automatização da síntese de frequência do <i>Brazilian Decimetric Array</i> (BDA)”	Aprovado
“Análise de configurações do arranjo do interferômetro <i>Brazilian Decimetric Array</i> (BDA)”	Aprovado



## 5 CONCLUSÃO

O trabalho inicialmente tinha como intuito alcançar no desenvolvimento do projeto a geração do arquivo para imageamento no formato interferométrico padrão, porém, devido a contratempos e atrasos, que são esperados e comuns em qualquer projeto, somente foi possível atingir o desenvolvimento e teste da célula de correlação com os sinais digitais. Para o objetivo geral de caracterizar o interferômetro rádio *Brazilian Decimetric Array* e seu correlacionador, no período de um ano levando-se em conta as adversidades e contratempos, pode-se dizer que o resultado foi satisfatório.

Para trabalhos futuros, tem-se a oportunidade de dar sequência a este desenvolvimento, testando as células de correlação com sinais analógicos e posteriormente com fontes RF, como o Sol, por exemplo. Além disso, continuar com a manutenção e atualização das demais antenas, até que todas as 26 estejam operacionais. Outro aspecto interessante seria começar a envolver o BDA em diálogos e parcerias com instituições internacionais, como o *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO), para que se crie a possibilidade do BDA futuramente integrar a rede de radiotelescópios e interferômetros que utilizam da interferometria de base longa (VLBI) para obtenção de imagens interferométricas.

Ressalta-se a relevância do projeto, para a autonomia científica e tecnológica do INPE e do Brasil, e ainda, é importante lembrar que o esforço empregado para o aprendizado dos materiais e métodos definitivos para as técnicas necessárias para o projeto, fizeram valer o fruto do aprendizado, que é o princípio fundamental de um trabalho de conclusão de curso. Assim, reitera-se o desejo de que o projeto continue a ser valorizado pelo INPE, no sentido de poder dar suportes, técnico, científico e de divulgação científica, não só ao produto final, que é o BDA operante, mas do esforço e trabalho de todos que se envolveram com as diferentes fases do projeto.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTERA. **My First FPGA Design Tutorial**. [S.l.], 2008. 23, 31
- \_\_\_\_\_. **Quartus II Introduction Using VHDL Design**. [S.l.: s.n.], 2009.  
<[https://www.ic.unicamp.br/~cortes/mc602/tutoriais/tut\\_quartus\\_intro\\_vhdl.pdf](https://www.ic.unicamp.br/~cortes/mc602/tutoriais/tut_quartus_intro_vhdl.pdf)>. 24, 25
- \_\_\_\_\_. **Stratix III Device Family Overview**. [S.l.], 2020. v. 1. 15
- ANATEL. **Plano de atribuição, destinação e distribuição de frequências no Brasil**. [S.l.], 2020. 17
- ASIF, M.; GUO, X.; ZHANG, J.; MIAO, J. An fpga based 1.6 ghz cross-correlator for synthetic aperture interferometric radiometer. In: IEEE. **2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL)**. [S.l.], 2017. p. 1078–1085. 11
- CONDON, J. J.; RANSOM, S. M. **Essential Radio Astronomy**. [S.l.]: Princeton University Press, 2016. 6, 8, 9, 10
- KRAUS, J. D.; TIURI, M.; RÄISÄNEN, A. V.; CARR, T. D. **Radio astronomy**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1966. 5, 7, 15
- MACHADO, T. C.; SOUZA, K. L.; STRAUSS, C.; ABELHA, M. C.; CECATTO, J. Upgrade of frequency synthesis circuit of BDA. **Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira**, v. 34, 2022. 16, 26, 34
- MILLER, D. F. Basics of radio astronomy for the goldstone-apple valley radio telescope. Jet Propulsion Laboratory, 1998. 15
- OLIVEIRA, D. M.; ZESTA, E. Satellite orbital drag during magnetic storms. **Space Weather**, Wiley Online Library, v. 17, n. 11, p. 1510–1533, 2019. 1
- PERLEY, R. A.; SCHWAB, F. R.; BRIDLE, A. H. **Synthesis imaging in radio astronomy: a collection of lectures from the third NRAO synthesis imaging summer school**. [S.l.: s.n.], 1989. 10, 11
- PSEMI. **Product Specification PE3336**. [S.l.], 2005. 26
- RAMESH, R.; RAJAN, M.; SASTRY, C. V. The 1024 channel digital correlator receiver of the gauribidanur radioheliograph. **Experimental Astronomy**, Springer, v. 21, n. 1, p. 31–40, 2006. 12, 15
- SAWANT, H.; SUBRAMANIAN, K.; LÜDKE, E.; SOBRAL, J.; SWARUP, G.; FERNANDES, F.; ROSA, R.; GONZALEZ, W.; CECATTO, J. Brazilian decimetric array. **Advances in Space Research**, Elsevier, v. 25, n. 9, p. 1809–1812, 2000. 1, 2, 16

- SCHUH, H.; BEHREND, D. VLbi: A fascinating technique for geodesy and astrometry. **Journal of geodynamics**, Elsevier, v. 61, p. 68–80, 2012. 1
- SILVA, A. D.; SILVA, C. M.; MIACCI, M. A.; MACEDO, O. O. **Projeto do Receptor 1-6 GHz do "Brazilian Decimetric Array"**. [S.l.], 2009. 25
- STRAUSS, C.; CECATTO, J.; MACHADO, T. C.; SOUZA, K. L.; ABELHA, M. C. Projeto de correlacionador para o interferômetro BDA. **XLV Reunião Anual da Sociedade Astronômica Brasileira**, 2022. 20, 21, 22, 23
- TAYLOR, G.; CARILLI, C.; PERLEY, R. Synthesis imaging in radio astronomy ii asp conferenc series. **vol**, v. 180, p. 127–149, 1999. 15
- VALLEY, G.-A.; TELESCOPE, R. Basics of radio astronomy. 1998. 5
- VIOLIN, R. d. O.; SAITO, J. H.; SAWANT, H. S. A quantum circuit for the brazilian decimetric array (BDA) signal correlation. In: IEEE. **2010 11th Symposium on Computing Systems**. [S.l.], 2010. p. 136–143. 1



## PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.