



Bruno Suarez Pompeo

PRIORIZAÇÃO DE TAREFAS E OTIMIZAÇÃO DO DIAGRAMA DE
ARRANJO DE ANTENAS EM RADARES COGNITIVOS
MULTIFUNCIONAIS

Campinas
2013



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Bruno Suarez Pompeo

PRIORIZAÇÃO DE TAREFAS E OTIMIZAÇÃO DO DIAGRAMA DE ARRANJO DE ANTENAS EM
RADARES COGNITIVOS MULTIFUNCIONAIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Automação

Orientador: Rafael Santos Mendes
Coorientador: João Bosco Ribeiro do Val

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Bruno Suarez Pompeo, orientada pelo Prof. Dr. Rafael Santos Mendes

Campinas
2013

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

P772p Pompeo, Bruno Suarez, 1985-
Priorização de tarefas e otimização do diagrama de arranjo de antenas em radares cognitivos multifuncionais / Bruno Suarez Pompeo. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Rafael Santos Mendes.

Coorientador: João Bosco Ribeiro do Val.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sistemas de antenas. 2. Otimização. 3. Radar. I. Mendes, Rafael Santos, 1957-. II. Val, João Bosco Ribeiro do, 1955-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Tasks prioritization and pattern optimization of phased arrays antenna in multifunction cognitive radars

Palavras-chave em inglês:

Antenna system

Optimization

Radar

Área de concentração: Automação

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Rafael Santos Mendes [Orientador]

David Fernandes

Hugo Enrique Hernandez Figueroa

Data de defesa: 05-04-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Bruno Suarez Pompeo

Data da Defesa: 5 de abril de 2013

Título da Tese: "Priorização de Tarefas e Otimização do Diagrama de Arranjo de Antenas em Radares Cognitivos Multifuncionais"

Prof. Dr. Rafael Santos Mendes (Presidente): 

Prof. Dr. David Fernandes: 

Prof. Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueroa: 

Agradecimentos

Agradeço,

primeiramente a Deus por me dar sabedoria e disposição para me dedicar com afinco a esse trabalho mesmo com a escassez de tempo.

aos meus pais Sergio e Marisol, meus irmãos Serginho e Guilherme e minha avó Agostinha pelo apoio dado diariamente nesses 27 anos de minha existência.

ao Prof. Rafael Mendes, meu orientador, e ao prof. João Bosco do Val, meu coorientador, pelos dois anos de valorosa orientação e horas de discussões realizadas de forma semanal.

à Marília pela compreensão, incentivo e carinho durante os momentos mais difíceis.

aos colegas do grupo de estudo Unicamp-Orbisat: Victor Frencl, Jardhel Martins e Jonas Kienitz pelas reuniões descontraídas e produtivas.

aos amigos de trabalho e estudo Dr. Yusef Cáceres e Leandro Pralon pelo apoio técnico e psicológico.

ao Exército Brasileiro, em especial ao Centro Tecnológico do Exército, do qual faço parte, pela confiança em mim depositada e a chance de cursar o mestrado.

ao Dr. João Moreira por ter me aceitado em sua empresa em Campinas e por ter me ensinado valiosos conceitos acerca da tecnologia de radar.

aos membros da banca examinadora os comentários, sugestões e contribuições, que ajudaram a melhorar a qualidade e a redação final do manuscrito.

à FEEC/UNICAMP por ter me aceitado como aluno de mestrado e por oferecer uma ótima estrutura aos estudantes e pesquisadores brasileiros e de nações amigas.

e por fim, resumindo, a todos os outros que de alguma forma contribuíram com a minha caminhada até aqui.

O Exército pode passar cem anos sem ser usado,
mas não pode passar um minuto sem estar prepa-
rado.

Rui Barbosa

Resumo

Radars cognitivos multifuncionais são considerados a próxima geração de sistemas de radar. Atualmente, ao redor do mundo, muitas pesquisas estão voltadas para esses tipos de sistemas. Sendo assim, é de suma importância que o Brasil também comece a pesquisar sistemas dessa natureza. O presente trabalho insere-se nesse contexto, propondo duas principais contribuições: O agendamento das tarefas de busca e rastreamento de vetores aéreos levando em consideração parâmetros operacionais e critérios de priorização e a otimização na criação do diagrama de antena gerado por um arranjo de antenas. O primeiro consiste na criação de uma função objetivo que gera a ordem de atividades a serem efetuadas pelo sistema de radar. Dessa forma, essa decisão é feita automaticamente pelo sistema, podendo o operador interferir ou não. Após decidida a ordem das tarefas a serem realizadas, o diagrama de antena é modificado, respeitando certos requisitos impostos pelo operador ou pelo cenário, alterando as alimentações dos elementos ativos do arranjo de antena, no intuito de realizar a atividade de forma otimizada. Para demonstrar a integração dos dois procedimentos citados, um simulador foi desenvolvido para servir como um modelo simples e operacional de um radar cognitivo. Analisam-se os resultados obtidos em alguns cenários propostos no trabalho.

Palavras-chave: Arranjo de antenas, otimização, agendamento e priorização de tarefas, sistemas de radar, radar cognitivo, radar multifuncional

Abstract

Multifunction Cognitive Radar refer to the next generation of radar systems. Many current researches are focused on these types of systems around the world. Therefore, it is extremely important that Brazil begins studying such systems. Within this context, the present work proposes two main contributions: Scheduling tasks of searching and tracking of targets based on operational parameters and prioritization criteria and Pattern optimization in phased array antennas. The former consists in creating an objective function that generates the scheduling tasks to be performed by the radar system. Thus, this decision is automatically made and the operator could or could not interfere. The latter consists in changing the antenna pattern, complying with requirements imposed by operator or environment, feeding the actives elements with phase and amplitude calculated to optimize it, after the tasks were chosen. In order to demonstrate the above procedures integration, a simulator was developed and will be used as a simple cognitive radar operational model. It were analyzed the results obtained in some scenarios proposed in the present work.

Keywords: Phased array, optimization, scheduling and prioritization tasks, radar systems, cognitive radar, multifunction radar

Lista de Figuras

1.1	Radare americano SCR-270 usado na Segunda Guerra Mundial	5
1.2	Primórdios de um radar pulsado	5
1.3	Estação do sistema de alerta radar de defesa britânico no início da II Guerra Mundial	6
1.4	Um único elemento do sistema <i>Chain Home</i>	6
1.5	Primeiro radar de direcionamento de tiro de armas de defesa antiaérea	7
1.6	Primeiro radar monostático britânico	8
1.7	Primeiro radar de direcionamento de tiro de armas da defesa antiaérea alemã	8
1.8	Marconi Martello Solid State 3D Radar	9
1.9	Elementos principais de um sistema radar multifuncional	10
1.10	Subsistemas estudados no presente trabalho	11
1.11	Principais parâmetros de um sistema de radar	12
1.12	SNR exigida para alcançar determinadas P_{det} e P_{fal}	17
1.13	SNR exigida para alcançar determinadas P_{det} e P_{fal} com diferentes flutuações do alvo	17
2.1	Radares que utilizam a tecnologia de arranjo de antenas	20
2.2	Exemplo de arranjo planar	21
2.3	Arquitetura de arranjos	22
2.4	Diagrama gerado por um arranjo de antena	23
2.5	Diagrama gerado por um arranjo de antenas linear	23
2.6	Geometria de um arranjo planar	24
2.7	Exemplos de diagramas com diferentes direções do lóbulo principal	28
2.8	Diagrama com <i>grating lobe</i>	28
2.9	Exemplos de janelas e seus resultados no domínio da frequência	30
3.1	Construção do diagrama gerado pela soma de funções do tipo $sinc(x)$ espaçadas de $\lambda/2$ (Meikle 2008)	34
3.2	Diagrama gerado pelo teorema de <i>Woodward-Lawson</i> , em linha cheia, confrontado com o diagrama desejado, em linha tracejada (Meikle 2008)	34
3.3	Diagrama gerado através do critério de Mínimos Quadrados com módulo e fase factíveis	38

3.4	Diagrama gerado através do critério de Mínimos Quadrados com módulo factível	38
3.5	Diagrama gerado através do critério de Mínimos Quadrados em Amplitude com módulo e fase factíveis	41
3.6	Diagrama gerado através do critério de Mínimos Quadrados em Amplitude com módulo factível	41
3.7	Diagramas gerados através dos dois critérios de Mínimos Quadrados	42
3.8	Comparação entre diagramas gerados através do teorema de <i>Woodward-Lawson</i> e do Critério de Mínimos Quadrados em Amplitude	42
3.9	Diagrama gerado através do método de LMIs	45
4.1	Ciclo básico de sistemas de radares cognitivos	48
4.2	<i>Clutters</i> e interferências existentes no cenário	49
4.3	Tarefas realizadas por um radar multifuncional	50
4.4	Arquitetura padrão de um Gerenciador de recursos do radar	53
4.5	Tempo de iluminação	59
5.1	Diagrama em bloco do Simulador	64
5.2	Exemplo de arquivo que define as trajetórias	67
6.1	Trajetoórias dos vetores aéreos em sistema de coordenadas cartesianas	76
6.2	Trajetoórias dos vetores aéreos em sistema de coordenadas polares	76
6.3	Distâncias dos vetores aéreos ao radar referentes ao Exemplo 1	77
6.4	Velocidades radiais dos vetores aéreos ao radar referentes ao Exemplo 1	77
6.5	Instantes relativos à primeira vigilância realizada pelo radar	79
6.6	Trajetoórias dos vetores aéreos em sistema de coordenadas cartesianas	82
6.7	Trajetoórias dos vetores aéreos em sistema de coordenadas polares	82
6.8	Distâncias dos vetores aéreos ao radar referentes ao Exemplo 1	84
6.9	Velocidades radiais dos vetores aéreos ao radar referentes ao Exemplo 1	84
6.10	Diagrama de radiação que suprime regiões de interferências e maximiza energia em 40°	85

Lista de Tabelas

2.1	Características de Janelamentos	30
4.1	Relação entre sistemas cognitivos biológicos e sistemas cognitivos de RADAR . .	47
4.2	Exemplo de lista de tarefas	54
4.3	Relação entre prioridade e parâmetros dos vetores aéreos	56
4.4	Relação entre parâmetros dos vetores aéreos e grau de periculosidade	57
5.1	Variável <i>AlvosDetectados</i>	69
5.2	Variável <i>AlvosDetectados</i>	69
5.3	Variável <i>AlvosDetectados</i>	71
5.4	Variável <i>VetoresAereos</i>	71
5.5	Variável <i>VetoresAereos</i>	72
6.1	Tarefas realizadas por instante de tempo referentes ao Exemplo 1	80
6.2	Tarefas realizadas por instante de tempo referentes ao Exemplo 2	87

Lista de Acrônimos e Notação

CFAR	Taxa Constante de Falso Alarme (<i>Constant False Alarm Rate</i>)
CW	Onda Contínua (<i>Continuous Wave</i>)
IFF	Identificação de Amigo ou Inimigo (<i>Identification Friend or Foe</i>)
LMI	Desigualdade Matricial Linear (<i>Linear Matrix Inequality</i>)
PRF	Frequência de repetição de pulsos (<i>Pulse Repetition Frequency</i>)
RCS	Seção Reta Radar (<i>Radar Cross Section</i>)
RF	Rádio-Frequência
RRM	Gerenciador de Recursos do Radar (<i>Radar Resource Management</i>)
TWS	Rastreia enquanto escaneia (<i>Track while Scan</i>)
UV	Unidade de Visualização
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

Sumário

Introdução Geral	1
1 Sistemas de radar	3
1.1 História dos sistemas de radar	3
1.1.1 Radares modernos	9
1.1.2 Radares cognitivos multifuncionais	10
1.2 Conceitos básicos de sistema de radar	12
1.2.1 Probabilidade de detecção e probabilidade de falso alarme	16
2 Arranjos de Antenas	19
2.1 Características	19
2.1.1 Geometria do arranjo	20
2.1.2 Ponderações fornecidas a cada elemento ativo do arranjo	21
2.1.3 Características de cada elemento ativo do arranjo	22
2.2 Análise matemática de um arranjo de antena planar	24
2.2.1 Direção do feixe	27
2.2.2 Formato do diagrama	29
3 Técnicas de Otimização	33
3.1 Técnicas para gerar diagramas de antena	33
3.1.1 Critério dos Mínimos Quadrados	36
3.2 Critério dos Mínimos Quadrados em Amplitude	38
3.3 Utilização de Desigualdades Matriciais Lineares	43
4 Radares cognitivos multifuncionais	47
4.1 Gerenciamento dos recursos do radar	50
4.1.1 Vigilância	51
4.1.2 Busca	51
4.1.3 Rastreamento	51
4.1.4 Guiamento de armas	52
4.1.5 Comunicação	52
4.2 Algoritmos utilizados no Gerenciamento de recursos do radar	53

4.2.1	Algoritmo utilizado no presente trabalho	55
5	Integração dos módulos	63
5.1	Estrutura do simulador	63
5.1.1	Arquivos de Entrada	64
5.1.2	Diagrama da Antena em Busca e Vigilância	67
5.1.3	Geração de Trajetórias	67
5.1.4	Detecção	68
5.1.5	Cálculo de Grau de Periculosidade	69
5.1.6	Cálculo de Tempo necessário em cada tarefa	70
5.1.7	Integração	71
5.1.8	Tempo sem ser visto de cada alvo	72
5.1.9	Gerenciamento de Recursos - Escolha da tarefa	72
5.1.10	Criação do Diagrama da Antena em Rastreo	73
5.2	Propriedades cognitivas inseridas no Simulador	73
6	Simulações e Resultados	75
6.1	Exemplo 1	75
6.1.1	Resultados	78
6.2	Exemplo 2	81
6.2.1	Resultados	86
7	Conclusão	89
7.1	Trabalhos futuros	91
	Publicações	93
	Bibliografia	95
	Anexo A	99

Introdução Geral

Pesquisas em sistemas de radar vêm sendo largamente realizadas desde sua invenção no início do século XX. Com o avanço tecnológico, em *hardware* com a miniaturização dos componentes eletroeletrônicos e em *software* com o aumento da capacidade computacional, os estudos desses sistemas e suas aplicações, civis e militares, em particular utilizando-se arranjos de antenas (*phased array antennas*), têm crescido muito nos últimos anos. Como trata-se de uma área em desenvolvimento crescente, novas tecnologias e novos sistemas de radar estão sendo criados. Radares cognitivos multifuncionais estão inseridos nesses novos conceitos de radar. Sistemas como esses têm a possibilidade de realizar diversas tarefas, tais como rastreamento de alvos, busca e vigilância de determinada área e guiamento de mísseis, canhões e foguetes conforme as necessidades operacionais, ou seja, o radar se adapta de forma automática ao seu ambiente de atuação com base numa pluralidade de fontes de informação potenciais e decide o que deve ser feito.

Devido ao grande interesse governamental em investir no desenvolvimento de tecnologias para área de defesa, conforme Decreto *n*º 6.703, de 18 de Dezembro de 2008, tendo como alvo importantes eventos esportivos que estão prestes a acontecer em solo brasileiro, é importante o estudo de aplicações voltadas a essa área. Dentro da área de defesa, o presente trabalho tem como foco principal o estudo e o desenvolvimento de subsistemas voltados para uso em sistemas de radar multifuncional, mais especificamente, em radares de defesa antiaérea. Os subsistemas presentes no trabalho estão voltados às características de arranjos de antenas, à otimização de maneira adaptativa do diagrama de radiação por elas gerado e à priorização de tarefas desempenhadas pelo sistema. Os objetivos e justificativas, acadêmicos e operacionais, que regem o trabalho realizado, assim como a motivação acerca do tema escolhido, podem ser listados como:

- Diminuir o hiato tecnológico existente na área de defesa entre o Brasil e determinados países desenvolvidos;
- Contribuir no estudo brasileiro voltado à área de sistemas de radar, em especial radares cognitivos multifuncionais;
- Atualizar-se quanto ao uso da tecnologia de arranjos de antenas;
- Propor novas técnicas para resolver o problema de escolha de ponderação para elementos ativos de arranjos de antena;

- Propor uma forma de ordenar e definir as tarefas que serão realizadas pelo sistema dentro do cenário de atuação do sistema de radar;
- Direcionar estudos a uma área de pesquisa pouco explorada em âmbito nacional;
- Criar um simulador modular que abrange tanto a parte de criação de diagrama de antena quanto a parte operacional de agendamento de atividades em radares multifuncionais.

O trabalho está inserido no estudo de arranjo de antenas linear utilizando critérios de otimização no intuito de gerar diagramas de radiação coerentes com a necessidade instantânea da operação, e no estudo da priorização e do agendamento de tarefas realizadas por radares multifuncionais. Além disso, um simulador foi criado no intuito de validar as propostas e os algoritmos desenvolvidos durante o trabalho. Para facilitar a análise, o trabalho está dividido em seis capítulos mais a conclusão.

No primeiro capítulo, é feita uma análise acerca de sistemas de radar em geral. Primeiramente, expõe-se a história desse invento desde suas origens até as tecnologias mais modernas. Em seguida, é feito um embasamento teórico sobre os princípios de sistemas de radar utilizados no desenvolvimento do trabalho, abrangendo seu funcionamento, assim como principais características e equações que regem a tecnologia de radar.

No segundo capítulo, um estudo sobre arranjo de antenas é desenvolvido, expondo suas funcionalidades, características e modelamento matemático, enfatizando os arranjos de antenas lineares. É apresentada a influência que as amplitudes e fases dos elementos ativos que compõem o arranjo têm no diagrama de radiação gerado pela antena como um todo.

No terceiro capítulo, os critérios de otimização propostos no trabalho são explicados. Os métodos utilizados se baseiam em algoritmos já existentes, porém modificados para se adequarem ao uso em questão, garantindo assim uma nova contribuição na área de radar. Três métodos são expostos no trabalho: O método de mínimos quadrados clássico, o método de mínimos quadrados em amplitude e o método utilizando LMIs (*linear matrix inequalities*).

No quarto capítulo, é explicado o conceito de radares cognitivos e radares multifuncionais, enfatizando o sistema de gerenciamento de recursos e os métodos de priorização e agendamento de tarefas. Por fim, é proposto um modelo de função objetivo utilizado para definir a priorização e o agendamento de tarefas.

No quinto capítulo, expõe-se o simulador utilizado para validar os estudos desenvolvidos no trabalho, descrevendo minuciosamente todos os módulos implementados, além dos seus arquivos e parâmetros de entrada.

No sexto capítulo, os resultados obtidos através de dois exemplos inseridos no simulador são descritos. O primeiro exemplo é uma análise visando demonstrar o conceito do programa e dos algoritmos desenvolvidos. Já o segundo é um exemplo mais complexo que visa demonstrar toda a capacidade do simulador.

No último capítulo, uma conclusão é tecida acerca do trabalho desenvolvido e dos resultados obtidos, deixando perspectivas para possíveis trabalhos futuros que venham a ser desenvolvidos nessa área.

Apesar do foco desse trabalho ser voltado para um contexto militar, as deduções e as ideias aqui contidas podem, em sua totalidade, ser utilizadas em aplicações civis.

Sistemas de radar

O estudo de sistemas de radar é relativamente recente, sendo uma das diversas invenções desenvolvidas durante o século XX. O primeiro radar que se tem conhecimento data de 1904, porém só tivera alguma utilidade prática em 1931 quando o sistema foi instalado em navios no intuito de localizar e prevenir a aproximação de obstáculos (Skolnik 2008). A palavra RADAR, na realidade, é um acrônimo criado pela marinha americana em 1940 que significa *RA*dio *D*etection *A*nd *R*anging. Como o próprio nome diz, o princípio básico de um sistema de radar é detectar e indicar a que distância se encontra um determinado alvo. Para tal, há a transmissão de um pulso de onda eletromagnética de rádio frequência(RF) que se reflete em determinado objeto e é recebido após um determinado intervalo de tempo. A partir desse intervalo de tempo(ΔT) é possível encontrar a distância (R) onde se encontra o respectivo objeto através da equação 1.1.

$$R = \frac{c\Delta T}{2} \quad (1.1)$$

Onde c é a velocidade da luz. O fator 2 existe pois a onda percorre uma distância igual a R até o objeto e praticamente a mesma distância de volta até o radar.

Atualmente, modernos radares não só detectam objetos e fornecem a distância em que se encontram como também rastreiam, identificam, classificam e geram imagens enquanto suprimem interferências, intencionais ou não, causadas pelo ambiente (Richards, Holm & Scheer 2008). Uma breve história da tecnologia radar desde sua origem é descrita na próxima seção e em seguida, conceitos básicos de sistema de radar utilizados no trabalho são mencionados. Por fim, é feita uma breve explicação sobre radares multifuncionais, foco principal do trabalho.

1.1 História dos sistemas de radar

Mesmo tendo sua maior repercussão durante a Segunda Guerra Mundial, pesquisas acerca de sistemas de radar datam de bem antes de 1939. Desde o final do século XIX, basicamente os oito países seguintes já possuíam linhas de pesquisas voltadas a essa área: França, Alemanha, Itália, Japão, Reino Unido, Hungria, União Soviética e Estados Unidos (Guarnieri 2010). No entanto, antes de citar a criação do primeiro radar, é interessante fazer um breve histórico explicando a origem dessa ideia.

A teoria do eletromagnetismo, formulada por James Clerk Maxwell, em Cambridge, Inglaterra, em 1855, prevê que um campo eletromagnético pode ser propagado na forma de uma onda viajando na velocidade da luz. Com base nessa teoria, o físico alemão Heinrich Hertz, em 1887, demonstrou que ondas de rádio se comportavam como ondas de luz, obtendo as leis de propagação e reflexão. Em seguida, em 1897, enquanto o cientista russo Alexander Popov, um dos precursores do uso de antenas, transmitia um sinal eletromagnético, uma interferência causada por um navio que passava pelo local no mesmo instante foi observada. Essa observação foi considerada a primeira evidência de um sistema de radar (Guarnieri 2010), incitando o desenvolvimento de experimentos envolvendo tecnologia de radar durante as três décadas seguintes entre pesquisadores ao redor do mundo.

Conforme Guarnieri (2010), o aparelho que pode ser considerado o primeiro radar do mundo foi construído em 1904 pelo cientista alemão Christian Hülsmeier. No entanto, o aparelho operando a 650MHz, feito para detectar a presença de navios que estivessem no mar e inseridos em densa neblina dentro de 2 milhas náuticas, não obteve sucesso prático, pois não era capaz de mostrar a distância do navio e nem a direção de seu movimento. Porém, foi nos Estados Unidos que Nikola Tesla introduziu, em 1917, os princípios relativos de frequência e potência necessários para detectar tanto a presença de objetos quanto os seus movimentos. A partir daí, foram estabelecidos conceitos básicos, em termos de frequência e potência, que permitiriam o desenvolvimento subsequente do radar por diversos cientistas americanos e europeus. Cinco anos depois, Guglielmo Marconi, considerado por muitos o criador do rádio, apresentou um trabalho sobre princípios de radar na *Institute of Radio Engineers Conference* de 1922, expondo em 1933 a ideia ao governo italiano no intuito de obter apoio financeiro para continuar suas pesquisas na área. Esse apoio permitiu que Ugo Tiberio iniciasse uma pesquisa focada em 1935, alcançando os principais resultados teóricos acerca de sistemas de radar, que permanecem até hoje. Na mesma época, o engenheiro francês Emile Girardeau registrou e conseguiu uma patente pelo seu trabalho num sistema de radar multifrequência, e em seguida instalou o sistema a bordo de um navio de carga e posteriormente em um transatlântico. Também em 1934, na União Soviética, o engenheiro P.K. Oschepkov construiu um aparato capaz de detectar a presença de um avião a três quilômetros de distância. Em dezembro de 1934, Robert M. Page testou, nos Estados Unidos, um protótipo experimental de radar modulado em pulso tendo sucesso em detectar um avião a 1.6 km de distância. Com auxílio financeiro do governo, o grupo de Page desenvolveu, dois anos depois, um aparelho capaz de detectar aviões voando a 40 km de distância. Em 1937, o desenvolvimento de um rudimentar radar terrestre americano, como mostrado na figura 1.1 foi de grande importância operacional na guerra, pois o mesmo, quatro anos depois detectou a entrada de aviões japoneses em Pearl Harbor. Os japoneses também desenvolveram essa tecnologia na mesma década, porém suas pesquisas estavam atrasadas em relação aos outros países e só conseguiram desenvolver um sistema de radar concreto alguns anos depois, na década de 1940, aproveitando equipamentos britânicos capturados no início da Segunda Guerra Mundial. Dentre todas as nações que desenvolviam pesquisas na área de radar, as que mais se destacaram foram o Reino Unido e a Alemanha.

Em 1935, o engenheiro britânico Robert Watson-Watt conseguiu desenvolver um protótipo de radar com a capacidade de detectar aeronaves a longas distâncias (mais de 100 km) e mostrou

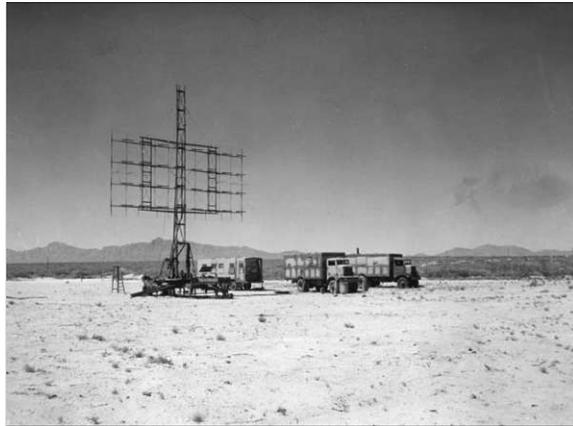


Figura 1.1: Radar americano SCR-270 usado na Segunda Guerra Mundial

todo o potencial da sua descoberta ao Ministério da Aeronáutica Britânico que imediatamente integrou essa nova tecnologia ao seu sistema de defesa. No entanto, o experimento de Watt em 1935 utilizava transmissão de onda contínua (CW) sem modulação, o que impossibilitava a medida de distância do alvo. A fim de avaliar a distância de determinado alvo, a ideia posterior, mostrada na figura 1.2, foi utilizar um trem de pulsos de sinais espaçados no tempo, criando assim o primeiro radar pulsado. Uma vez transmitido um pulso, o transmissor era desligado e um receptor adjacente ao transmissor era ligado, estando pronto para receber a energia refletida por um possível alvo que estivesse dentro do feixe da antena. Hoje em dia é utilizada uma tecnologia mais aprimorada, não sendo necessário desligar o transmissor durante a recepção ou vice-versa, fazendo-se uso de um circulador ou outro dispositivo similar. Dessa forma, uma mesma antena pode conter transmissores e receptores.

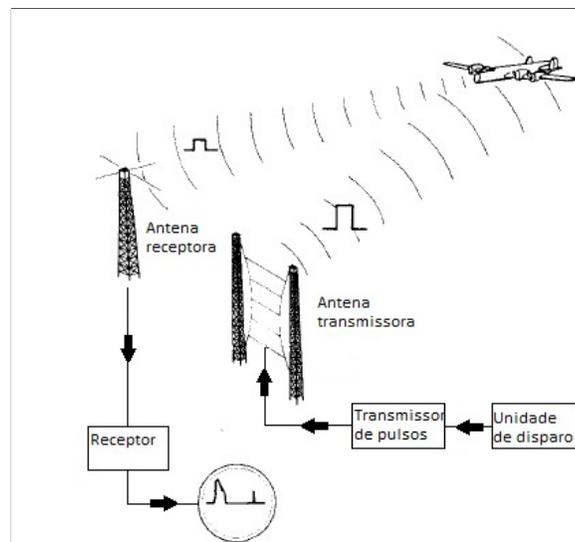


Figura 1.2: Primórdios de um radar pulsado

Devido ao sucesso obtido em detectar aeronaves com o primeiro protótipo usando esse princí-

pio, o progresso na área se deu de forma muito rápida. Sendo assim, em 1937, o famoso sistema de alerta de radar de defesa conhecido como *Chain Home*, figuras 1.3 e 1.4, operando na faixa de frequência de 20-30MHz, foi criado e instalado em toda a costa leste britânica (James 1989). Tais sistemas não só forneciam a distância das aeronaves, mas também eram capazes de indicar, de forma ainda pouco precisa, a direção da reflexão. Uma vez detectado um alvo, cabia ao operador tentar encontrar a direção do sinal recebido de forma manual. Em retrospecto, esses sistemas foram um feito notável, planejado, desenvolvido e instalado a tempo de ainda ajudar na defesa britânica perante aos grandes ataques aéreos alemães de 1940.

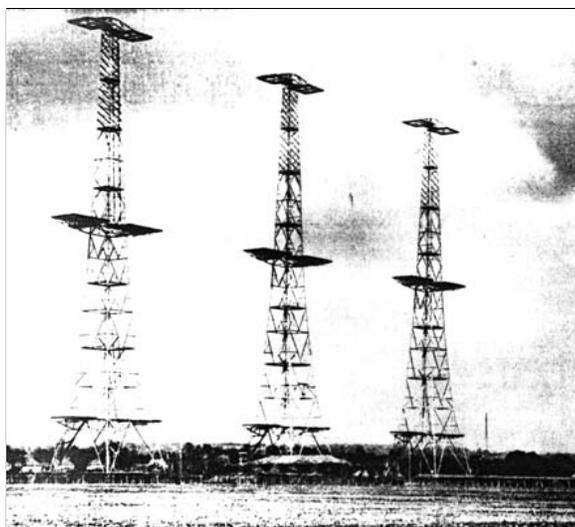


Figura 1.3: Estação do sistema de alerta radar de defesa britânico no início da II Guerra Mundial



Figura 1.4: Um único elemento do sistema *Chain Home*

No entanto, a precisão azimutal e elevacional precisava ser melhorada. Sendo assim, utilizando-

se os conceitos físicos de que a largura de 3dB do feixe principal do diagrama de radiação da antena diminui com o comprimento de onda do sinal (vide seção 2.2.2) e que a frequência do sinal transmitido é inversamente proporcional ao comprimento de onda, quanto maior a frequência do sinal transmitido mais estreito será o feixe principal do diagrama de radiação da antena.

A partir dessa análise, as pesquisas britânicas se voltaram a tentar encontrar um transmissor potente que conseguisse trabalhar em frequências mais altas, na ordem de Gigahertz. Assim, em Fevereiro de 1940, John Randall e Henry Boot construíram um magnetron de cavidades ressonantes, equipamento esse capaz de gerar um sinal com potência acima de 5000kW e frequência entre 3GHz e 10GHz. Curiosamente, foi devido a esse invento, criado para utilização em radares, que alguns pesquisadores americanos, que trabalhavam em sua construção, perceberam que as microondas também eram capazes de aquecer e cozinhar os alimentos colocados próximos à fonte de emissão de radiação (Carvalho 2005). Com a invenção do poderoso magnetron, imediatamente existiu uma grande pressão por parte do governo britânico em desenvolver sistemas que exploravam as vantagens das microondas, tanto no ponto de vista de acurácia e mobilidade quanto no desenvolvimento de novos radares com capacidade de “enxergar” mais longe. Com o aumento da frequência de transmissão, tornou-se viável a criação de um novo tipo de radar, que utilizava a vantagem de um feixe principal de antena mais estreito, ou seja, mais diretivo. Depois do radar de vigilância detectar um possível alvo, o operador poderia movimentar as antenas e segui-lo com o feixe principal por elas gerado, obtendo assim maior precisão em suas medidas. Esse foi o primórdio do radar de rastreamento, mostrado na figura 1.5, que tornou possível direcionar o sistema de armas da defesa antiaérea após o alvo ser detectado (James 1989).

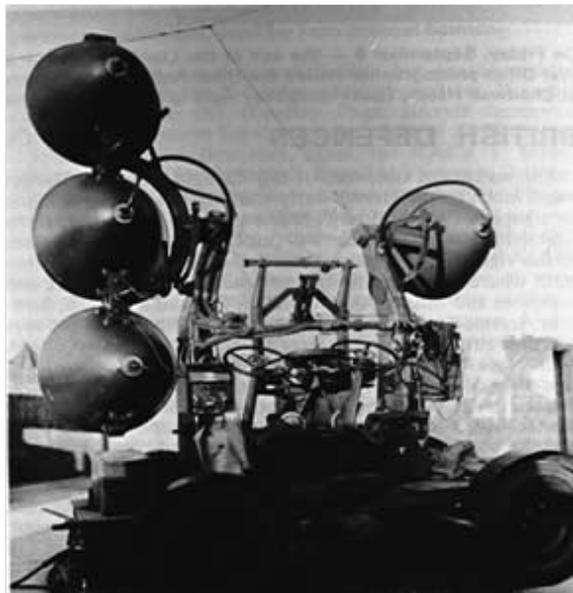


Figura 1.5: Primeiro radar de direcionamento de tiro de armas de defesa antiaérea

Ainda durante a II Guerra Mundial, uma importante invenção que se seguiu foi a de um rápido chaveamento entre antenas, permitindo assim que uma única antena transmitisse e recebesse o sinal, criando o radar monostático mostrado na figura 1.6. A partir dessa invenção foi possível a criação de sistemas de radares mais compactos, e assim, desenvolver sistemas que

direcionassem o feixe principal da antena para uma determinada direção de forma automática, dado que um alvo já tivesse sido detectado e sua direção definida como interesse de visada. Esses desenvolvimentos formaram a base da tecnologia de radar pelos anos seguintes.



Figura 1.6: Primeiro radar monostático britânico

Assim como os britânicos, os alemães, líderes no estudo da tecnologia de campos eletromagnéticos, investiram, igualmente, tempo e esforço no desenvolvimento de sistemas de radar. Rudolf Kühnhold obteve sucesso em suas pesquisas, primeiramente em 1934, quando usou um sistema de transmissão de onda contínua. No mesmo ano, Hans Erich Hollmann construiu o primeiro radar para operar a bordo de um navio. Em 1937, os alemães desenvolveram seu primeiro radar terrestre pulsado, operando na faixa de 120-130MHz. Percebe-se assim, que a linha de ação alemã foi muito parecida com a britânica, não sendo necessário citar os mesmos avanços obtidos. O radar alemão de rastreamento chamado de *Würzburg-Riese* ou *Giant Würzburg*, também utilizado na II Guerra Mundial é mostrado na figura 1.7.

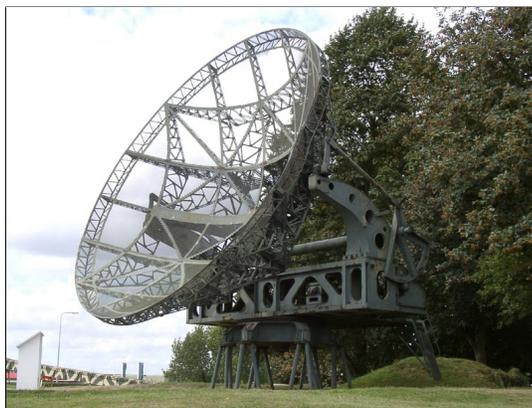


Figura 1.7: Primeiro radar de direcionamento de tiro de armas da defesa antiaérea alemã

Todos os eventos históricos mencionados até aqui mostram que os primeiros radares foram

construídos nas décadas de 1930 e 1940, obviamente motivados pela necessidade de uso militar. O ambiente político e militar deste período fez com que os esforços em pesquisa e desenvolvimento ocorressem em paralelo, não havendo cooperação entre os países, movidos por motivos estratégicos, políticos e táticos, o que junto com as limitações técnicas da época atrasaram o desenvolvimento de um melhor desempenho dos sistemas.

1.1.1 Radares modernos

Com o final da II Guerra Mundial, teve-se início a um novo período conhecido como Guerra Fria. Devido a essa disputa econômica, política e militar entre Estados Unidos e União Soviética, pesquisas na área de radar continuaram, porém agora no intuito de melhorar o desempenho das medidas obtidas e no desenvolvimento de contra-medidas eletrônicas, a fim de evitar interferências propositalmente (*jammings*) e a detecção do seu sinal por parte de outros sistemas. Esse período levou ao desenvolvimento de sistemas de radar mais sofisticados e rapidamente apareceram novos sistemas e configurações.

Uma das mais importantes invenções tecnológicas no período pós guerra foi a criação do transistor, nos Estados Unidos, em 1948, e em seguida, a indústria de semicondutores. A miniaturização dos circuitos possibilitou a compactação dos sistemas, permitindo extrair mais informações do radar e apresentá-las aos operadores. Com o avanço do desenvolvimento de mísseis balísticos de longo alcance durante a década de 1960, detectou-se que os sistemas de defesa antiaérea deveriam ser portáteis e os estudos na área voltaram-se para esse foco. Baseada nessa nova diretriz, uma geração moderna de radares de vigilância foi desenvolvida. Esses equipamentos empregam uma tecnologia nova na parte de antenas, chamada de arranjo de antenas, as quais produzem múltiplos feixes em elevação e precisam de um motor para girar em azimute. A figura 1.8 mostra um desses sistemas construído na década de 80. Essa forma de transmissor/receptor, com múltiplos amplificadores e defasadores que alimentam individualmente cada linha de antena passou a ser o foco das pesquisas em razão de seus inúmeros benefícios (James 1989).



Figura 1.8: Marconi Martello Solid State 3D Radar

A mais nova geração de radares, ainda sendo desenvolvida e aprimorada, visa a criação de radares adaptativos de multifunções, também chamados de radares cognitivos multifuncionais. Esse modelo de radar funciona como um radar de busca e vigilância ao mesmo tempo que consegue rastrear um determinado número de alvos simultaneamente, adaptando-se ao cenário

no qual está inserido. Para tal, isso requer o uso de arranjo de antenas, onde cada elemento (ou conjunto de elementos) precisa ter seu próprio transmissor e receptor, com amplificadores e defasadores, tanto na transmissão quanto na recepção, controlados automaticamente por um processador.

O objetivo desse trabalho é abordar alguns aspectos importantes acerca de radares cognitivos multifuncionais. Uma breve apresentação dos principais módulos contidos em sistemas como esse será feita a seguir, e maiores detalhes serão tratados no capítulo 4.

1.1.2 Radares cognitivos multifuncionais

Atualmente, modernos sistemas de radar consistem em radares multifuncionais, também chamados de radares de multifunções, que se adaptam às necessidades impostas pelo ambiente. Esse tipo de sistema utiliza um arranjo de antenas, onde o transmissor e o receptor consistem de diversos módulos de transmissão e recepção. Com isso, é possível desempenhar diversas funções, simultaneamente ou não, tais como rastreamento de alvos, busca e vigilância setoriais e guiamento de mísseis e foguetes. Nesse tipo de sistema, o gerenciador de recursos do radar (*Radar Resource Management - RRM*) é o responsável por otimizar o uso de recursos do radar de forma a maximizar seu desempenho. A figura 1.9 demonstra o conceito básico da construção de um sistema de radar monostático multifuncional, foco deste trabalho.

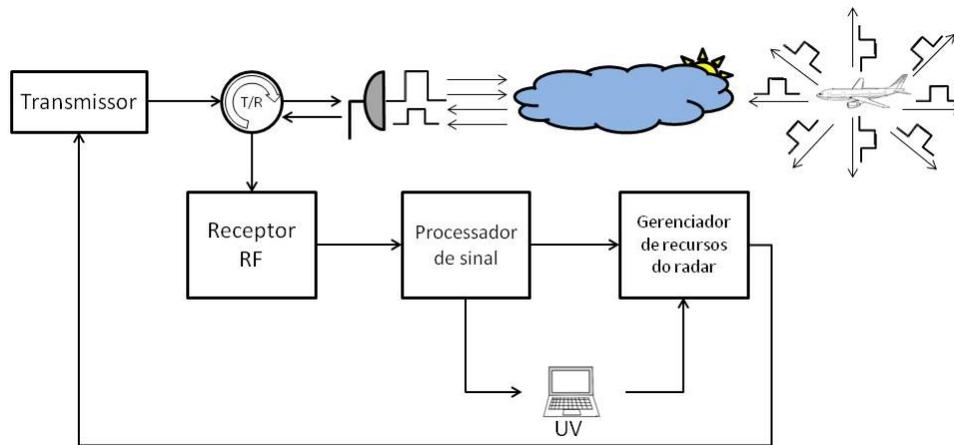


Figura 1.9: Elementos principais de um sistema radar multifuncional

O radar monostático é aquele que possui uma única antena para transmitir e receber o sinal, fazendo-se uso de um módulo transmissor/receptor (T/R). Esse módulo, normalmente um circulador, conecta tanto o transmissor, equipamento responsável pela geração da forma de onda do sinal eletromagnético que será propagado, sua amplificação e sua transmissão propriamente dita, quanto o receptor à antena. O receptor consiste, nessa ordem, de um amplificador de baixo ruído (LNA), um mixer que converte o sinal RF para uma frequência intermediária (FI), banco de filtros, amplificadores, detector de envoltória e conversores analógicos/digitais (A/D). Após passar por toda a cadeia de recepção, o sinal digital passa por uma cadeia de processamento, onde algoritmos implementados fornecem como saída para a unidade de visualização (UV) os

parâmetros principais do alvo detectado. Esses parâmetros normalmente são distância ao radar, azimute, elevação, velocidade e tipo de alvo (quando está incluído no processamento o módulo de identificação e classificação). Por fim, esses mesmos dados são passados para um módulo chamado Gerenciador de Recursos do Radar (RRM) que gerencia as atividades realizadas pelo sistema. Esse módulo indica quais parâmetros serão modificados no sistema para que atenda às necessidades do operador (ligação UV - RRM) ou impostas por sua inteligência artificial, assim como é responsável pela indicação da próxima tarefa que será realizada, fornecendo os parâmetros necessários para tal. Muitos trabalhos estão sendo desenvolvidos nessa área, e em alguns deles o RRM também é responsável por modificar a forma de onda, o intervalo entre pulsos enviados (PRF) e a potência de transmissão para cada tarefa realizada.

O foco do presente trabalho está voltado às características de arranjo de antena, otimizando de maneira adaptativa o diagrama por elas gerado, procurando diminuir ao máximo as interferências causadas por outros vetores aéreos ou por obstáculos estáticos (*clutters*) presentes no cenário de atuação e, além disso, à priorização no rastreamento de vetores aéreos¹ detectados pelo radar. O trabalho não abrange mudanças nos parâmetros relativos a formas de onda, mas sim define que tipo de tarefa será realizada e por quanto tempo, criando um critério para a escolha das atividades realizadas pelo radar. O estudo engloba módulos pertencentes a quase todos os subsistemas mostrados em um sistema de radar desse tipo. A figura 1.10 indica em verde os subsistemas que, de alguma forma, fazem parte do estudo feito.

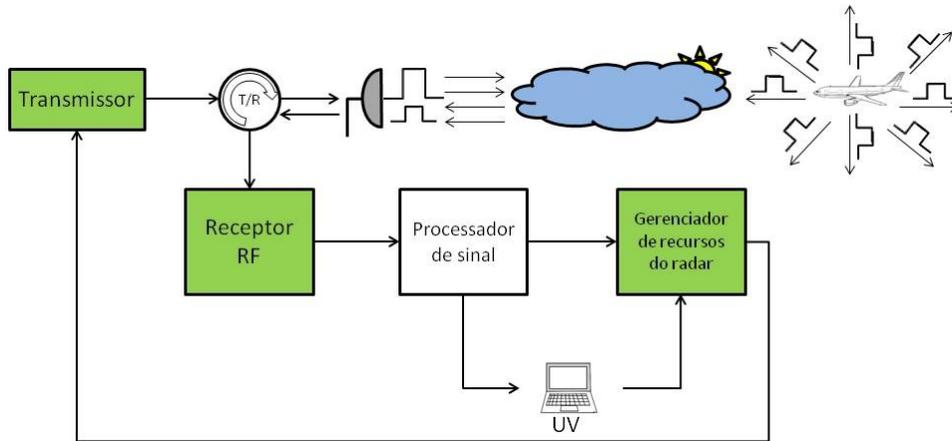


Figura 1.10: Subsistemas estudados no presente trabalho

Destaca-se que o bloco *Gerenciador de recursos do radar* é o responsável pelas funções cognitivas, e também será foco do presente trabalho. No capítulo 4, esse tipo de sistema de radar será tratado com mais detalhes.

¹Vetor aéreo é o nome dado a todo tipo de objeto voador que encontra-se no cenário analisado pelo radar, sendo ele amigo, inimigo ou desconhecido.

1.2 Conceitos básicos de sistema de radar

Como mencionado, sistemas de radar de vigilância e de defesa têm como objetivo estimar a posição, em três dimensões, de um determinado alvo, além de suas características cinemáticas. Isso se faz no intuito de controlar o tráfego aéreo, direcionar armas antiaéreas e vigiar o espaço aéreo. Os principais parâmetros fornecidos na saída de um sistema radar são: distância linear ao radar (*range*), azimute, elevação e velocidade conforme mostrado na figura 1.11, onde θ é o azimute, ϕ é a elevação e r é a distância linear ao radar.

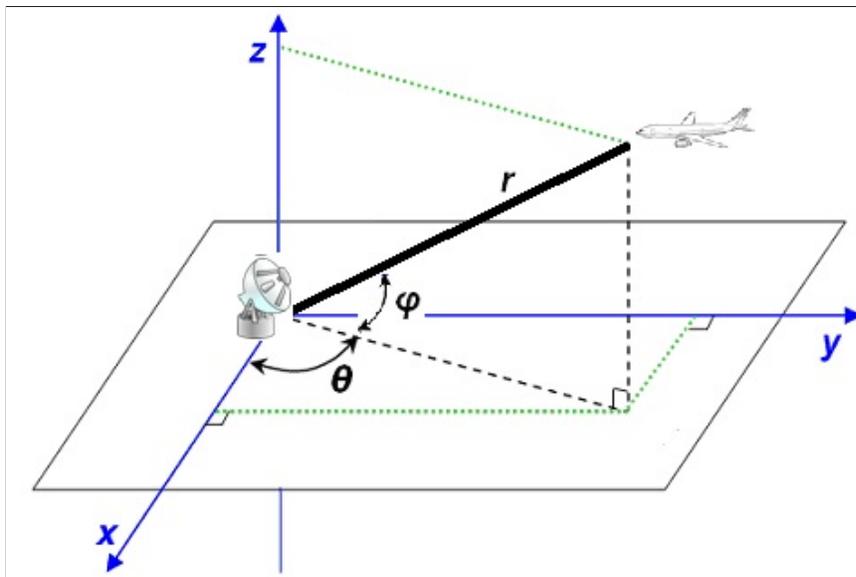


Figura 1.11: Principais parâmetros de um sistema de radar

Porém, existem algumas condições que precisam ser satisfeitas para que o radar consiga detectar determinado alvo. Um parâmetro de suma importância nessa análise é a relação sinal-ruído recebida na saída do receptor (SNR), definida pela razão entre a potência média do sinal recebido (P_r) e a potência média do ruído existente no sistema (P_N), dada pela equação 1.2.

$$SNR = \frac{P_r}{P_N} \quad (1.2)$$

A partir da equação 1.2, é possível saber se um determinado alvo conseguirá ser detectado ou não pelo radar, dada sua distância a ele, sua seção reta radar e parâmetros de projeto do sistema.

A SNR é calculada através da equação radar, a qual é a base para o projeto de qualquer sistema de radar. Para encontrá-la, primeiramente será explicado como se calcula o valor da potência média do sinal recebido pelo sistema de radar, considerando que essa seja proveniente da reflexão do sinal em um alvo distante de R do radar.

Considerando que a antena transmita um pulso de onda eletromagnética com potência de pico P_t e que essa onda se propague isotropicamente, a potência de pico do pulso transmitido que chega a um alvo localizado em um ponto P , distante R do sistema de radar, por unidade

de área, é dada pela equação 1.3.

$$P_p = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad (1.3)$$

Porém, a antena de transmissão não necessariamente é isotrópica, tendo assim uma certa diretividade, e conseqüentemente, um ganho de transmissão, $G_t(\theta, \phi)$, dependente do azimute e da elevação do ponto P . Assim, a densidade de potência dada na equação 1.3 é melhor representada na equação 1.4

$$P_p = \frac{P_t G_t(\theta, \phi)}{4\pi R^2} \quad (1.4)$$

No entanto, estamos interessados em calcular a potência recebida pelo sistema de radar e não a recebida pelo alvo. Para tal, é necessário identificarmos a parcela de sinal que é refletida na direção radial. Essa parcela é referente à componente da área do objeto orientada perpendicularmente à direção de propagação da onda eletromagnética. Essa componente de área é chamada de *Seção Reta Radar* (RCS) e é medida em metro quadrado. A onda refletida também será esférica e propagar-se-á por uma distância R (considerando que o deslocamento do alvo durante o período de propagação da onda seja muito pequeno comparado com a distância R e que a mesma antena que transmite é a que recebe o sinal), ocasionando uma atenuação. Considerando que o alvo em P tenha uma seção reta radar igual a σ , a potência por unidade de área que chega na antena do sistema de radar, P_s , é dada pela equação 1.5.

$$P_s = \frac{P_t G_t(\theta, \phi)}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \quad (1.5)$$

A densidade de potência mostrada na equação 1.5 é referente ao que chega na antena. No entanto, como dito anteriormente, estamos interessados na potência média que chega no receptor do sistema, e portanto, ainda temos que considerar a área efetiva da antena receptora, A_e . Assim, a potência média no receptor do sistema é dada pela equação 1.6.

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot A_e \quad (1.6)$$

Essa área efetiva indica o quão eficaz é a recepção da antena, e é dada pela equação 1.7 (Skolnik 2008).

$$A_e = \frac{G_r(\theta, \phi)\lambda^2}{4\pi} \quad (1.7)$$

Sendo λ o comprimento de onda do sinal e $G_r(\theta, \phi)$ o ganho de recepção da antena dependente do azimute e da elevação do ponto P .

Negligenciando os argumentos das funções ganho G_t e G_r , a potência média recebida pelo sistema pode ser dada pela equação 1.8.

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (1.8)$$

Na maioria dos sistemas de radar monostáticos os ganhos G_t e G_r , mostrados na equação 1.8, são os mesmos e esse produto é substituído por G^2 , com G sendo o ganho da antena. Porém,

em sistemas bistáticos ou que empregam arranjo de antenas, os dois ganhos são geralmente diferentes, e como o foco do presente trabalho são sistemas que utilizam arranjo de antenas, são mostrados dos ganhos diferentes na equação 1.8.

Já a potência média do ruído, na prática, é dada considerando somente a contribuição do ruído térmico presente no receptor. Essa potência é dada pela equação 1.9 (Skolnik 2008)

$$P_N = kTBF \quad (1.9)$$

Sendo k a constante de Boltzmann dada por $1,38 \times 10^{-23} J/K$, T a temperatura efetiva de ruído do receptor em kelvin, B a largura de banda equivalente de ruído do receptor em hertz (em geral aproximadamente igual a largura de banda do sinal) e F a figura de ruído do receptor, sendo dada por definição, pela razão entre as relações: potência média da portadora por potência média de ruído de entrada e potência média da portadora por potência média de ruído de saída do receptor.

Dividindo a equação 1.8 pela equação 1.9 encontra-se a razão Sinal/Ruído (SNR) do sinal recebido que é dada pela equação 1.10.

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T B F} \quad (1.10)$$

Essa razão só leva em consideração parâmetros do meio físico e da cadeia de Rádio-Frequência, sem considerar suas perdas. Além disso, o processamento também fornece ganhos relativos à integração dos pulsos enviados e à compressão de pulsos, e perdas, relativas a filtragens, CFAR² e mixer digital. Esses ganhos são dados por $n_p T_p B_s$, onde n_p é o número de ecos recebidos no sistema, T_p é a largura do pulso em segundos e B_s é a largura de banda do sinal, em Hertz. Já as perdas podem ser dadas por uma única perda, chamada de perda total do sistema, L_s , dada pela equação 1.11 (Richards et al. 2008).

$$L_s = L_t L_a L_r L_{sp} \quad (1.11)$$

Sendo L_t a perda na cadeia de transmissão, L_a a perda atmosférica (diferente da atenuação da onda), L_r a perda na cadeia de recepção e L_{sp} a perda de processamento.

Dessa forma, a equação radar completa é dada pela equação 1.12.

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma n_p T_p B_s}{(4\pi)^3 R^4 k T B F L_s} \quad (1.12)$$

Onde os termos dessa equação são:

- P_t - Potência de pico do transmissor em watts.
- G_t - Ganho de transmissão da antena em decibéis³.
- G_r - Ganho de recepção da antena em decibéis.

²CFAR - *Constant False Alarm Rate*.

³decibéis - Termos dados em decibéis são colocados na equação na forma de $10^{x/10}$ quando se trata de grandezas relacionadas à potência e $10^{x/20}$ quando se trata de grandezas relacionadas à amplitude, onde x denota o valor da variável em decibéis.

- λ - Comprimento de onda do sinal transmitido em metros.
- σ - Seção reta radar do alvo (sem flutuação) em metros quadrados.
- n_p - Número de ecos recebidos no sistema e integrados no processador.
- T_p - Largura de pulso do sinal transmitido em segundos.
- B_s - Largura de banda do sinal transmitido em hertz.
- R - Distância entre o sistema de radar e o alvo em metros.
- k - Constante de Boltzmann em joules por kelvin.
- T - Temperatura efetiva de ruído do receptor em kelvin.
- B - Largura de banda equivalente de ruído do receptor em hertz.
- F - Figura de ruído do receptor em decibéis.
- L_s - Perda total do sistema em decibéis.

Dentre os parâmetros mencionados na equação 1.12, os únicos que não podem ser alterados pelo projetista são a seção reta radar do alvo e a distância em que ele se encontra. Sendo assim, considerando que o sistema de perdas já é conhecido e a largura do pulso e a frequência do sinal são fixas, o que se pode mudar para aumentar a razão Sinal/Ruído são a potência de transmissão do sinal, P_t , os ganhos de transmissão e recepção da antena, G_t e G_r , e o número de pulsos integrados, n_p .

Alterar a potência de transmissão do sinal envolve um maior custo para o projeto e uma péssima opção em termos de medida de proteção eletrônica, visto que equipamentos de Medidas de Apoio à Guerra Eletrônica (MAGE) habitualmente analisam potência de pico. Dessa forma, é possível aumentar a SNR direcionando o feixe principal do diagrama de radiação da antena para o alvo, tendo assim, maiores ganhos de transmissão e recepção da antena, e aumentando o número de pulsos integrados. Percebe-se então, que quanto maior o tempo em que o feixe principal da antena ilumina determinado alvo, além de ter o maior ganho possível, mais pulsos são emitidos e conseqüentemente, maior será a razão sinal/ruído relativo àquele vetor aéreo. A partir dessa análise, é possível encontrar qual é o tempo necessário de iluminação em determinado alvo para que se tenha uma SNR mínima calculada.

Na prática, a equação radar encontrada e mostrada na equação 1.12 não indica a relação sinal ruído real. Isso se dá devido a três considerações que não foram feitas: (1) A natureza estatística do sinal que chega no receptor, (2) flutuações e incertezas quanto a seção reta radar de cada alvo e (3) efeitos causados pela atmosfera e pela superfície da Terra no sinal propagado. Esse último pode influenciar no desempenho do sistema de radar de diversas maneiras, tais como refração da energia pela atmosfera terrestre, difração das ondas emitidas, reflexões provenientes de múltiplos percursos e atenuação do sinal. Embora a teoria básica de propagação de ondas eletromagnéticas seja conhecida, e pode ser estudada, estimar os efeitos causados por um determinado lugar e para um tempo futuro específico nem sempre é fácil de ser obtido, pois é difícil adquirir informações

necessárias sobre o ambiente de operação do sistema. Assim, esses efeitos serão negligenciados no presente trabalho. Já as duas primeiras considerações indicam que a distância máxima vista por um radar dada a sua SNR não pode ser tratada de forma determinística, mas sim probabilisticamente. Assim, a especificação dessa distância precisa incluir a probabilidade que o radar detecta um alvo específico, assim como a probabilidade dele detectar alvos falsos quando nenhuma reflexão de alvos estiver presente. Essas probabilidades são chamadas de probabilidade de detecção e probabilidade de falso alarme respectivamente. Quando levadas em consideração, além de garantirem uma SNR mais próxima da real, se relacionam com a precisão e acurácia das medidas.

1.2.1 Probabilidade de detecção e probabilidade de falso alarme

Calculada a SNR , é necessário saber se esse valor é suficiente para detectar o alvo ou não. Para se ter uma análise mais próxima da realidade, dois fatores precisam ser considerados: a probabilidade de falso alarme e a probabilidade de detecção. Escolhendo-se a probabilidade de detecção mínima e a probabilidade de falso alarme máxima admissíveis, é possível encontrar a razão sinal/ruído mínima para se detectar algum vetor aéreo que esteja a uma determinada distância ou para determinar a precisão de medidas. Além disso, com a equação 1.12 pode-se determinar a distância máxima que um alvo pode ser detectado com a probabilidade de detecção mínima e a probabilidade de falso alarme máxima estabelecidas.

Em sistemas reais, o sinal recebido no receptor do radar vem inserido em ruídos provenientes dos meios externos (presença de *clutters*, interferências ou outros efeitos externos) e internos (ruído térmico). Devido a isso, é necessário que se estabeleça um limiar, com base na tensão de interferência do local, para em seguida compará-lo com o sinal entrante em decidir sobre a presença de um vetor aéreo ou não. Basicamente, se o sinal exceder o limiar se diz que algo foi detectado, caso contrário nenhum vetor aéreo é declarado.

No entanto, há dois problemas nessa análise. O primeiro é causado quando o sinal entrante ultrapassa o limiar de detecção, porém não é proveniente da reflexão de nenhum vetor aéreo, caracterizando um falso alarme. Em contrapartida, quando o sinal entrante não ultrapassa o limiar, porém há um vetor aéreo naquela região, a detecção não ocorre. O limiar de detecção pode ser um valor fixo, mas tem que ser tal que garanta uma baixa probabilidade de falso alarme e uma alta probabilidade de detecção. No entanto, a interferência raramente é conhecida, o que dificulta essa escolha. Particularmente em radares modernos, esse limiar é adaptativo, sendo ajustado automaticamente de modo coerente com o local onde está inserido o sistema de radar (Richards et al. 2008).

Conhecendo esses problemas que sempre existirão, o projetista usualmente se interessa em conhecer e especificar uma probabilidade mínima de detectar um dado alvo (P_{det}) e a probabilidade máxima de um falso alarme (P_{fal}) causada pelo ruído. Curvas já preestabelecidas descrevem a relação entre SNR , P_{fal} e P_{det} . Um exemplo dessas curvas é mostrado na figura 1.12 (Richards et al. 2008).

No entanto, as seções retas dos vetores aéreos, vistas pelo sistema de radar, não são as mesmas a cada reflexão. Isso acontece devido aos posicionamentos dos vetores aéreos e seus ângulos de inclinação não serem constantes, fazendo com que o sinal emitido pelo radar reflita

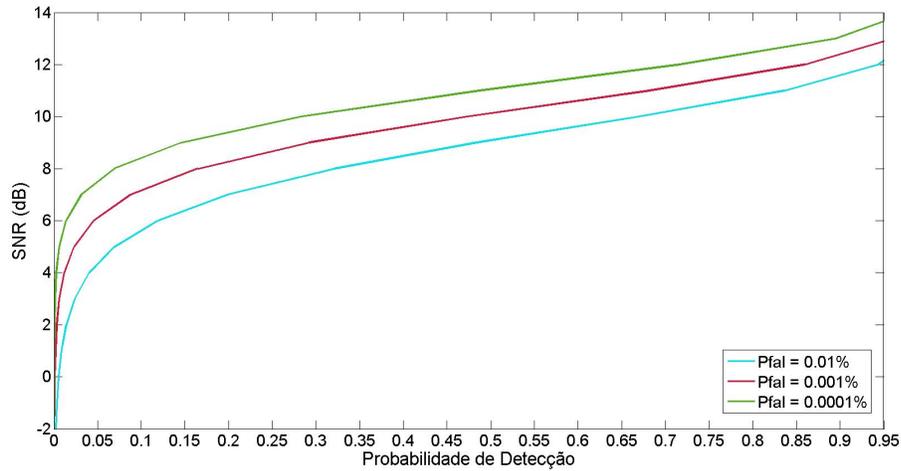


Figura 1.12: SNR exigida para alcançar determinadas P_{det} e P_{fal}

em partes diferentes de seu corpo. Assim, é necessário trabalhar com a natureza estatística da seção reta radar. Peter Swerling desenvolveu quatro modelos estatísticos que descrevem quatro condições diferentes de flutuação da seção reta radar do alvo (Skolnik 2008) e, conseqüentemente, quatro curvas diferentes que fornecem a SNR mínima suficiente para detectar respectivos tipos de alvos. O projetista escolhendo as probabilidades que ele julga suficientes e um dos quatro casos de Peter Swerling (SW1,SW2,SW3,SW4) ou o caso sem flutuação (SW0), a SNR mínima é calculada. De posse desse valor, projeta-se a cadeia de RF, a forma de onda utilizada e o número de pulsos que precisam ser integrados. Um exemplo contendo duas curvas relacionando SNR , P_{fal} e P_{det} , com diferentes condições de flutuações é mostrado na figura 1.13 (Richards et al. 2008).

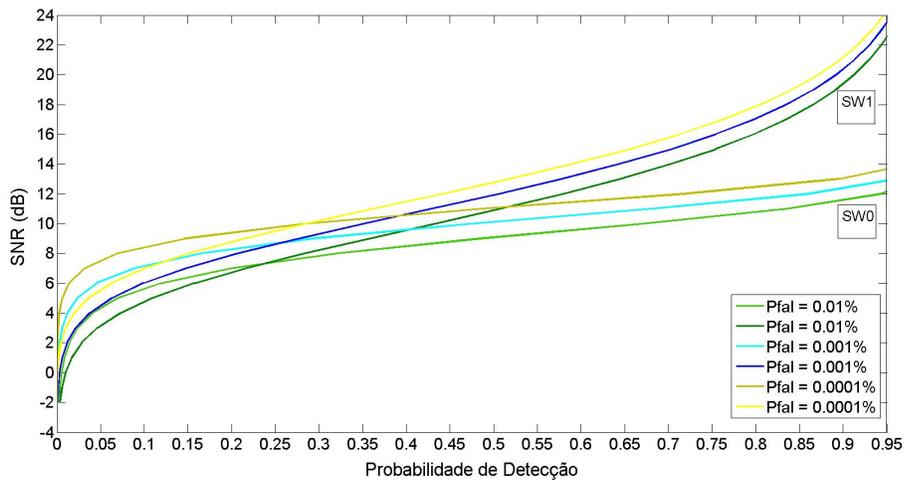


Figura 1.13: SNR exigida para alcançar determinadas P_{det} e P_{fal} com diferentes flutuações do alvo

Para o caso $SW0$, onde se considera que o vetor aéreo reflita sempre da mesma maneira o sinal recebido, a relação entre SNR , P_{fal} e P_{det} , quando $10^{-7} \leq P_{fal} \leq 10^{-3}$ e $0.1 \leq P_{det} \leq 0.9$, pode ser dada de modo aproximado pela equação 1.13 (Skolnik 2008).

$$SNR = \ln\left(\frac{0.62}{P_{fal}}\right) + 0.12 \cdot \ln\left(\frac{0.62}{P_{fal}}\right) \cdot \ln\left(\frac{P_{det}}{1 - P_{det}}\right) + 1.7 \cdot \ln\left(\frac{P_{det}}{1 - P_{det}}\right) \quad (1.13)$$

Arranjos de Antenas

Arranjos de antenas, ou em inglês *phased arrays antennas*, estão sendo largamente explorados, tanto em aplicações civis quanto em aplicações militares, devido às suas particularidades. Dentre suas aplicações, pode-se citar o uso em estações de rádio AM e FM, comunicação de sondas espaciais, atividades óticas e acústicas, radares meteorológicos e modernos sistemas de radares militares (Richards et al. 2008).

A primeira antena desse tipo da qual se tem registro foi desenvolvida durante a Segunda Guerra Mundial obtendo baixa precisão. Só durante as décadas de 1950 e 1960 que a teoria foi estudada intensivamente tanto nos Estados Unidos, no laboratório Lincoln no *Massachusetts Institute of Technology* quanto na antiga União Soviética pelo grupo do professor Yuri Yurov no *Leningrad Electrical Engineering Institute* (Vendik & Yegorov 2000), (Fenn, Temme, Delaney & Courtney 2000). No entanto, ainda nos dias de hoje, buscam-se métodos que exploram ao máximo suas características assim como equipamentos que diminuem o seu custo (Skolnik 2008). Esse capítulo apresenta as características e as vantagens desse tipo de antena para sistemas de radar e em seguida faz-se uma análise matemática em torno dos elementos que compõem esse tipo de sistema.

2.1 Características

Arranjos de antenas são formados por múltiplos irradiadores transmissores/receptores coerentemente alimentados cada qual com respectiva fase e amplitude. A multiplicidade de elementos permite um controle mais preciso do diagrama de radiação emitido pela antena, diminuindo lóbulos secundários e modelando o seu padrão de formação (Mailloux 2005). No entanto, a razão principal de se utilizar um arranjo é a possibilidade de direcionar o feixe principal do diagrama da antena de forma eletrônica, deslocando-o em frações de segundos, e principalmente, sem a necessidade do uso de um motor, principal responsável pelo tempo médio entre falhas de um equipamento.

O princípio básico de arranjos de antenas baseia-se nas interações construtivas e destrutivas das ondas que foram demonstradas em 1801 pelo cientista inglês Thomas Young. Seu experimento confirmou que ondas que se combinam em fase reforçam-se mutuamente, enquanto que ondas que se combinam em fases opostas cancelam-se uma a outra naquele ponto (Halliday,

Resnick & J. 1995). Sendo assim, ondas eletromagnéticas irradiadas por antenas próximas interferem uma na outra em cada ponto do espaço. O mapeamento da energia associada a cada ponto do espaço, em relação a uma antena de referência (usualmente isotrópica), é chamado de diagrama de radiação da antena e é determinado, em arranjo de antenas, pela soma vetorial dos campos irradiados por cada elemento ativo que compõem o arranjo.

Em radares multifuncionais, o uso de arranjos de antenas é essencial visto que é possível rastrear diversos vetores aéreos simultaneamente ou intervalados no tempo, além de criar setores de busca e realizar vigilância dentro da área compreendida pela antena como um todo, fazendo com que a mudança de direção do feixe principal seja realizada quase instantaneamente (período de tempo dependente do processo de mudança de fases e amplitudes em cada elemento ativo, geralmente na ordem de unidades de microsegundos), diferente de um radar de antena fixa e giro mecânico.

Alguns parâmetros de um arranjo de antena podem ser modificados no intuito de controlar o diagrama de radiação criado por ele. Esses parâmetros são dados, basicamente, por: geometria do arranjo, ponderações (amplitude e fase) fornecidas a cada um dos elementos ativos e as características físicas destes elementos. Como cada aplicação exige um tipo de arranjo adequado, não existe um padrão para escolha de parâmetros a ser seguido independente do projeto. As fotos expostas na figura 2.1 são exemplos de radares que utilizam a tecnologia de arranjo de antenas. O primeiro é o radar terrestre americano *Pave Paws*, construído no Alasca, o segundo é um radar aerotransportado no caça russo MiG-29 e o terceiro é o radar naval AN/SPS-48 da marinha americana. Percebe-se que cada qual possui um formato específico, e obviamente uma função diferente a ser desempenhada.



Figura 2.1: Radares que utilizam a tecnologia de arranjo de antenas

2.1.1 Geometria do arranjo

A geometria do arranjo é compreendida pelo número de elementos ativos que compõem o sistema, pelas distâncias entre eles e pela forma como estão dispostos, podendo esta última ser unidimensional (linear) ou bidimensional, adotando formato circular, planar, hexagonal, entre outros. A figura 2.2 mostra um arranjo retangular com vinte elementos ativos espaçados uniformemente de dx na horizontal e dz na vertical.

As características da geometria do arranjo impõem certos limites ao sistema, vantagens e desvantagens. Como dito anteriormente, cada aplicação exige um tipo diferente de arranjo,

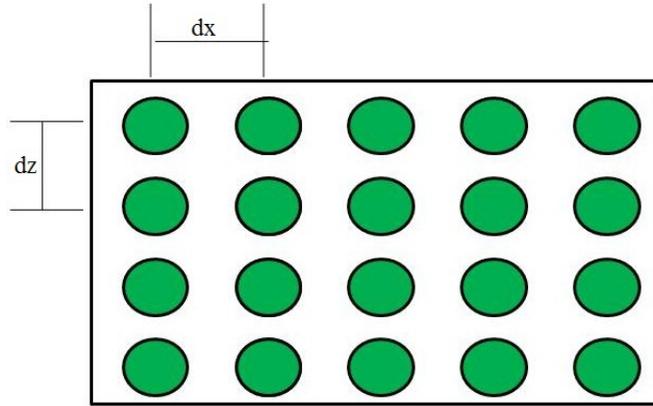


Figura 2.2: Exemplo de arranjo planar

levando em conta custo e limitações físicas impostas pelo projeto. Como exemplo, cita-se que arranjos dispostos em linha só conseguem conformar o diagrama em um único plano, mas são mais simples e menos custosos de se construir, enquanto que os planares conformam o diagrama em três dimensões, mas necessitam de uma grande quantidade de elementos, e conseqüentemente um maior custo e maior gasto de energia.

2.1.2 Ponderações fornecidas a cada elemento ativo do arranjo

Como o diagrama gerado pelo arranjo é dado pela soma vetorial dos campos irradiados por cada elemento ativo que compõem o arranjo, as fases e as amplitudes das ondas eletromagnéticas emitidas por cada um deles influenciam nesse diagrama. O número complexo, mostrado na equação 2.1, criado pelas fases (α_{mn}) e amplitudes (A_{mn}) atribuídas a cada elemento ativo de antena mn (sendo m a linha e n a coluna) é chamado de ponderação.

$$w_{mn} = A_{mn} \cdot e^{j\alpha_{mn}} \quad (2.1)$$

Com m sendo a linha onde se encontra o elemento mn e n a coluna, conforme mostrado na figura 2.2, $A_{mn} \in \mathfrak{R}_+$ e $0 \leq \alpha_{mn} \leq 2\pi$. Logo, como as ponderações são compostas por módulo e fase, e podem ser descritas como grandezas complexas, é possível criar uma modelagem matemática do problema.

A maneira como se fornece as ponderações aos elementos ativos depende da arquitetura do sistema. Existem dois tipos principais de arquiteturas para arranjo de antenas: Arranjos passivos e arranjos ativos. O primeiro tem como gerador de potência um único transmissor que divide a energia gerada igualmente por uma rede de elementos. Tem como vantagem ser uma solução simples e mais barata e como desvantagem um controle menor em amplificação e atenuação, impedindo o uso de distribuições em amplitude (Sabatini & Tarantino 1994). Já o segundo possui um módulo transmissor-receptor em cada elemento de radiação, garantindo assim uma menor perda de potência e capacidade de criar distribuições em amplitude, mas em contrapartida cria um maior aquecimento da antena (necessidade de mais dissipadores) e alto custo (Sabatini & Tarantino 1994). Em ambas estruturas, os defasadores são próprios, ou seja,

cada elemento ativo possui o seu defasador, o qual altera a fase de seu respectivo elemento de um valor α_m , onde m é o número do elemento. A figura 2.3 exemplifica essas arquiteturas no caso de um arranjo linear, onde A/N é a parcela de amplitude fornecida igualmente a cada elemento no arranjo passivo e A_i é a amplitude fornecida ao elemento i no arranjo ativo.

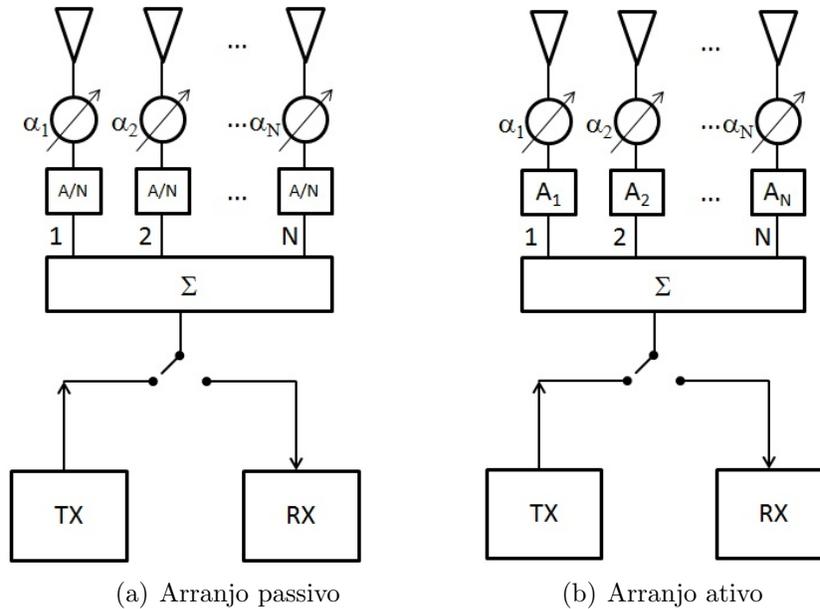


Figura 2.3: Arquitetura de arranjos

No presente trabalho será considerado um arranjo ativo, pois dessa forma é possível encontrar distribuições em amplitudes não uniformes.

2.1.3 Características de cada elemento ativo do arranjo

As características de cada elemento ativo do arranjo também influenciam no diagrama de radiação gerado. Considerando que todos os elementos do arranjo sejam idênticos, esse diagrama é dado pelo produto entre o campo irradiado por cada um dos elementos e o campo gerado pelo arranjo por completo (Balanis 1982), chamado de *fator de arranjo*, como mostrado na figura 2.4

Não necessariamente os elementos do arranjo precisam ser idênticos. No entanto, na grande maioria dos casos práticos, eles são iguais, a menos por erros desprezíveis provenientes do processo de fabricação. Essa escolha se dá porque é mais simples, conveniente e prática, e portanto é adotada em projetos de engenharia, e também a será no presente trabalho.

Escolhidos todos os parâmetros supracitados, é possível prever o formato do campo diretivo criado pelo arranjo. Com base na geometria, nas ponderações utilizadas em cada elemento ativo e em suas características eletromagnéticas, um diagrama de radiação é formado, podendo ser de recepção ou de transmissão. A figura 2.5 indica um resultado unidimensional obtido e as principais definições no estudo de diagramas de antenas.

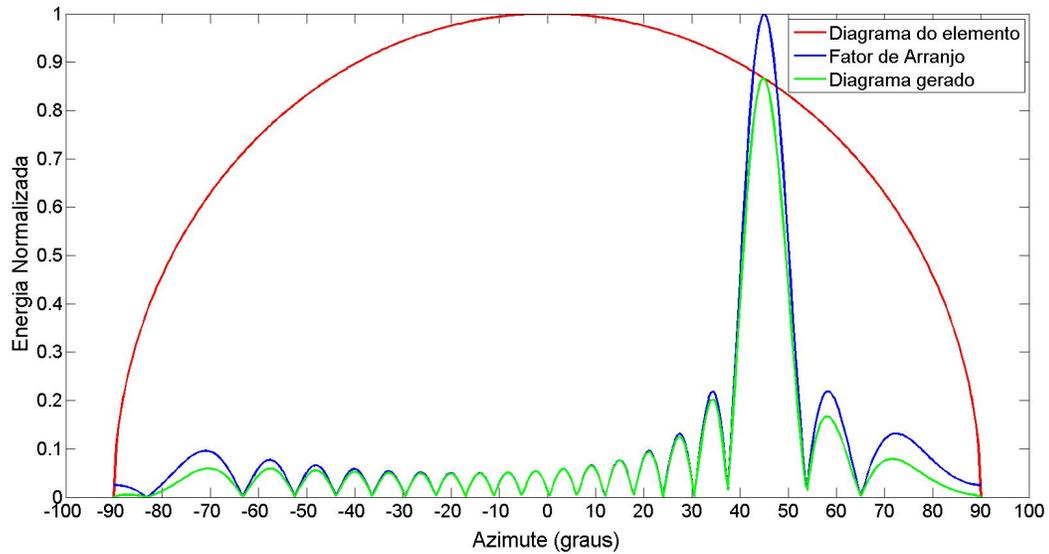


Figura 2.4: Diagrama gerado por um arranjo de antena

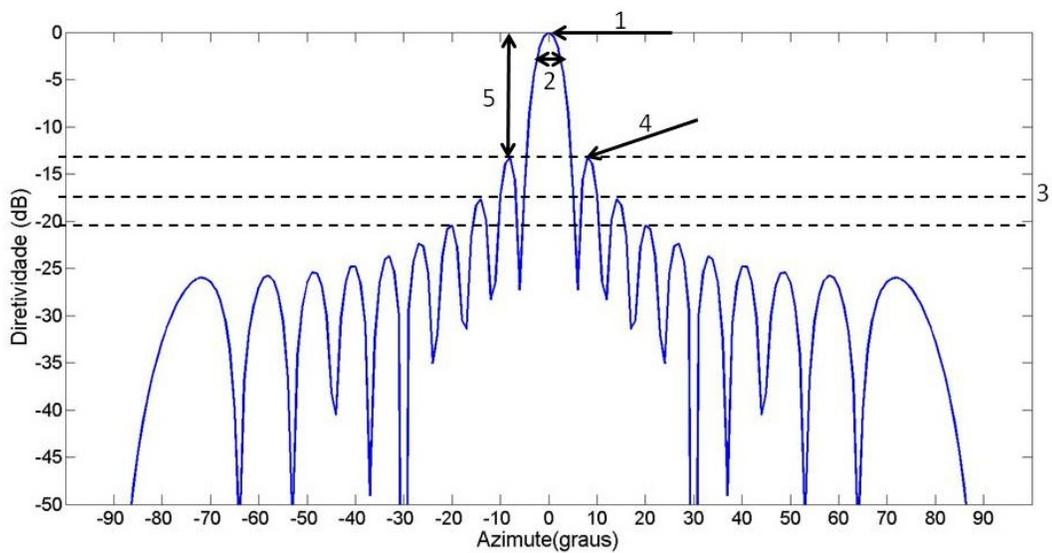


Figura 2.5: Diagrama gerado por um arranjo de antenas linear

Onde:

- (1) - Lóbulo principal (*Mainlobe*)
- (2) - Largura de 3dB (*Beamwidth*)
- (3) - Lóbulos secundários (*Sidelobes*)
- (4) - Pico dos lóbulos secundários
- (5) - Relação Primário - Secundário (SLR)

Diversos trabalhos na literatura exploram a influência das características do arranjo no diagrama de antena formado por ele. Alguns exploram a geometria, outros desenvolvem algoritmos para a escolha das ponderações e outros o tipo e formato de antena que será usada como elemento ativo. O foco do presente trabalho está na escolha das ponderações em um arranjo planar, considerando os elementos ativos como antenas isotrópicas sem acoplamento mútuo.

O próximo capítulo tratará da análise matemática de um arranjo planar de antenas e como, modificando as fases e amplitudes de cada elemento ativo do arranjo e as distâncias entre eles, é possível alterar as características do diagrama de antena mencionadas na figura 2.5.

2.2 Análise matemática de um arranjo de antena planar

Seja um arranjo planar de antenas e seja um ponto P no espaço, cujas convenientes coordenadas são dadas por (R_P, θ_P, ϕ_P) relativas ao centro do plano de antenas conforme mostrado na figura 2.6. No caso, R_P é a distância do ponto P ao centro do arranjo, θ_P é seu azimute e ϕ_P sua elevação em relação ao centro do arranjo. Supondo que R_P seja muito maior do que $\frac{10L^2}{\lambda}$, sendo L o comprimento da maior dimensão do arranjo e λ o comprimento de onda, pode-se dizer que o ponto em questão está em um campo distante considerando-se possíveis lóbulos secundários muito baixos (Hacker & Schrank 1982). Sendo assim, pode-se considerar que a onda eletromagnética que chega em P é planar, assim como a onda que chega no arranjo proveniente da reflexão de um objeto situado no ponto P . A partir dessa suposição, pode-se dizer que o campo elétrico gerado por cada elemento mn , em função do azimute e da elevação do respectivo ponto, que chega até este ponto é dada pela equação 2.2.

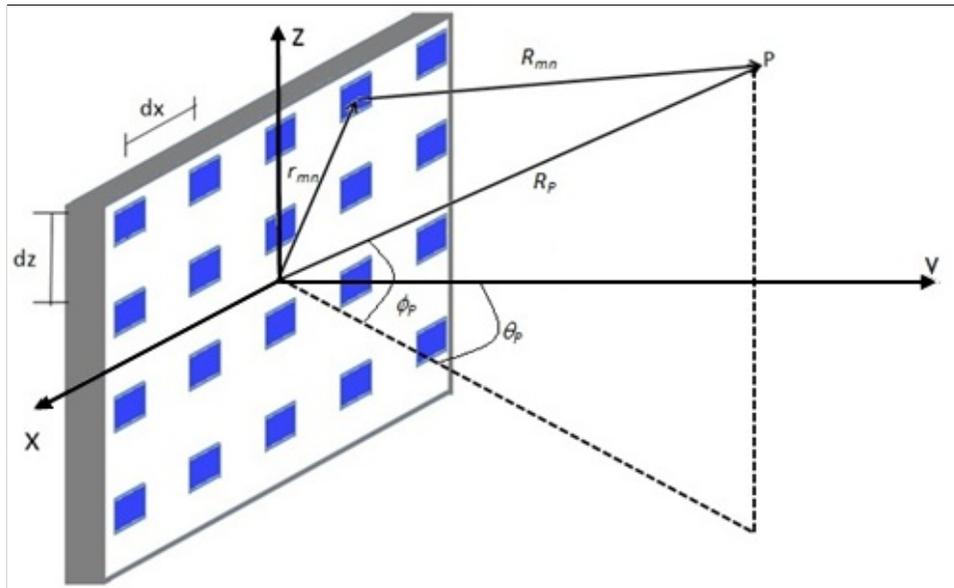


Figura 2.6: Geometria de um arranjo planar

$$s_{mn}(\theta_P, \phi_P) = D_{mn}(\theta_P, \phi_P)w_{mn}e^{\frac{j2\pi R_{mn}}{\lambda}} \quad (2.2)$$

Sendo:

- s_{mn} - campo elétrico gerado pelo elemento mn em volts por metro.
- θ_P - azimute do ponto P em graus.
- ϕ_P - elevação do ponto P em graus.
- D_{mn} - diagrama de radiação do elemento mn em volts por metro.
- w_{mn} - ponderação fornecida a cada elemento mn em amplitude e fase.
- λ - comprimento de onda da onda eletromagnética radiada em metros.
- R_{mn} - distância entre o elemento mn e o ponto P em metros.

Porém, o sinal mostrado na equação 2.2 está em função da distância do ponto P à cada elemento mn o que não é interessante, visto que os sinais se somam antes de entrar no receptor (vide figura 2.3) e essa grandeza não é encontrada diretamente. A ideia é encontrar uma função que forneça a contribuição de cada elemento no campo radiado resultante em um ponto P em função do azimute e da elevação desse ponto P em relação ao centro da antena, para que se possa encontrar o valor de w_{mn} que satisfaça determinada necessidade.

Pela figura 2.6, percebe-se que a distância entre o elemento ativo mn e o ponto P é dada por $R_{mn} = |\vec{R}_P - \vec{r}_{mn}|$, sendo \vec{r}_{mn} o vetor que liga a origem do centro de coordenadas ao elemento ativo mn e \vec{R}_P o vetor que liga o centro do arranjo ao ponto P . A partir da equação 2.2 e considerando que $|\vec{R}_P| = R_P \gg r_{mn}$, pode-se escrever que (Mailloux 2005)

$$s_{mn}(\theta_P, \phi_P) = D_{mn}(\theta_P, \phi_P)w_{mn}e^{\frac{j2\pi|\vec{R}_P - \vec{r}_{mn}|}{\lambda}} \quad (2.3)$$

$$s_{mn}(\theta_P, \phi_P) = D_{mn}(\theta_P, \phi_P)w_{mn}e^{\frac{j2\pi(R_P - \vec{r}_{mn} \cdot \hat{R}_P)}{\lambda}} \quad (2.4)$$

$$s_{mn}(\theta_P, \phi_P) = D_{mn}(\theta_P, \phi_P)w_{mn}e^{\frac{j2\pi R_P}{\lambda}} e^{\frac{-j2\pi(x_{mn}\hat{i} + z_{mn}\hat{k}) \cdot \hat{R}_P}{\lambda}} \quad (2.5)$$

Sendo:

- x_{mn} - a posição do elemento mn no eixo x.
- z_{mn} - a posição do elemento mn no eixo z.
- \hat{i} e \hat{k} - vetores unitários nas direções dos eixos x e z respectivamente.
- \hat{R}_P - vetor unitário na direção \vec{R}_P , ou seja, $\hat{R}_P = \frac{\vec{R}_P}{\|\vec{R}_P\|}$.

Como as direções azimutal ($\hat{\theta}$) e elevacional ($\hat{\phi}$) são normais entre si, é possível separar as funções dependentes desses dois ângulos da seguinte forma:

$$D_{mn}(\theta_P, \phi_P) = D_{ELm}(\phi_P)D_{AZn}(\theta_P) \text{ e } w_{mn} = w_m w_n \quad (2.6)$$

Sendo D_{ELm} o diagrama em elevação do elemento m e D_{AZn} o diagrama em azimute do elemento n .

Aplicando a separação fornecida na equação 2.6 na equação 2.5 encontra-se a equação 2.7.

$$s_{mn}(\theta_P, \phi_P) = e^{\frac{j2\pi R_P}{\lambda}} (D_{ELm}(\phi_P) w_m e^{\frac{-j2\pi(x_{mn}\hat{i}\cdot\hat{R}_P)}{\lambda}}) (D_{AZn}(\theta_P) w_n e^{\frac{-j2\pi(z_{mn}\hat{k}\cdot\hat{R}_P)}{\lambda}}) \quad (2.7)$$

Assim, é possível separar o diagrama de radiação total em diagrama de radiação em azimute e diagrama de radiação em elevação. Porém, o sinal ainda está em função de produtos escalares de vetores unitários. Escrevendo \vec{R} em termos dos vetores unitários \hat{i}, \hat{j} e \hat{k} , tem-se que

$$\vec{R}_P = R_P \cos\phi_P \sin\theta_P \hat{i} + R_P \cos\phi_P \cos\theta_P \hat{j} + R_P \sin\phi_P \hat{k}$$

Logo,

$$\hat{R}_P = \cos\phi_P \sin\theta_P \hat{i} + \cos\phi_P \cos\theta_P \hat{j} + \sin\phi_P \hat{k} \quad (2.8)$$

Aplicando a igualdade mostrada em 2.8 na equação 2.7, é possível escrevê-la em termos da elevação e do azimute do ponto P , conforme mostrado na equação 2.9.

$$s_{mn}(\theta_P, \phi_P) = e^{\frac{j2\pi R_P}{\lambda}} (D_{AZn}(\theta_P) w_n e^{\frac{-j2\pi x_{mn} \cos\phi_P \sin\theta_P}{\lambda}}) (D_{ELm}(\phi_P) w_m e^{\frac{-j2\pi z_{mn} \sin\phi_P}{\lambda}}) \quad (2.9)$$

A equação 2.9 diz respeito a um único elemento mn . O diagrama gerado pelo arranjo completo, considerando que ele seja composto por M linhas e N colunas de elementos ativos, é dado pela soma da contribuição de todos os elementos. Logo, o diagrama da antena em um ponto a R_P de distância, com elevação ϕ_P e azimute θ_P é dado pela equação 2.10.

$$F(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N s_{mn}(\theta, \phi)$$

$$F(\theta, \phi) = e^{\frac{j2\pi R_P}{\lambda}} \cdot \sum_{m=1}^M (D_{ELm}(\phi_P) w_m e^{\frac{-j2\pi z_{mn} \sin\phi_P}{\lambda}}) \cdot \sum_{n=1}^N (D_{AZn}(\theta_P) w_n e^{\frac{-j2\pi x_{mn} \cos\phi_P \sin\theta_P}{\lambda}}) \quad (2.10)$$

Considerando que todos os elementos sejam idênticos, o que é geralmente utilizado em aplicações práticas, os fatores referentes aos diagramas de cada elemento ativo ($D_{AZn}(\theta_P)$ e $D_{ELm}(\phi_P)$) podem sair do somatório, confirmando que o diagrama é dado pelo produto entre o campo irradiado por cada um dos elementos e o campo gerado pelo arranjo por completo (*fator de arranjo*).

Como as deduções são análogas para as duas dimensões, para facilitar o desenvolvimento, a partir desse ponto a análise será feita apenas em uma única dimensão. Dessa forma, analisando por exemplo só o azimute, pode-se considerar, sem perda de generalidade, $\phi_P = 0$, ou seja, o plano perpendicular a antena passando pelo centro de coordenadas. Assim sendo, considerando também que todos os elementos são iguais, a equação 2.10 pode ser escrita como

$$F(\theta, 0) = e^{\frac{j2\pi R_P}{\lambda}} D_{AZ}(\theta) D_{EL}(0) \cdot \sum_{m=1}^M w_m \sum_{n=1}^N w_n e^{\frac{-j2\pi x_{mn} \sin\theta}{\lambda}} \quad (2.11)$$

Onde o subscrito P foi omitido dos ângulos de elevação e de azimute, indicando que a equação que expressa o sinal proveniente de um elemento mn serve para qualquer ponto no espaço.

A partir da equação 2.11, é possível fornecer o diagrama gerado pelo arranjo dado as ponderações, em módulo e fase, de cada um dos elementos mn . Sendo assim, essa equação será utilizada para analisarmos tanto o comportamento em fase - direção do feixe - quanto as características do diagrama referentes às amplitudes em cada elemento ativo - formato do diagrama.

2.2.1 Direção do feixe

Como nessa subseção estamos interessados somente no estudo da direção do feixe, ou seja, na fase associada a cada elemento ativo, consideraremos antenas isotrópicas e ponderações com amplitudes constantes. Essas considerações implicam que os elementos ativos irradiarão de forma igual independente do valor de θ ($D_{AZn}(\theta) \cdot D_{ELm}(0) = D$) e $w_{mn} = Ae^{j\alpha_{mn}}$. Dessa maneira, a equação 2.11 pode ser resumida a equação 2.12.

$$F(\theta, 0) = De^{\frac{j2\pi RP}{\lambda}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N Ae^{j\alpha_{mn}} (e^{\frac{-j2\pi x_{mn} \text{sen}\theta}{\lambda}}) \quad (2.12)$$

Suponha que se queira direcionar o feixe para um azimute θ_0 qualquer. Percebe-se que se defasarmos de um fator $\frac{j2\pi x_{mn} \text{sen}\theta_0}{\lambda}$ cada um dos elementos mn teremos o máximo valor na direção θ_0 (note que $e^{\frac{j2\pi RP}{\lambda}}$ é constante e independente de mn), já que teríamos somente interferências construtivas nesse azimute. Assim, o diagrama é dado pela equação 2.13.

$$F(\theta, 0) = DAe^{\frac{j2\pi RP}{\lambda}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (e^{\frac{-j2\pi x_{mn}(\text{sen}\theta - \text{sen}\theta_0)}{\lambda}}) \quad (2.13)$$

Neste trabalho, considera-se que os elementos estão igualmente espaçados de uma distância d_x no eixo horizontal e d_z no eixo vertical, conforme demonstrado na figura 2.6. Analisando somente o eixo azimutal, percebe-se que a fase necessária para que se tenha o lóbulo principal em θ_0 é dada por

$$\alpha = \frac{2\pi k_n d_x \text{sen}\theta_0}{\lambda}, \text{ com } -(N-1)/2 \leq k_n \leq (N+1)/2 \quad (2.14)$$

Onde, x_{mn} foi substituído por $k_n d_x$, com $k_n = -(N-1)/2 + (n-1)$.

Realizando a soma mostrada na equação 2.13, levando em conta as considerações acima apresentadas, o resultado nos fornece um diagrama de radiação que segue a função $|sinc|$ (Mailloux 2005). A figura 2.7 mostra um exemplo de diagramas com $\theta_0 = 0^\circ$ e $\theta_0 = -30^\circ$, ambos com $d_x = \lambda/2$. Percebe-se que em $\theta_0 = -30^\circ$ a largura de 3dB é maior, assim como o valor do pico do lóbulo secundário. Esses efeitos serão tratados na próxima subseção.

Um detalhe que ainda não foi tratado, é que como a fase é uma grandeza que se repete em um período de 2π radianos, um arranjo com lóbulo principal apontado para θ_0 pode também ter outro pico apontado em outra direção, o que é chamado de *grating lobes* (Mailloux 2005). As escolhas de d_x e θ_0 estão diretamente ligadas ao surgimento dessas ambiguidades. Analisando a equação 2.13, haverá *grating lobes* quando a fase total for múltiplo de 2π . Logo,

$$\frac{2\pi d_x (\text{sen}\theta - \text{sen}\theta_0)}{\lambda} = 2p\pi \therefore \text{sen}\theta = \frac{p\lambda}{d_x} + \text{sen}\theta_0 \quad (2.15)$$

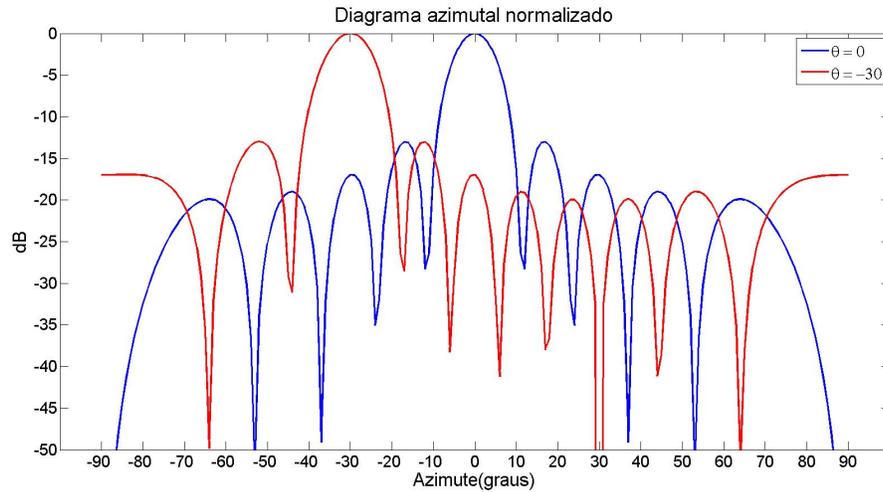


Figura 2.7: Exemplos de diagramas com diferentes direções do lóbulo principal

Com $p \in \mathbb{Z}^*$.

Como $|\text{sen}\theta| \leq 1, \forall\theta$, é possível encontrar um valor para d_x que garante que para um determinado θ_0 não haverá ambiguidades. Para isso, temos que garantir que a segunda parte da igualdade dada em 2.15 seja maior do que 1 ou menor do que -1 , invalidando assim o valor de $\text{sen}\theta$. Com isso, chega-se a uma expressão dada pela equação 2.16

$$d_x \leq \frac{\lambda}{1 + |\text{sen}\theta_0|} \quad (2.16)$$

Da equação 2.16 pode-se inferir que para $d_x \leq \lambda/2$ não haverá ambiguidades independente do valor de θ_0 . A figura 2.8 mostra uma ambiguidade gerada quando $d_x = \lambda$ e $\theta_0 = 60^\circ$. O *grating lobe* acontece em $\theta = -7.7^\circ$, ou seja, quando $\text{sen}\theta = \text{sen}(60^\circ) - 1$.

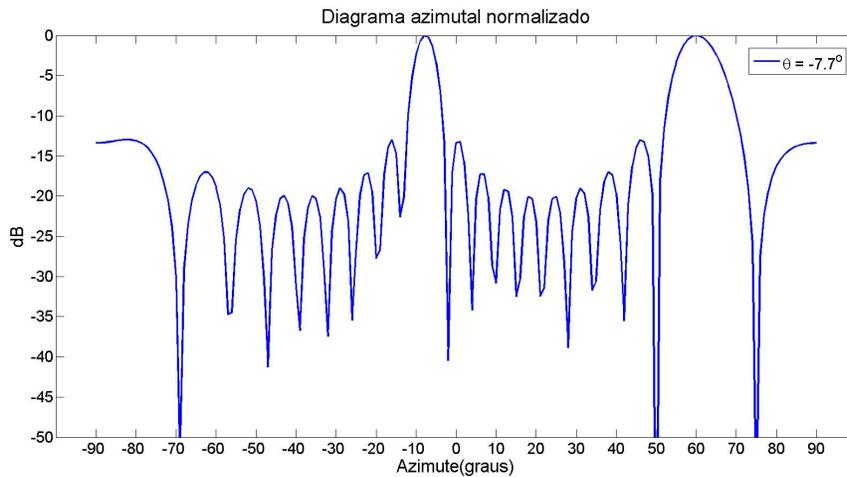


Figura 2.8: Diagrama com *grating lobe*

O valor de dx também possui um limite inferior que deve ser considerado. Essa restrição deve-se às dimensões dos elementos irradiadores do arranjo de antenas, que precisam ser dispostos de tal maneira que não haja sobreposição entre eles.

Para um arranjo planar é necessário considerar a interferência que a fase relativa a elevação causa na fase relativa a azimute quando trata-se de ambiguidades. No entanto, no presente trabalho trataremos somente de arranjos lineares.

Considerando as limitações de d_x e os cálculos desenvolvidos nessa seção, conclui-se que é possível direcionar o feixe principal de um arranjo sem qualquer ambiguidade. Na subseção a seguir, serão tratados fatores que alteram o formato do diagrama e como a mudança em amplitude de cada elemento ativo altera as características do mesmo.

2.2.2 Formato do diagrama

Nessa seção serão tratados os impactos causados na largura de 3dB, nos lóbulos secundários e no ganho do diagrama ao utilizar amplitudes não-uniformes na alimentação de cada um dos elementos ativos da antena, além de mostrar como o direcionamento do feixe para uma distância θ_0 afeta o ganho do feixe principal e a largura de 3dB.

Primeiramente, far-se-á uma análise quanto a largura de 3dB. De (Skolnik 2008), pode-se deduzir que essa largura, contida em um diagrama gerado por uma antena qualquer, é dada pela equação 2.17.

$$\theta_{BW} = \frac{K\lambda}{L} \quad (2.17)$$

Sendo K uma constante conhecida como fator de largura de feixe dependente do tipo de antena e das amplitudes que a alimentam (quando se trata de um arranjo de antenas), L o comprimento da antena (ou do arranjo de antenas) e λ o comprimento de onda no espaço livre da onda eletromagnética emitida.

A função que caracteriza as amplitudes utilizadas em cada elemento é chamada de função janela ou simplesmente janelamento. Existem diversos janelamentos conhecidos na literatura e alguns serão explicitados nesse trabalho. Essas janelas são utilizadas na análise harmônica para reduzir indesejáveis efeitos relacionados ao vazamento espectral, porém cada qual com suas particularidades relacionadas a detecção, resolução, confiança e facilidade de implementação (Harris 1978). A tabela 2.1 fornece os valores de K - determinante para a largura de 3dB do feixe principal (θ_{BW}), conforme a equação 2.17 -, da razão lóbulo primário por lóbulo secundário (SLR) e do fator multiplicativo no ganho do lóbulo principal (G). Observa-se que o fator K é determinante para a largura de 3dB do feixe principal (θ_{BW}), conforme a equação 2.17. As funções que regem essas janelas são apresentadas no anexo A.

Percebe-se que enquanto ganha-se em largura de 3dB (quanto menor mais precisão), perde-se em nível de lóbulo secundário ou ganho de lóbulo primário. Sendo assim, o uso de janelas é bastante prático, sendo usada a que maior se adequa ao projeto em questão. Utilizando-se o *toolbox* de processamento de sinais do *software* Matlab, gerou-se a figura 2.9 que mostra o formato das janelas apresentadas na tabela e o espectro em frequência de cada uma delas.

Tabela 2.1: Características de Janelamentos

EXEMPLOS DE FUNÇÕES JANELAS			
Janela	K	SLR(dB)	G
Uniforme	0.89	-13	1.00
Hamming($\alpha=0.54$)	1.30	-43	0.54
Gaussian($a=3.0$)	1.55	-55	0.43
Blackman($\alpha=0.16$)	1.68	-58	0.42
Dolph-Chebyshev($a=4.0$)	1.65	-80	0.42

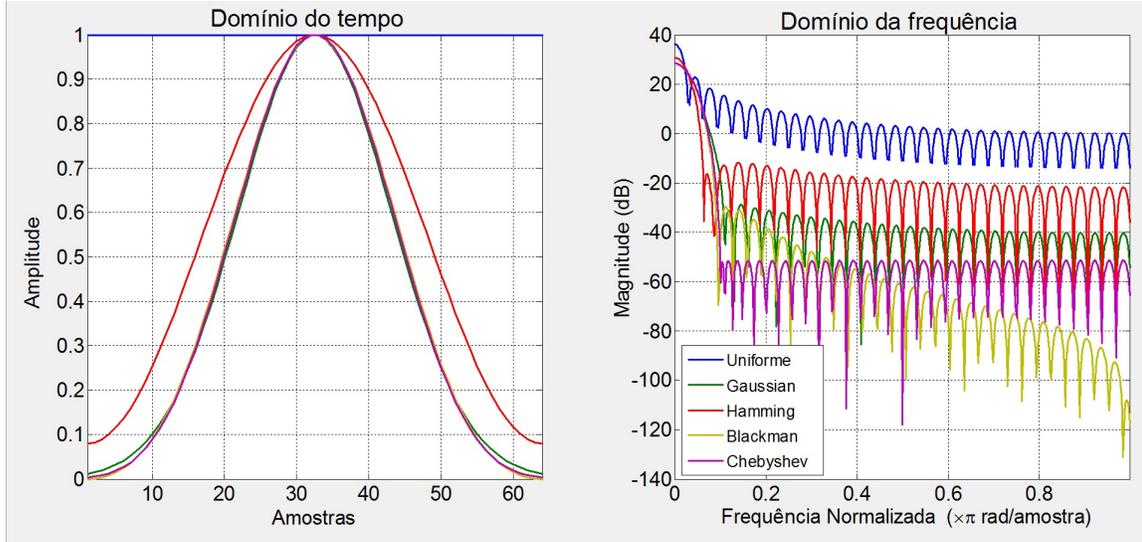


Figura 2.9: Exemplos de janelas e seus resultados no domínio da frequência

Para aplicações onde se usam diferenças de fases lineares nos elementos ativos da antena, o uso de janelamentos é bem eficaz, pois o projetista conhecendo as janelas existentes é possível encontrar uma que atenda aos requisitos de projeto. As janelas de Hamming e de Dolph-Chebyshev (detalhadas no anexo A) são bastante utilizadas na prática pois alcançam um nível baixo para o maior lóbulo secundário pois usa suas descontinuidades espectrais para cancelar esses lóbulos próximos do lóbulo principal. Essa última é interessante pois o projetista limita o valor da SLR e existe um janelamento de Dolph-Chebyshev próprio para alcançar esse valor, garantindo a mínima largura de 3dB.

É importante citar que independente da janela utilizada, com o deslocamento do feixe principal de um ângulo θ há uma perda de ganho e um alargamento da largura de 3dB. Isso se deve ao fato do comprimento da antena ser diminuído virtualmente, como se ela tivesse inclinada em relação ao seu eixo principal e seu comprimento passasse a ser igual a $L' = L \cos \theta$, e consequentemente:

$$G' = G_0 \cos \theta \quad \theta'_{BW} = \frac{K\lambda}{L'} = \frac{K\lambda}{L \cos \theta} \quad (2.18)$$

Porém, existem casos onde janelamentos não podem ser usados, como por exemplo quando

se quer um diagrama com discontinuidades, ou quando se quer um diagrama com determinada forma diferente das respostas típicas dessas funções janelas. Para isso existem outras maneiras de se encontrar as fases e amplitudes que precisam ser utilizadas em cada um dos elementos ativos. Dentre essas maneiras existentes, as que foram usadas no presente trabalho serão estudadas no próximo capítulo.

Técnicas de Otimização

Uma das principais características de um arranjo de antenas é a possibilidade de alimentação individual, em amplitude e fase, dos elementos ativos. Essa propriedade permite realizar uma análise matemática do sistema, possibilitando a criação otimizada do diagrama de radiação gerado pelo arranjo de antenas, pois pode-se considerar cada elemento ativo como uma variável complexa independente. Sendo assim, técnicas de otimização podem ser usadas no sistema Arranjo de Antenas, permitindo o cálculo dos módulos e fases de cada elemento ativo, de modo que o diagrama resultante se aproxime ao máximo de algum diagrama desejado pré especificado.

O estudo de critérios de otimização se faz importante pois, na prática, em determinados casos são necessários diagramas específicos que não seguem formatos padrões já conhecidos. Em outros casos, é necessário que o diagrama respeite determinadas limitações, tais como valores máximos para picos de lóbulos secundários ou valores nulos em pontos, impostos pelo operador, onde se queira evitar transmissão de energia. Nesse capítulo, critérios que podem ser usados nesses casos serão mostrados. Em seguida, uma análise acerca de dois critérios já existentes serão tratados mais detalhadamente e propostas modificações a fim de se adaptarem ao uso em sistemas de radar. Esses critérios escolhidos e adaptados fazem parte da contribuição do presente trabalho.

3.1 Técnicas para gerar diagramas de antena

Na literatura existem diversas técnicas, oriundas de teoria de antenas ou de teoria de projeto de filtros, que podem ser utilizadas na geração de um diagrama de antena. Basicamente, a meta dessas técnicas é fornecer os módulos e fases de cada um dos elementos de antena a fim de gerar um diagrama que seja o mais próximo de um diagrama ideal. Em (Trees 2002), oito técnicas diferentes, que não serão abordadas nesse trabalho, são analisadas: Pesos Espectrais, Matriz de polinômios e transformada Z, Amostragem do diagrama no espaço de número de onda, Largura de feixe mínimo para um nível especificado de lóbulos secundários, Critério de Menor Erro Quadrático Médio, Projeto de filtros usando a teoria de Minimax, Feixes assimétricos e Utilização do critério de Menor Erro Quadrático Médio para direcionamento de nulos. Cada uma dessas técnicas possui um caráter próprio e é utilizada em casos específicos. Além dessas técnicas, pode-se citar o teorema, altamente difundido na literatura, de *Woodward-Lawson* (Meikle 2008), que se baseia na soma de funções do tipo $\text{sinc}(x)$ para gerar um diagrama final desejado, conforme

exposto pelas figuras 3.1 e 3.2.

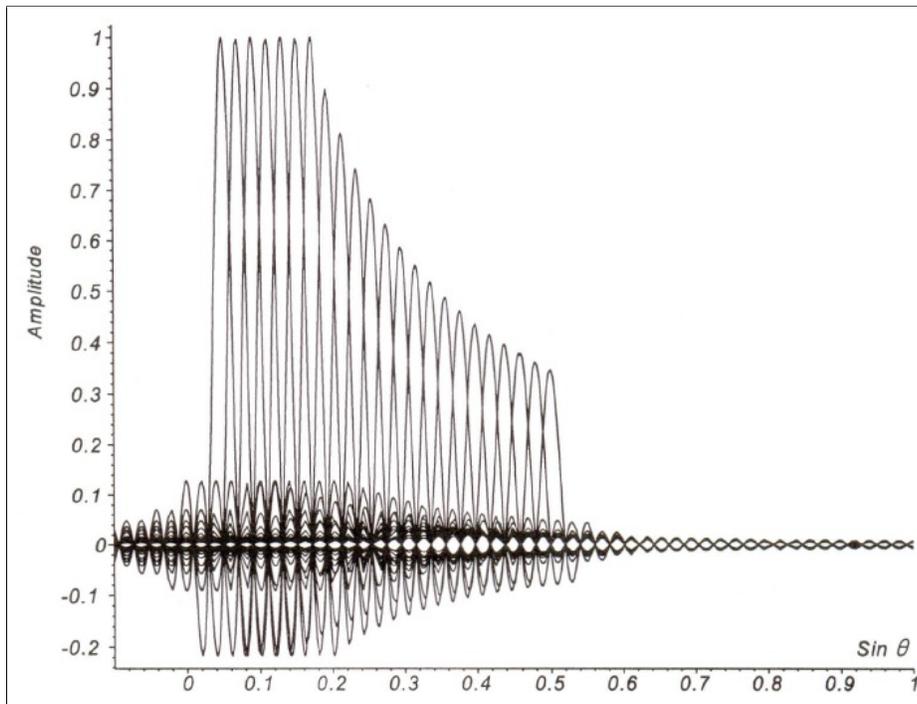


Figura 3.1: Construção do diagrama gerado pela soma de funções do tipo $\text{sinc}(x)$ espaçadas de $\lambda/2$ (Meikle 2008)

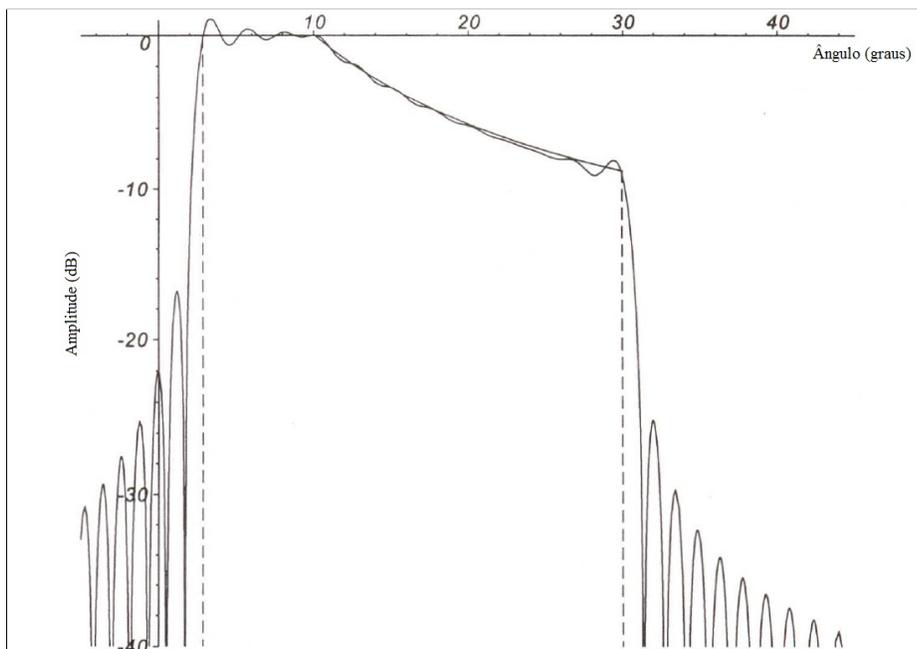


Figura 3.2: Diagrama gerado pelo teorema de *Woodward-Lawson*, em linha cheia, confrontado com o diagrama desejado, em linha tracejada (Meikle 2008)

Neste trabalho serão particularmente abordados somente dois critérios que garantem a criação otimizada de qualquer formato de diagrama de radiação: Critério de Mínimos Quadrados em Amplitude, que foi primeiramente citado em (Kassakian 2006) e adaptado para sistemas de radar no presente trabalho e o uso de Desigualdades Matriciais Lineares (*Linear Matrix Inequalities* - LMIs), abordado em (Qu, Liao, Zhu & Liu 2008), e modificadas no presente trabalho.

Todos os métodos citados têm por finalidade encontrar o vetor ponderação w_n que é o responsável por modificar o diagrama de radiação gerado pelo arranjo de antenas. Para melhor visualização, a equação 2.11 que fornece a relação entre o diagrama gerado e o vetor ponderações é repetida a seguir.

$$F(\theta, 0) = e^{\frac{j2\pi R_P}{\lambda}} D_{AZ}(\theta) D_{EL}(0) \cdot \sum_{m=1}^M w_m \sum_{n=1}^N w_n e^{\frac{-j2\pi x_{mn} \sin \theta}{\lambda}}$$

Como mostrado no capítulo 2, $x_{mn} = k_n d_x$, com $k_n = -(N-1)/2 + (n-1)$ e $1 \leq n \leq N$.

Substituindo x_{mn} na equação acima, e considerando somente uma linha de arranjo sem ponderação em elevação, ou seja, $M = 1$, $w_m = 1$ e $D_{EL}(0) = 1$, chega-se na equação 3.1.

$$F(\theta, 0) = e^{\frac{j2\pi R_P}{\lambda}} D_{AZ}(\theta) \cdot \sum_{n=1}^N w_n e^{\frac{-j2\pi k_n d_x \sin \theta}{\lambda}} \quad (3.1)$$

As considerações feitas indicam que o tratamento a partir de agora se dará em um arranjo de antenas linear.

Como a fase imposta pelo fator $e^{\frac{j2\pi R_P}{\lambda}}$ é igual e constante para qualquer elemento ativo, essa parcela pode ser negligenciada. Sendo assim, reorganizando a equação 3.1, ela pode ser escrita conforme mostrado na equação 3.2, sendo $w = w_n$.

$$F(\theta, 0) = \sum_{n=1}^N D_{AZ}(\theta) e^{\frac{-j2\pi k_n d_x \sin \theta}{\lambda}} \cdot w \quad (3.2)$$

Fazendo $\mathbf{A} = D_{AZ}(\theta) e^{\frac{-j2\pi k_n d_x \sin \theta}{\lambda}}$, percebe-se que o diagrama $F(\theta, 0)$ indicado na equação 3.2 é dado pelo produto da matriz \mathbf{A} , onde as linhas são dadas pela discretização angular fornecida pelo diagrama e as colunas pela quantidade de elementos ativos da antena, pelo vetor w , sendo:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} D_{AZ}(\theta_{min}) e^{\frac{-j2\pi k_1 d_x \sin(\theta_{min})}{\lambda}} & \cdots & D_{AZ}(\theta_{min}) e^{\frac{-j2\pi k_N d_x \sin(\theta_{min})}{\lambda}} \\ D_{AZ}(\theta_{min+1}) e^{\frac{-j2\pi k_1 d_x \sin(\theta_{min+1})}{\lambda}} & \cdots & D_{AZ}(\theta_{min+1}) e^{\frac{-j2\pi k_N d_x \sin(\theta_{min+1})}{\lambda}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{AZ}(\theta_{max}) e^{\frac{-j2\pi k_1 d_x \sin(\theta_{max})}{\lambda}} & \cdots & D_{AZ}(\theta_{max}) e^{\frac{-j2\pi k_N d_x \sin(\theta_{max})}{\lambda}} \end{pmatrix}$$

E,

$$w = \begin{pmatrix} A_1 e^{j\alpha_1} \\ A_2 e^{j\alpha_2} \\ \vdots \\ A_N e^{j\alpha_N} \end{pmatrix}, \text{ com } A_n \in \mathfrak{R}_+ \text{ e } -180^\circ \leq \alpha_n \leq 180^\circ. \quad (3.3)$$

Onde:

- n : É o número do elemento, com $1 \leq n \leq N$
- $k_n = -(N - 1)/2 + (n - 1)$
- d_x : Distância entre os elementos da mesma linha em metros
- θ : Variação angular em azimute em radianos, onde $\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max}$
- λ : Comprimento de onda em metros
- N : Número de elementos em uma linha do arranjo
- $D_{AZ}(\theta)$: Diagrama de radiação em cada ângulo θ do elemento unitário do arranjo de antenas em volts por metro.

Todos os métodos citados têm por finalidade encontrar o vetor w que multiplicado pela matriz \mathbf{A} forneça o diagrama B desejado pelo operador. Considerando a matriz \mathbf{A} dada na equação 3.3, tem-se que a relação entre essa matriz, o vetor w e o diagrama gerado F , e o erro médio quadrático entre os diagramas desejado e gerado, B e F respectivamente, são dados pela equação 3.4.

$$F = \mathbf{A}w \longrightarrow \epsilon = \sum_{\theta=\theta_{min}}^{\theta_{max}} |B_{\theta} - F_{\theta}|^2 \cdot \frac{\Delta\theta}{(\theta_{max} - \theta_{min})} \quad (3.4)$$

Onde B_{θ} e F_{θ} são os elementos do vetor F e B e $\Delta\theta$ é a discretização em azimute.

Para melhor descrever os métodos utilizados no presente trabalho, suas explicações foram divididas em seções, sendo que a primeira trata do critério de Mínimos Quadrados convencional, o que é necessário para o entendimento do método de Mínimos Quadrados em Amplitude, o qual é abordado na seção posterior. A última seção trata do critério que se baseia na resolução de Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs).

3.1.1 Critério dos Mínimos Quadrados

Em alguns casos, o projetista já possui um diagrama padrão a ser seguido por sua antena, porém não sabe como deve alimentar cada um dos seus elementos ativos para que seja gerado tal diagrama. O método de Mínimos Quadrados é um método linear que se adapta bem a esse tipo de problema, pois além de ser um algoritmo de fácil implementação, rápido e altamente difundido na literatura, ele é do tipo convexo e garante o mínimo erro quadrático médio. Seja w o vetor ponderações contendo o módulo e fase de cada elemento ativo da antena e B o diagrama de antena proposto pelo projetista. O objetivo é minimizar o erro entre o diagrama gerado utilizando o respectivo vetor ponderação e o diagrama proposto pelo projetista.

Sendo B o vetor contendo a forma do diagrama da antena em cada ângulo e \mathbf{A} a matriz que modela o meio físico, ou seja, a componente em fase e amplitude imposta pelo meio físico a cada elemento ativo, o menor erro quadrático médio é encontrado minimizando a função custo mostrada na equação 3.5 (Kay 1993).

$$J(w) = \sum_{\theta=\theta_{min}}^{\theta_{max}} |B_{\theta} - F_{\theta}|^2$$

$$J(w) = \|B - \mathbf{A}w\|^2 = (B - \mathbf{A}w)^T (B - \mathbf{A}w) \quad (3.5)$$

Como o objetivo é minimizar a função custo $J(w)$, deve-se provar que a segunda derivada em função de w é sempre positiva e a partir daí encontrar o valor de w que zera a primeira derivada. Assim, reescrevendo $J(w)$ temos que

$$J(w) = B^T B - B^T \mathbf{A}w - w^T \mathbf{A}^T B + w^T \mathbf{A}^T \mathbf{A}w = B^T B - 2B^T \mathbf{A}w + w^T \mathbf{A}^T \mathbf{A}w \quad (3.6)$$

Calculando as duas primeiras derivadas, tem-se que

$$\frac{\partial J}{\partial w} = -2\mathbf{A}^T B + 2\mathbf{A}^T \mathbf{A}w \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial^2 J}{\partial w^2} = 2\mathbf{A}^T \mathbf{A} \quad (3.8)$$

Percebe-se que a segunda derivada em relação a w é sempre positiva e que a partir da primeira derivada pode-se encontrar o vetor w que garante o menor erro médio quadrático. Esse valor estimado para o vetor ponderação é dado por \hat{w} .

$$\hat{w} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T B \quad (3.9)$$

Uma extensão para o problema dos mínimos quadrados linear é o chamado mínimos quadrados ponderado (Kay 1993). Essa ponderação é criada por uma matriz peso que enfatiza pontos mais cruciais, ou seja, tenta-se diminuir o erro entre pontos mais importantes do diagrama. Dessa forma, a função custo dada em 3.5 é dada por

$$J(w) = (B - \mathbf{A}w)^T \mathbf{W} (B - \mathbf{A}w) \quad (3.10)$$

Sendo a matriz \mathbf{W} uma matriz $M \times M$ definida positiva, onde M é o número de elementos do vetor B . Utilizando-se essa função custo, a forma geral da estimação de w é dada por 3.11

$$\hat{w} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} B \quad (3.11)$$

Um problema existente nessas duas técnicas abordadas é que como trata-se de variáveis complexas, o erro quadrático médio leva em conta tanto a fase quanto a amplitude dos valores do diagrama passado como padrão. Como só estamos interessados na energia associada a cada ângulo, as fases pontuais desse diagrama são irrelevantes. A figura 3.3 mostra o resultado obtido considerando uma função factível em módulo e fase e a figura 3.4 uma função factível somente considerando o módulo e mantendo uma fase constante em todos os pontos. A primeira possui um erro de potência médio¹, em dB, igual a -106.72dB e a segunda de -32.25dB . Analisando as figuras 3.3 e 3.4 e seus erros associados, percebe-se, assim, o problema existente em não considerar as fases pontuais do diagrama.

¹Erro de potência médio é dado por: $10 \log\left(\frac{EQM}{P_{max}}\right)$, onde EQM é o erro quadrático médio e P_{max} é o valor da potência máxima do diagrama ideal

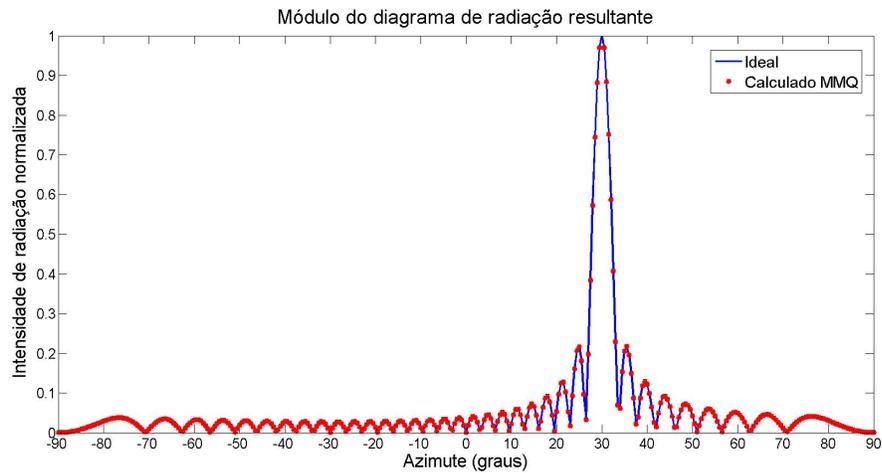


Figura 3.3: Diagrama gerado através do critério de Mínimos Quadrados com módulo e fase factíveis

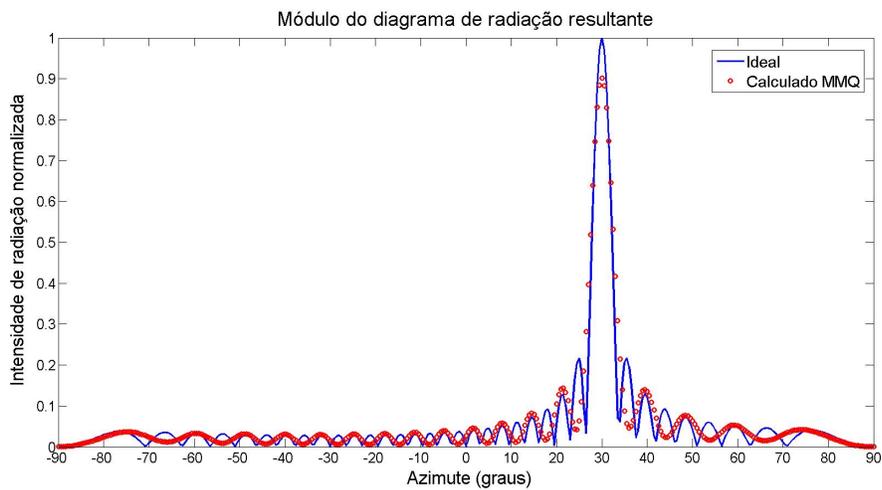


Figura 3.4: Diagrama gerado através do critério de Mínimos Quadrados com módulo factível

Dessa forma, para encontrarmos um resultado mais coerente à nossa aplicação, deve-se considerar somente o erro do módulo, deixando a fase livre. Esse tipo de análise é uma variação do critério de mínimos quadrados e é chamado de Mínimos Quadrados em Amplitude.

3.2 Critério dos Mínimos Quadrados em Amplitude

O critério dos Mínimos Quadrados em Amplitude visa encontrar o menor erro quadrático médio considerando somente o erro entre os módulos. Sendo assim, a função custo mostrada na

equação 3.5 precisa ser adaptada para a função custo dada pela equação 3.12.

$$\min_{w \in \mathbb{C}} \sum_{i=1}^M (|A_i w| - |B_i|)^2 \quad (3.12)$$

Com A sendo dada na equação 3.3 e A_i a i -ésima linha dessa matriz, B o diagrama padrão, w as ponderações de cada elemento (incógnita) e M o número de linhas existentes na matriz A (igual ao número de elementos do vetor B).

Porém, para resolver esse problema temos que adaptá-lo para o modelo de um mínimos quadrados padrão, sem o módulo no fator $A_i w$, da forma (Kassakian 2006):

$$\min_{w \in \mathbb{C}} \sum_{i=1}^M (|A_i w| - |B_i|)^2 \equiv \min_{w, z \in \mathbb{C}} \sum_{i=1}^n |A_i w - b_i z_i|^2 \quad (3.13)$$

Onde $|z_i|$ possui módulo unitário e fase igual a de $A_i w$ e $b_i = |B_i|$.

Para se chegar na forma apresentada acima, utiliza-se dois teoremas que serão demonstrados a seguir.

Teorema 1. *Dado $y \in \mathbb{C}$, seu módulo pode ser expresso por $|y| = \max_{|z|=1} \Re\{y\bar{z}\}$, $z \in \mathbb{C}$*

Demonstração. Seja $y = r_y \text{cis} \theta_y$ e $z = r_z \text{cis} \theta_z$, com $|z| = 1$ e $\text{cis} \theta = \cos \theta + i \sin \theta$.

$$\bar{z} = r_z \text{cis}(-\theta_z)$$

$$y\bar{z} = r_y r_z \text{cis}(\theta_y - \theta_z)$$

Como $|z| = 1$:

$$y\bar{z} = r_y \text{cis}(\theta_y - \theta_z) \Rightarrow \Re\{y\bar{z}\} = r_y \cos(\theta_y - \theta_z)$$

Para que $\Re\{y\bar{z}\}$ seja máximo, $\cos(\theta_y - \theta_z) = 1$. Assim:

$$\theta_y - \theta_z = 2k\pi \Rightarrow \bar{z} = \text{cis}(2k\pi - \theta_y), k \in \mathbb{Z}$$

$$\text{Logo: } \bar{z} = \frac{\bar{y}}{|y|} \Rightarrow |y| = \max_{|z|=1} \Re\{y\bar{z}\}$$

□

Teorema 2. *Dado $y \in \mathbb{C}$ e $a \in \mathbb{R}$, $a \geq 0$, tem-se que: $(|y| - a)^2 = \min_{|z|=1} |y - az|^2$*

Demonstração. $(|y| - a)^2 = |y|^2 - 2a|y| + a^2$

Pelo Teorema 1:

$$(|y| - a)^2 = |y|^2 - 2a \max_{|z|=1} \Re\{y\bar{z}\} + a^2$$

$$(|y| - a)^2 = |y|^2 + a^2 - \max_{|z|=1} \Re\{2ay\bar{z}\}$$

$$(|y| - a)^2 = \min_{|z|=1} (|y|^2 + a^2 - \Re\{2ay\bar{z}\})$$

Desenvolvendo o lado direito do Teorema 2:

$$|y - az|^2 = (\Re\{y\} - a\Re\{z\})^2 + (\Im\{y\} - a\Im\{z\})^2$$

$$|y - az|^2 = \Re\{y\}^2 - 2a\Re\{z\}\Re\{y\} + a^2\Re\{z\}^2 + \Im\{y\}^2 - 2a\Im\{z\}\Im\{y\} + a^2\Im\{z\}^2$$

$$|y - az|^2 = (\Re\{y\}^2 + \Im\{y\}^2) + a^2(\Re\{z\}^2 + \Im\{z\}^2) - 2a(\Re\{z\}\Re\{y\} + \Im\{z\}\Im\{y\})$$

$$|y - az|^2 = |y|^2 + a^2 - 2a\Re\{y\bar{z}\}$$

Como:

$$(|y| - a)^2 = \min_{|z|=1} (|y|^2 + a^2 - \Re\{2ay\bar{z}\})$$

Então:

$$(|y| - a)^2 = \min_{|z|=1} |y - az|^2 \quad \square$$

Utilizando esses dois teoremas apresentados acima, pode-se escrever o problema inicial como mostrado na equação 3.13. Uma das formas de resolver esse tipo de problema é usar, de forma recursiva, uma mudança de variável (Kassakian 2006) adotando os seguintes passos:

- Passo 1: Escolher um valor de tolerância $\epsilon > 0$ para o erro dado pela função custo e um número máximo de iterações N_{max} .
- Passo 2: Escolher um valor inicial aleatório para o vetor w .
- Passo 3: Para todo i , escolher z_i como um complexo de módulo unitário e fase igual a $A_i w$ ($z_i = \frac{A_i w}{|A_i w|}$).
- Passo 4: Fixar z e encontrar o novo valor de w que seja solução da análise dos mínimos quadrados dado por $\hat{w} = (A^T A)^{-1} A^T F$
- Passo 5: Repetir os passos 3 e 4 até a função objetivo atingir um erro menor do que ϵ ou atingir o valor de N_{max} iterações.

As figuras 3.5 e 3.6 mostram os resultados obtidos considerando as mesmas funções utilizadas nas figuras 3.3 e 3.4. Os erros de potência médios associados a essas figuras são idênticos nos dois casos e iguais a -101.06dB .

Já a figura 3.7, mostra os resultados alcançados usando os dois métodos citados, considerando como diagrama ideal a função criada a partir do resultado fornecido por um arranjo linear de 20 elementos, distantes entre si de meio comprimento de onda, direcionados a 20° e alimentados por um janelamento de *Hamming*. O lóbulo principal é mantido e os outros valores são anulados. Os erros de potência, em dB, são iguais a -27.86dB para o caso do Mínimos Quadrados e -58.92dB para o caso do Mínimos Quadrados em Amplitude.

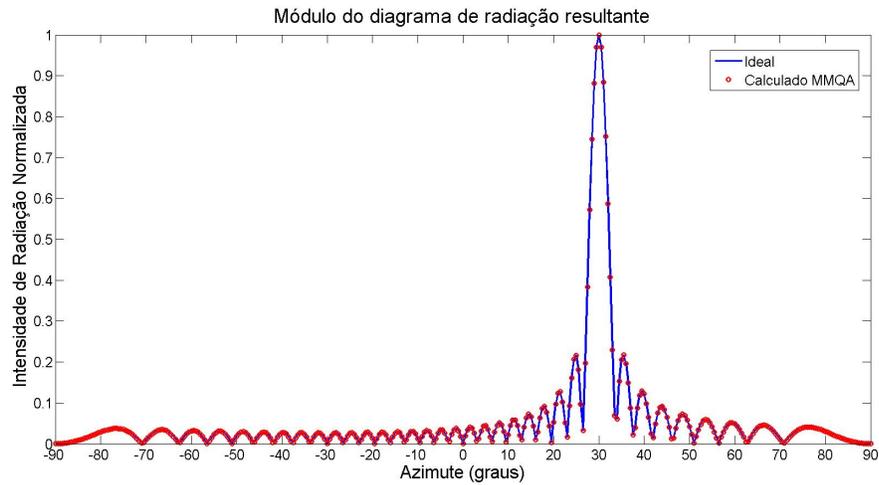


Figura 3.5: Diagrama gerado através do critério de Mínimos Quadrados em Amplitude com módulo e fase factíveis

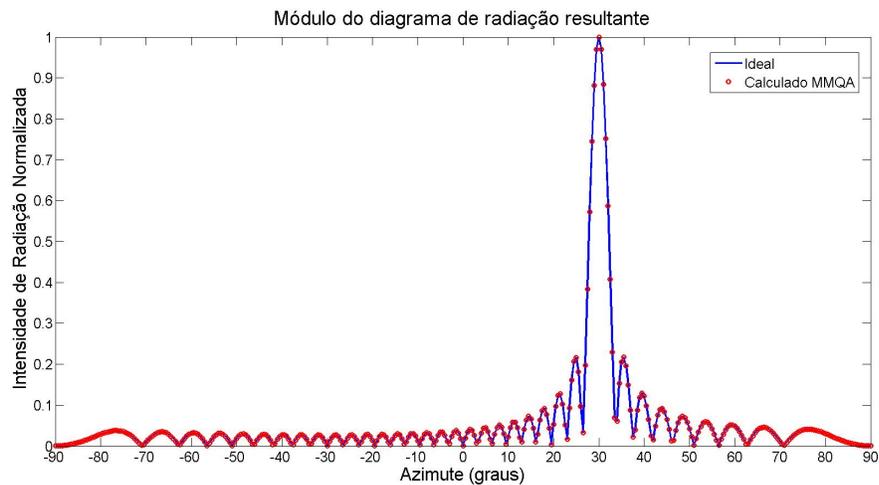


Figura 3.6: Diagrama gerado através do critério de Mínimos Quadrados em Amplitude com módulo factível

Uma outra análise feita foi a comparação entre um diagrama gerado através do método mostrado e um criado a partir do teorema de *Woodward-Lawson* mencionado no início desse capítulo. No exemplo mostrado na figura 3.8, é considerado como diagrama ideal uma função que possui ganho máximo entre os ângulos 0° e 10° , segue o decaimento de uma função $\text{cosec}^2(x)$ de 10° até 35° e níveis de -30dB fora desses intervalos. Essa curva é bem conhecida como diagrama de radiação em elevação para radares de vigilância aérea, pois garante uma máxima potência no horizonte e em ângulos pequenos e decai a medida que o ângulo em elevação aumenta (Meikle 2008). No respectivo exemplo, utiliza-se um arranjo linear de antenas, contendo 24 elementos ativos distantes entre eles de meio comprimento de onda.

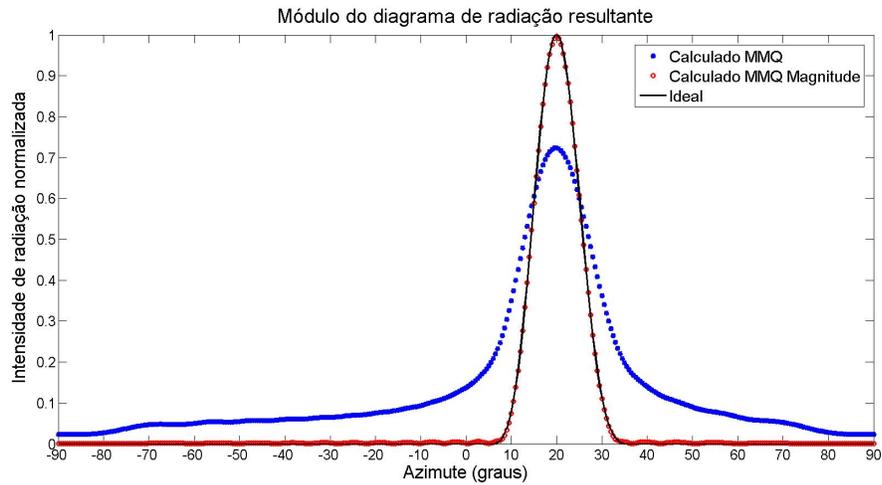


Figura 3.7: Diagramas gerados através dos dois critérios de Mínimos Quadrados

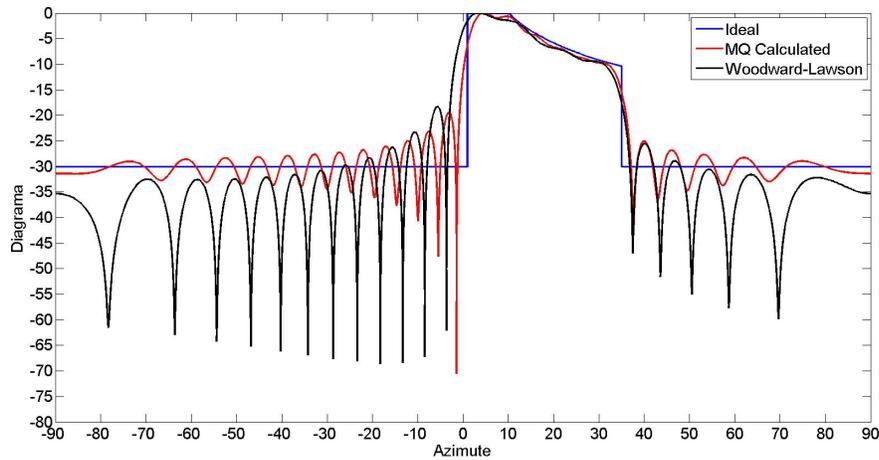


Figura 3.8: Comparação entre diagramas gerados através do teorema de *Woodward-Lawson* e do Critério de Mínimos Quadrados em Amplitude

Percebe-se pelas figuras e pelos erros associados nos exemplos fornecidos que o critério de Mínimos Quadrados em Amplitude responde com melhores resultados. Além disso, as figuras 3.7 e 3.8 mostram que o método abrange diversos tipos de aplicações. No entanto, até agora, estamos considerando que o projetista já possui em mãos a função matemática que caracteriza o diagrama desejado. Quando não é possível se ter essa função, mas somente as limitações que precisam existir em tal diagrama, é preciso fazer uso de outro método de otimização. A próxima seção trata de um outro método que garante a criação de um diagrama quando se fornece ao algoritmo somente as limitações desejadas.

3.3 Utilização de Desigualdades Matriciais Lineares

Em situações onde não se busca máximos ou mínimos, mas sim garantia de transposição de limites pré estabelecidos, existem diversos métodos na literatura que podem ser utilizados, como citados no início desse capítulo. Porém, a maioria desses métodos otimiza somente um único parâmetro escolhido pelo projetista, o que não é interessante para o caso em questão. Atualmente, alguns métodos inteligentes de otimização, tais como redes neurais ((Southall, Simmers & O'Donnell 1995),(Zooghy, Christodoulou & Georgiopoulos 1998)) e algoritmos genéticos ((Yan & Lu 1997),(Rahmat-Samii & Michielssen 1999)) vem sendo usados em síntese de arranjo de antenas. No entanto, esses algoritmos necessitam de um bom domínio de conhecimento, visto que a escolha de parâmetros iniciais é de suma importância para o desenvolvimento do método e de uma alta complexidade computacional, aumentando o tempo de execução e consequentemente, não sendo uma escolha adequada para ser utilizada em tempo real. Sendo assim, uma boa solução encontrada é utilizar o conceito de Desigualdades Matriciais Lineares (LMIs) combinado com um critério de otimização convexa.

Desigualdades Matriciais Lineares surgiram como uma ferramenta poderosa para resolução de diversos sistemas. Esse tipo de análise data de mais de 100 anos, quando em 1890, Lyapunov publicou a sua teoria, onde mostrou que a equação diferencial dada pela equação 3.14 é estável se e somente se existir uma matriz definida positiva P tal que $A^T P + PA < 0$. Essas duas exigências são conhecidas como Desigualdade de Lyapunov em P , a qual é uma forma particular de LMI (Boyd, El Ghaoul, Feron & Balakrishnan 1987).

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) \quad (3.14)$$

Algumas décadas depois, em 1940, pesquisadores soviéticos aplicaram os métodos de Lyapunov para alguns problemas práticos específicos de engenharia de controle, nos quais os critérios de estabilidade eram dados por desigualdades matriciais. Dessa forma demonstraram que as desigualdades matriciais encontradas por Lyapunov tinham uma aplicação prática, o que motivou o estudo nessa área. A partir daí alguns estudos foram desenvolvidos no intuito de resolver essas desigualdades, e assim, durante a década de 1960, pesquisadores como Yakubovich, Popov, Kalman, entre outros, publicaram artigos propondo métodos e soluções para o cálculo desses tipos de desigualdades. Assim, durante a década de 70, pesquisadores chegaram a uma conclusão que garante uma das vantagens do uso de Desigualdades Matriciais Lineares. Segundo Willems (Willems 1971), pode se dizer que

LMIs que surgem no sistema e teoria de controle podem ser formuladas como problemas de otimização convexas, que são passíveis de serem solucionadas por meio computacional

Atualmente, esse método é bastante conhecido em teoria de controle e automação, processamento de sinais e sistemas de identificação.

Nesse trabalho, o intuito é utilizar esse tipo de algoritmo para diminuir a energia associada a determinados pontos do cenário, onde por exemplo exista um forte *clutter* ou interferência, ou até mesmo um vetor aéreo muito próximo do sistema de radar que esteja interferindo no sinal refletido de outro que seja de maior interesse, limitar a energia dos lóbulos secundários

Radars cognitivos multifuncionais

Os recentes estudos na área de radar estão voltados para radares do tipo cognitivo, os quais podem ou não desempenhar multifunções. O presente trabalho enfatiza radares cognitivos que desempenham multifunções, visto que é o caso mais completo. Segundo (Ferreira 2004), cognição significa faculdade, ato ou ação de conhecer; aquisição de um conhecimento. Em sistemas de radar, isso significa que o sistema, conhecendo o cenário no qual está inserido, altera suas características no processamento de sinais, formas de onda e atribuições de funções no intuito de otimizar seus recursos no desempenho de determinada tarefa. Analogicamente, é possível criar uma relação entre atributos cognitivos biológicos e arquitetura de sistemas de radares cognitivos, conforme mostrado na tabela 4.1 (Guerci 2013).

RELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES COGNITIVAS BIOLÓGICAS E COGNITIVAS EM SISTEMAS DE RADAR	
Propriedades Cognitivas Biológicas	Cognição em Sistemas de Radar
Percepção	Sensores
Pensamento, Raciocínio, Julgamento, Resolução de problemas	Sistemas especialistas, Raciocínio baseado em regras, Algoritmos adaptativos e Computação
Lembrança	Memória e banco de dados

Tabela 4.1: Relação entre sistemas cognitivos biológicos e sistemas cognitivos de RADAR

Analisando a tabela 4.1, percebe-se que primeiramente o sistema, com o uso de sensores, faz um levantamento de todo o cenário no qual está situado, o que define a percepção. A partir dessas informações, o sistema utiliza-se de métodos matemáticos e computacionais para decidir qual ou quais tarefas serão realizadas naquele instante, ordená-las em ordem de realização e alterar de forma adaptativa o processamento do sinal, as formas de onda e a potência utilizados em cada uma dessas tarefas. Essas parcelas estão relacionadas ao pensamento, julgamento e decisão. Por fim, o sistema precisa de uma memória para armazenar as tarefas realizadas e o tempo que cada uma delas necessitou. Esse ciclo se repete enquanto o sistema estiver em funcionamento.

De forma resumida, para a operação de um radar cognitivo ser bem sucedida é necessário que o sistema contenha três características essenciais: armazenamento das informações obtidas

pelos sensores, comunicação, não necessariamente direta, entre os receptores e os transmissores no intuito de facilitar o controle inteligente e possibilidade de transmissão adaptativa conforme o ambiente no qual o sistema está inserido. Considerando essas três características, uma possível arquitetura representando o ciclo necessário para tais realizações é mostrada na figura 4.1.

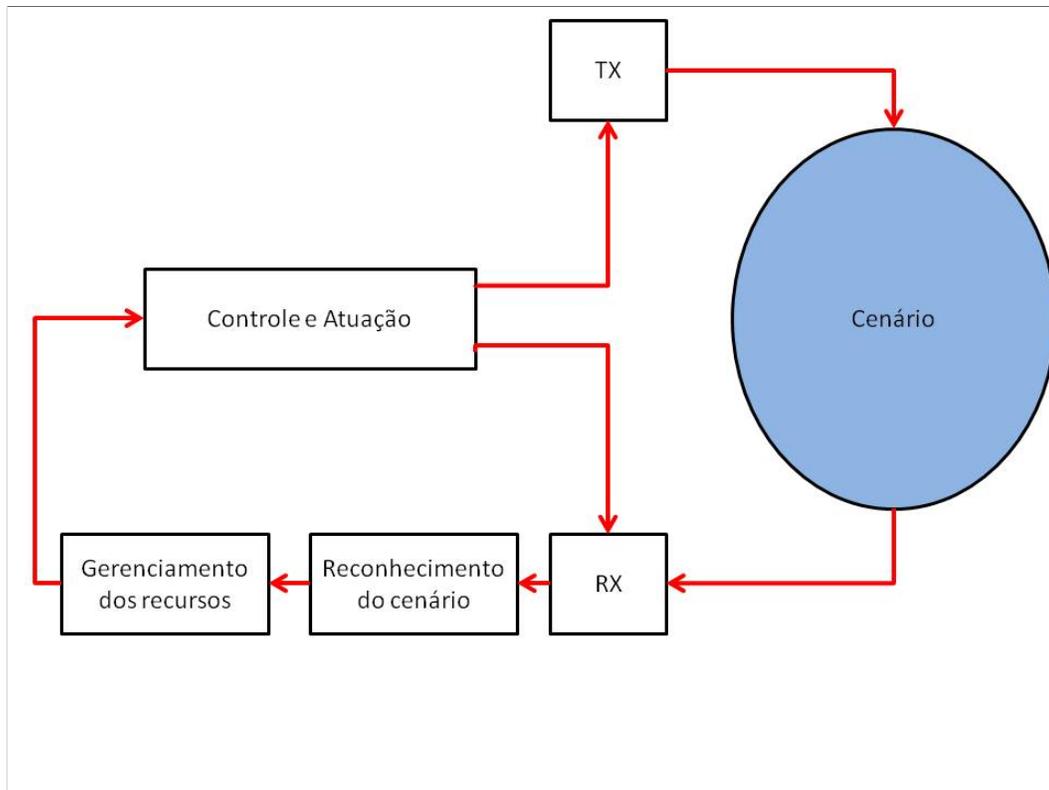


Figura 4.1: Ciclo básico de sistemas de radares cognitivos

Onde:

- TX e RX - São respectivamente os transmissores e receptores do sistema. Eles são compostos por sistemas de rádio-frequência e elementos de antenas (o caso de arranjo de antenas é mais interessante, porém não necessariamente é esse tipo de antena). Recebem todas as características da forma de onda dos sinais que serão emitidos, tais como modulação utilizada, frequência da portadora, frequência de repetição de pulsos (PRF) e largura de pulso, e também recebem as ponderações, em amplitude e fase, discutidas nos capítulos 2 e 3, fornecidas pelo bloco *Controle e Atuação*, de cada elemento de antena necessárias para direcionar os feixes nos ângulos sólidos de interesse.
- Reconhecimento do Cenário - Esse bloco é responsável por interpretar os sinais que chegam ao receptor e armazenar as informações provenientes do cenário no qual está inserido todo o sistema. Essas informações são dadas pelo número de vetores aéreos, classificação e identificação desses vetores quanto a sua intenção (amigos, inimigos e desconhecidos), e quanto ao seu tipo (asa rotativa, asa fixa, veículo aéreo não tripulado...), suas características cinemáticas, reconhecimento geográfico e de edificações (posicionamento dos *clutters*)

e interferências intencionais ou não do meio, esses últimos mostrados na figura 4.2. A cada vigilância realizada esse conjunto de dados é atualizado. Toda a parte de processamento de sinais do radar cognitivo está inserida nesse bloco.

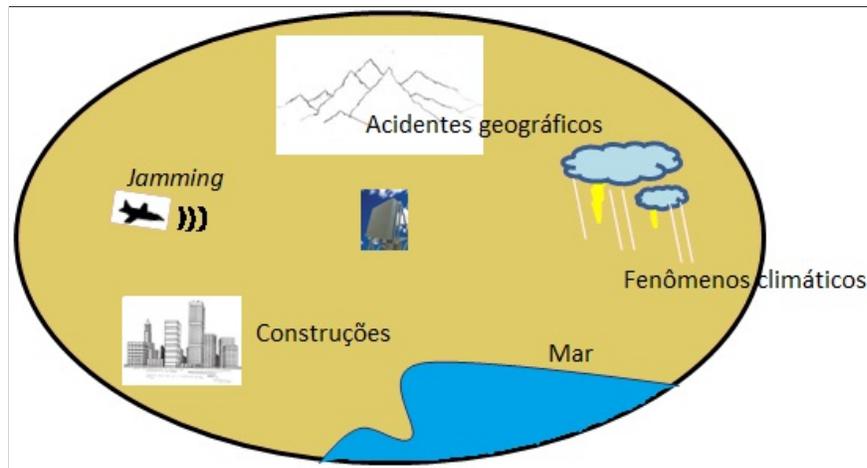


Figura 4.2: *Clutters* e interferências existentes no cenário

- Gerenciamento dos recursos - Este é o bloco em que o processamento de mais alto nível é desenvolvido. Ele consiste em determinar as prioridades e a ordem de cada tarefa a ser realizada pelo sistema, sendo elas basicamente divididas em três tipos: rastreamento, vigilância e busca, conforme detalhadas na próxima seção. Sua entrada é dada pelas informações obtidas pelo bloco *Reconhecimento do Cenário*. Um banco de dados contendo as características cinemáticas de cada vetor aéreo, suas identificações (tipo de aeronave, código IFF conhecido ou não) e, em alguns sistemas com recursos mais avançados, suas respectivas seções reta radar é recebido por esse bloco. De maneira geral, de posse desses dados o *Gerenciamento de recursos* utiliza algoritmos específicos para ordenar e priorizar as tarefas que serão realizadas. A partir desse ordenamento, esse bloco também é responsável por definir as características da forma de onda que será utilizada em cada atividade, assim como o tempo que o sistema gastará em cada uma delas. Maiores detalhes sobre esse bloco são apresentados na próxima seção.
- Controle e Atuação - Após a definição do ordenamento das atividades que devem ser realizadas pelo sistema, é necessário que haja um dispositivo (ou dispositivos) capaz de transformar as informações de mais alto nível geradas pelo bloco *Gerenciamento dos recursos* em dados que possam ser entendidos pelo *hardware*, a fim de acionar da forma solicitada e correta os dispositivos de transmissão e recepção. O responsável por essa ligação é o bloco de controle e atuação. Dado o que se deve fazer, o *Controle e Atuação* passa as características de RF para o *hardware* e as ponderações para os elementos de antena, tanto para o transmissor quanto para o receptor, além de limitar o tempo gasto em cada atividade. É importante citar que o operador tem total controle sobre a atividade que será realizada e por quanto tempo. Fazendo uma analogia ao sistema de tráfego terrestre, o guarda de trânsito tem sempre prioridade perante ao semáforo.

No presente trabalho, o foco está nas ponderações enviadas para os módulos TX e RX e na apresentação de algoritmos utilizados no gerenciamento de recursos a fim de agendar e priorizar as tarefas. Sendo assim, os módulos *Controle e Atuação* e *Reconhecimento do Cenário* não serão explorados nesse capítulo.

4.1 Gerenciamento dos recursos do radar

Com base nos dados coletados do cenário no qual está inserido o sistema de radar, os radares cognitivos multifuncionais são capazes de desempenhar diversas tarefas, sendo essas simultâneas ou não, fazendo uso de um arranjo de antenas, como demonstrado na figura 4.3. Para tal, é necessário que haja um subsistema responsável por definir quais tarefas serão realizadas, como se dará as formas de onda para cada uma delas, quais recursos e quanto de cada um deles serão utilizados, quanto tempo será gasto para realizá-la e quando será realizada novamente. Essas tarefas podem ser divididas de diversas formas, dependendo do nível de classificação, porém todas as formas possuem tarefas baseadas em vigilância, busca e rastreamento. Para exemplificar, essa divisão pode ser feita em cinco tipos de tarefas: vigilância, busca, rastreamento, guiamento de armas e comunicação, onde as duas últimas não deixam de ser uma forma de rastreamento.

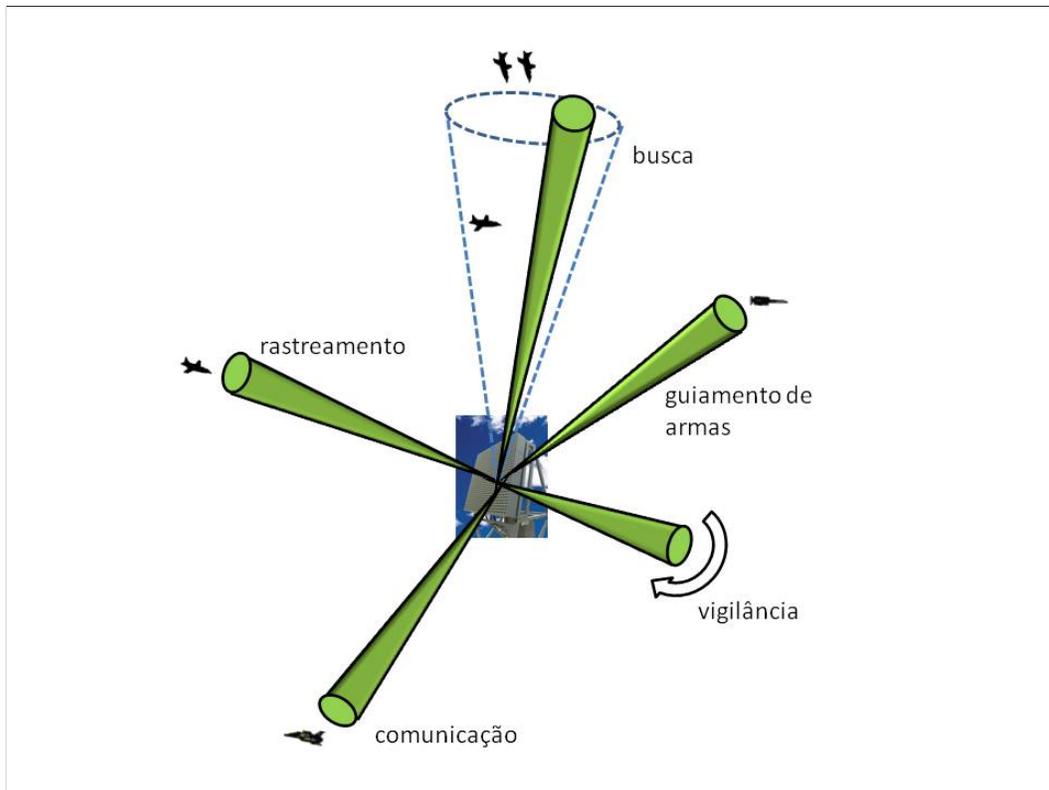


Figura 4.3: Tarefas realizadas por um radar multifuncional

4.1.1 Vigilância

Segundo o Manual de Campanha C44-1 de 2001, do Estado Maior do Exército Brasileiro, entende-se por Radar de Vigilância, o radar que tem a finalidade de detectar e identificar qualquer incursão que ingresse no espaço aéreo sob a responsabilidade de um centro de controle, de modo que este possa fornecer o alerta com a devida antecedência.

A função vigilância é responsável por atualizar o cenário no qual o sistema se encontra, fazendo um levantamento se há ou não novos vetores aéreos sobrevoando o espaço aéreo vigiado pelo radar e se os já detectados ainda se encontram nesse espaço. Dessa forma, é necessário que essa função seja feita periodicamente ou ininterruptamente, com o máximo de energia possível, no intuito de se criar um único feixe estreito que possua um alcance mais distante. No caso de realizar simultaneamente outra tarefa, a vigilância perde em alcance, pois é necessário que uma parte da energia seja utilizada nessa outra atividade.

4.1.2 Busca

Segundo o Manual de Campanha C44-1 de 2001, do Estado Maior do Exército Brasileiro, entende-se por Radar de Busca, o radar integrado a um sistema de armas antiaéreo, a fim de detectar e identificar qualquer incursão que ingresse no espaço aéreo sob a responsabilidade da Unidade de Tiro, propiciando sua apreensão com antecedência necessária ao disparo com precisão. Sendo assim, tendo uma prévia informação do cenário no qual o sistema se encontra, é possível realizar a função busca em regiões onde um determinado alvo poderá ser abatido. Além disso, a função busca é importante quando se faz necessário ter informações mais precisas acerca de possíveis aeronaves que se encontrem em determinada região e mais próximas do sistema de radar. Logo, percebe-se que essa função é bem parecida com a função vigilância, exceto pelo fato de necessitar ser mais precisa, atualizar as informações de forma mais rápida e detectar vetores aéreos mais próximos.

4.1.3 Rastreamento

Rastreamento significa estimar e prever a trajetória de vetores aéreos previamente detectados e com isso fornecer as respectivas posições nas quais eles estarão depois de um determinado intervalo de tempo. Alguns radares só de vigilância, ou de busca, possuem um módulo de rastreamento no final de sua cadeia de processamento de sinais, estimando as posições dos vetores aéreos enquanto o radar faz a vigilância (TWS) fazendo uso de filtros estocásticos. No entanto, em radares multifuncionais é possível destinar uma tarefa só a isso, quando se pretende estimar de forma mais precisa e com maior acurácia as medidas de vetores aéreos previamente determinados.

Para tal, são criados feixes que permanecem em determinados vetores aéreos, aumentando a taxa de envio de pulso, e conseqüentemente, atualizando as informações obtidas de forma mais rápida e precisa, garantindo uma melhor estimativa. O rastreamento pode ser usado quando se quer obter informações mais precisas de um vetor aéreo suspeito, provavelmente com alto grau de periculosidade, ou para transformar o radar em um radar de tiro, que segundo o Manual de Campanha C44-1 de 2001, do Estado Maior do Exército Brasileiro, é um radar integrado a um

sistema de armas antiaéreo, a fim de acompanhar precisamente um vetor hostil, fornecendo à Unidade de Tiro elementos precisos para o ataque à ameaça aérea.

4.1.4 Guiamento de armas

Em algumas situações pode ser necessário que o sistema de radar forneça suporte para armas, como mísseis e canhões. Nesses casos, é importante que o sistema realize um acompanhamento, desde o momento de partida do projétil até seu encontro com o alvo, permitindo que o atinja com precisão. O radar acompanha o projétil, atualizando seu sistema de controle quanto à posição do alvo, fazendo com que o projétil altere sua trajetória em pleno vôo.

4.1.5 Comunicação

Essa função, como o próprio nome diz, tem por finalidade criar uma ligação entre o radar e o vetor aéreo. Essa comunicação só é possível se um sistema de radar secundário, também chamado de IFF, estiver acoplado ao sistema de radar. Com isso, as formas de onda enviadas precisam ser adequadas ao modo de operação do radar secundário. Fazendo essa comunicação, é possível identificar o tipo de aeronave, assim como obter diversas informações, tais como código da aeronave e altitude em que ela se encontra.

Analisando os itens 4.1.1 a 4.1.5 acima, percebe-se que a atividade que será desempenhada em determinado instante de tempo, depende da aplicação e da necessidade atual impostas pelo sistema de radar. Nesses radares, existe um importante sistema que é responsável por controlar a alocação de recursos. Esse sistema chamado gerenciador de recursos do radar (RRM) deve ser capaz de decidir dentre as diferentes tarefas mencionadas acima, quais serão realizadas e quando, além de equilibrar as exigências impostas no intuito de maximizar o desempenho do sistema levando em consideração recursos finitos. Esses recursos são basicamente energia, tempo e capacidade computacional (Ding 2008) e o sistema deverá decidir o quanto será gasto de cada um deles em cada uma das tarefas. O recurso *energia* é limitado pelo sistema de RF do radar, mais especificamente pelos módulos de transmissão e recepção que formam o arranjo de antenas. O recurso *tempo* está ligado a análise operacional do cenário, ou seja, é um recurso exclusivamente tático. Esse tempo compreende o tempo suficiente para realizar toda a função escolhida, considerando a taxa de envio de pulsos, tempo total de iluminação do alvo e o tempo de processamento (esse geralmente muito menor do que o tempo de iluminação). E por fim, o recurso *computacional*, como o próprio nome diz, é dependente dos algoritmos de *software* utilizados no radar, além da capacidade da memória computacional. Fazer o controle desses recursos é uma tarefa bastante complicada e devido a isso, muitos trabalhos, com diferentes linhas de ação e tipos de algoritmos, vem sendo realizados recentemente.

4.2 Algoritmos utilizados no Gerenciamento de recursos do radar

Gerir de forma eficiente os recursos do sistema citados na seção anterior e mudar as formas de onda utilizadas em cada tarefa realizada pelo radar são desafios que vêm recebendo uma grande atenção de pesquisadores ao redor do mundo. Existem diversas maneiras de realizar esse gerenciamento, cada qual utilizando critérios, métricas e algoritmos diferentes. Porém, a grande maioria dos estudos realizados segue um mesmo padrão de arquitetura (Ding & Defence 2009), mostrado na figura 4.4, que detalha o bloco *Gerenciamento dos Recursos* da figura 4.1.

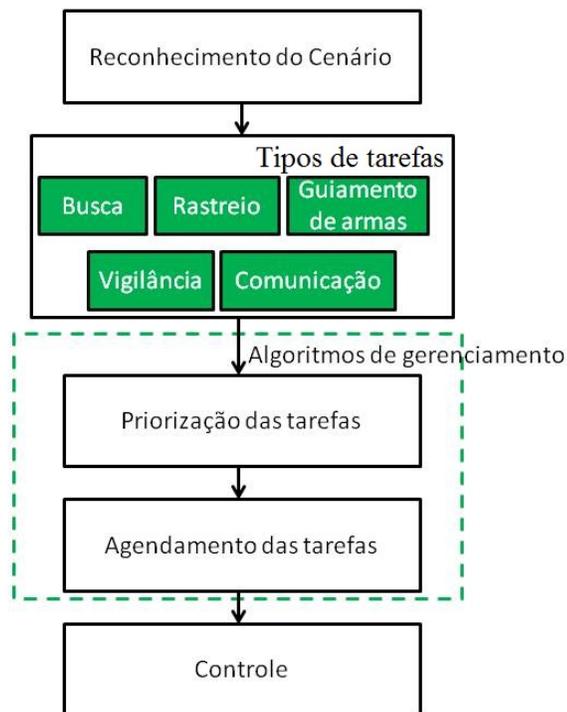


Figura 4.4: Arquitetura padrão de um Gerenciador de recursos do radar

A partir do reconhecimento do cenário, é possível determinar uma lista de tarefas, dentre os tipos de tarefas previstos pelo sistema, que deverá ser realizada pelo sistema. Essa lista é definida pelo tipo de tarefa e por seus respectivos parâmetros, conforme ilustrado na tabela 4.2. Como exemplo, uma tarefa de busca pode ser dada em qualquer setor definido pelo azimute inicial e azimute final, ou elevação inicial e elevação final, assim como para uma tarefa de rastreo é necessário informar qual dos vetores aéreos encontrados precisa ser rastreado.

Dada a lista de tarefas, entra em ação o algoritmo de gerenciamento, que compreende as funções *Priorização das tarefas* e *Agendamento das tarefas*. A primeira escolhe dentre as possíveis tarefas, quais são as prioritárias e define um peso a cada uma delas. A métrica usada nessa priorização depende do algoritmo escolhido e ainda não existe uma métrica específica que resolva todos os casos. Já a segunda função ordena as tarefas de tal maneira que os recursos

TIPOS	PARÂMETROS
Vigilância	Varredura entre -60° e 60° .
Rastreio	Vetor aéreo 1
Rastreio	Vetor aéreo 4
Busca	Varredura entre -30° e 10° em azimute a 20° em elevação.
Comunicação	Vetor aéreo 3
Guiamento de armas	Míssil 1
Rastreio	Vetor aéreo 5
Busca	Varredura entre 30° e 50° em azimute e de 0° a 20° em elevação.
⋮	⋮

Tabela 4.2: Exemplo de lista de tarefas

utilizados não sejam maiores do que os disponíveis. Em alguns casos, essa função pode estar inserida dentro do bloco *Controle e Atuação*, já que ele é o responsável por dividir e definir os recursos. Logo, percebe-se que existem diversas formas de resolver essa questão, cada qual com sua particularidade.

Os tipos de algoritmos mais usados em trabalhos desenvolvidos nessa área fazem uso de redes neurais (Komorniczak & Pietrasinski 2000) e (Komorniczak, Kuczerski & Pietrasinski 2000), lógica *fuzzy* (Miranda, Baker, Woodbridge & Griffiths 2006) e (Miranda, Baker, Woodbridge & Griffiths 2007), algoritmos genéticos (Ozdamar 1999), algoritmos Q-RAM (Shih, Gopalakrishnan, Ganti, Caccamo & Sha 2003), algoritmos adaptativos (Koch 1999) e (Shin, Hong & Hong 1995) e programação dinâmica (Krishnamurthy & Evans 2001), (Wintenby & Krishnamurthy 2006) e (Orman, Potts, Shahani & Moore 1996) conforme descrito no estudo feito em (Ding & Defence 2009). Cada uma dessas técnicas possui as suas particularidades, não existindo, portanto, uma melhor do que a outra como demonstrado por (Ding & Defence 2009).

Analisando a dificuldade em dividir o tempo entre as tarefas que serão realizadas em radares multifuncionais, esse trabalho visa criar uma função que defina as prioridades das tarefas analisando o parâmetro tempo, porém sem levar em consideração mudanças na forma de onda. Dado um cenário, quando é necessário realizar uma varredura, quando é necessário rastrear um alvo e quanto tempo iluminá-lo e qual a ordem dos rastreamentos são alguns dos problemas encontrados pelo operador. No intuito de melhor dividir esse tempo de forma automatizada, no presente trabalho foi desenvolvida uma função determinística que determina a ordem das tarefas que serão realizadas, além de uma lógica associada ao descarte de certas tarefas.

O algoritmo desenvolvido no presente trabalho é baseado na otimização de uma função objetivo que leva em consideração o grau de ameaça de determinado vetor aéreo, assim como o tempo que o sistema precisará para realizar toda a tarefa escolhida e o tempo que cada tarefa está sem ser realizada. O algoritmo garante a otimização do processo e resolve o problema de priorização e ordenamento ao mesmo tempo, sendo parametrizado conforme às necessidades do critério operacional. Maiores detalhes do algoritmo desenvolvido são dados na próxima seção.

4.2.1 Algoritmo utilizado no presente trabalho

O foco desse trabalho é voltado para a análise operacional, ou seja, só leva em consideração o recurso *tempo*. A ideia principal é discutir e propor um método que define a prioridade de execução de cada tarefa, dentre os tipos de tarefas previstos pelo sistema (vigilância, busca, rastreamento, comunicação e guiamento de armas) e as ordena, levando em consideração o grau de periculosidade de cada alvo, o tempo necessário para realizar a tarefa e o tempo que cada alvo ficou sem ser detectado pelo radar.

Primeiramente, a ideia foi usar o algoritmo de leilão (Bertsekas 1988) para definir as tarefas que seriam realizadas, pois além de ser um método de agendamento sofisticado e relativamente novo, é um método de otimização que analisa todas as opções possíveis de agendamento antes de determinar a tarefa que será realizada no instantâneo momento. No entanto, como o algoritmo de leilão utiliza um horizonte de tempo relacionado ao número de tarefas daquele instante de tempo, dois fatores contribuíram para que o método fosse inadequado: O primeiro está relacionado com a métrica escolhida. O algoritmo precisa levar em conta o tempo que cada tarefa ficou sem ser realizada. Então, não é possível criar um ordenamento de tarefas sem considerar a influência do tempo que cada tarefa levou para ser realizada. O segundo problema é que após o término da tarefa, essa pode ser realizada novamente, o que não é previsto pelo algoritmo de leilão. Por exemplo, após um vetor aéreo ser rastreado, seu grau de periculosidade e o tempo necessário para iluminá-lo são atualizados. Dependendo dos outros vetores existentes no cenário e do resultado dessa atualização, talvez seja interessante continuar rastreando-o.

A fim de contornar esse problema, foi proposto uma modificação no algoritmo de leilão. Essa modificação consistia em utilizar o algoritmo de leilão, mas não ordenar as tarefas da forma proposta pelo método, mas sim só executar a primeira. Após sua execução, os dados eram atualizados e um novo leilão era feito, considerando inclusive a tarefa recém realizada. Porém, identificou-se que a saída fornecida por esse método era a mesma saída quando se utilizava uma única função determinística. Como essa última é uma solução mais rápida e necessita de menos custo computacional foi escolhida para ser usada no presente trabalho.

A escolha de prioridades leva em consideração três parâmetros principais em cada vetor aéreo. O primeiro é o grau de periculosidade de cada um desses vetores, que nada mais é do que um valor associado a cada vetor aéreo dadas as suas características cinemáticas e físicas. O segundo é o tempo necessário de iluminação em cada vetor aéreo. Quanto menos tempo um feixe fica parado em um único vetor aéreo melhor, ou seja, analisando isoladamente é preferível iluminar primeiro os vetores aéreos que exijam menos tempo de iluminação. E o terceiro parâmetro está relacionado com o tempo que o alvo fica sem ser iluminado, ou seja, quanto mais tempo o radar não observa determinado vetor, cresce a prioridade dele ser iluminado, pois não se pode ficar sem detectar um alvo por muito tempo. Dessa forma, pode-se criar uma tabela que relaciona os parâmetros a serem analisados com a prioridade de realização da tarefa, conforme mostrado na tabela 4.3.

O critério de otimização de prioridades e agendamento de tarefas proposto no presente trabalho analisa somente o instante de aplicação da função objetivo, não levando em consideração algum horizonte de tempo. Após a realização da tarefa escolhida, os argumentos da função são atualizados e uma nova tarefa (ou a mesma) é realizada. Apesar dessa análise instantânea, o

Parâmetro	Grau de periculosidade	Tempo de iluminação	Tempo sem ser iluminado
Prioridade	Diretamente proporcional	Inversamente proporcional	Diretamente proporcional

Tabela 4.3: Relação entre prioridade e parâmetros dos vetores aéreos

critério analisa de forma indireta dados passados, através do tempo em que cada tarefa está sem ser realizada, e dados futuros, através do impacto causado pelo tempo de iluminação necessário. Com base nesses dados, a tarefa que será realizada é a que obtiver maior valor na função objetivo, caracterizando uma maior prioridade.

Grau de periculosidade

Determinar o grau de periculosidade de um determinado vetor aéreo não é uma tarefa fácil, pois envolve diversos elementos. Não existe na literatura uma fórmula pronta para tal, e caso exista em algum lugar, essa informação com certeza é classificada e não pode ser divulgada. Porém, sabe-se que algumas características dos vetores precisam ser levadas em consideração, algumas até citadas em (Komorniczak et al. 2000). Essas características são:

1. Distância até o sistema de radar ou o ponto sensível¹
2. Azimute
3. Elevação
4. Velocidade radial em relação ao sistema de radar ou ao ponto sensível
5. Aceleração total
6. Direção e sentido instantâneos de vôo
7. Trajetória de vôo
8. Tipo de aeronave
9. Identificação de IFF

Cada parâmetro citado é direta ou inversamente proporcional ao fator *Grau de Periculosidade*. A tabela 4.4 mostra essas relações, onde alguns parâmetros não possuem uma relação direta com o *Grau de Periculosidade*, dependendo de outros fatores.

A partir da análise dessas características é possível criar uma função onde as entradas são esses fatores e a saída é um valor que indica o grau de periculosidade. Como a função ou métrica que define o grau de periculosidade de vetores aéreos é uma informação crucial em um sistema de defesa, essa se torna classificada. Sendo assim, não é um dos objetivos desse trabalho criar

¹Ponto sensível é o ponto vital selecionado e priorizado para ser defendido contra ataques aéreos de qualquer natureza.

RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS E GRAU DE PERICULOSIDADE	
Parâmetro	Explicação
Distância	Quanto mais próximo do sistema maior o perigo
Azimute	Depende de informações extras
Elevação	Quanto mais baixo o vôo maior a possibilidade de estar mal intencionado
Velocidade radial	Quanto maior a velocidade em direção ao sistema mais perigoso
Aceleração total	Determina uma mudança de trajetória, podendo aumentar ou diminuir a periculosidade
Direção e sentido instantâneos de vôo	Aumenta quanto mais próximo da radial
Trajetória de vôo	Existem trajetórias conhecidas de ataque. Percebendo uma delas, o sistema identifica o vetor como sendo mais perigoso
Tipo de aeronave	A classificação como sendo asa fixa, e qual modelo, asa rotativa, e qual modelo, VANT, entre outros, determina uma certa periculosidade
Identificação de IFF	Pode ser identificado como amigo, inimigo ou desconhecido. Cada qual fornece uma parcela para o grau de periculosidade

Tabela 4.4: Relação entre parâmetros dos vetores aéreos e grau de periculosidade

uma função complexa e bem elaborada que define o grau de periculosidade de cada vetor aéreo. No presente trabalho, foi criada uma função simples que fornece o grau de periculosidade de forma coerente, indo de 0 a 10, linear e ponderada em todos os fatores, onde 0 indica o menor grau de periculosidade, ou seja, trata-se de um vetor aéreo nada ameaçador, e 10 indica o maior grau de periculosidade, ou seja, trata-se de um vetor aéreo extremamente ameaçador. A função GP criada é mostrada na equação 4.1.

$$GP_i = a \cdot (R_{max} - R_i) - b \cdot v_{Ri} + c \cdot (H_{max} - H_i) + d \cdot IFF_i + e \cdot \frac{1}{RCS_i} \quad (4.1)$$

Sendo:

- a, b, c, d e e - Constantes reais positivas.
- R_i - Distância do vetor aéreo i ao sistema de radar ou a um ponto sensível.
- R_{max} - Alcance máximo do sistema de radar.

- v_{Ri} - Velocidade radial do vetor i em relação ao sistema de radar ou a um ponto sensível, sendo negativa quando o sentido é de aproximação e positiva quando o sentido é de afastamento.
- H_i - Altura em que se encontra o vetor i em relação ao sistema de radar ou a um ponto sensível.
- H_{max} - Altura máxima alcançada pelo sistema de radar.
- IFF_i - Uma grandeza que é igual a 1 caso o vetor aéreo seja considerado amigo, 0 desconhecido ou -1 inimigo, com base nas informações de IFF transmitidas pelo vetor aéreo i .
- RCS_i - Seção Reta Radar do vetor aéreo i (considerando que seja conhecida).

Essa função foi criada no intuito de se ter um número de 0 a 10, relacionado a ameaça de cada vetor aéreo, que possa ser usado para validar todo o restante da análise. No entanto, como busca e vigilância são tarefas que precisam ser realizadas pelo sistema e a ideia é utilizar uma única função objetivo independente da tarefa, é necessário atribuir a essas graus de periculosidades fixos, e essas possam concorrer com as outras tarefas. Esse valor é previamente escolhido pelo operador de tal forma que seja tão maior quanto maior for a possibilidade de aparição de novos vetores no espaço aéreo vigiado pelo radar.

Tempo de iluminação

Um parâmetro de suma importância na escolha da tarefa que será realizada é o tempo que será gasto na mesma. A escolha desse tempo depende da métrica escolhida. No presente trabalho, o tempo de iluminação é calculado a partir do grau de periculosidade de cada vetor aéreo. Esse valor determina a precisão e acurácia da medida, as quais dependem da probabilidade de detecção mínima e da probabilidade de falso alarme máxima aceitáveis em determinada operação. Através da escolha dessas probabilidades, uma determinada SNR mínima é necessária para obtê-las. Dada essa SNR, é possível encontrar quantos pulsos precisam ser integrados, conforme mostrado em 1.12, e conseqüentemente, o tempo que o vetor precisa ficar iluminado. O algoritmo que precisa ser seguido para encontrar esse tempo é mostrado abaixo:

1. Calcula-se o grau de periculosidade do vetor aéreo.
2. Relaciona esse valor com as probabilidade de detecção mínima e probabilidade de falso alarme máxima especificadas. Essa relação pode ser feita de diversas formas.
3. Através da equação 1.13, repetida abaixo, encontra-se o valor de SNR necessário.

$$SNR = \ln\left(\frac{0.62}{P_{fal}}\right) + 0.12\ln\left(\frac{0.62}{P_{fal}}\right) \cdot \ln\left(\frac{P_{det}}{1 - P_{det}}\right) + 1.7\ln\left(\frac{P_{det}}{1 - P_{det}}\right) \quad (4.2)$$

Sendo P_{det} e P_{fal} as probabilidades de detecção mínima e de falso alarme máxima admissíveis respectivamente (vide Seção 1.2.1).

4. Considerando todos os parâmetros da equação da SNR já conhecidos, encontra-se o número de pulsos necessários (n_p) para atingir a SNR mínima calculada no item 3 (vide equação 1.12).
5. A partir de n_p encontra-se o tempo de iluminação conforme mostrado a seguir.

O tempo de iluminação é dado pela soma do tempo que o pulso leva para ir até o vetor aéreo e voltar ao radar com o número de pulsos enviados espaçados pelo inverso da frequência de repetição de pulsos (PRF), conforme mostrado na Figura 4.5. A equação 4.3 indica essa soma.

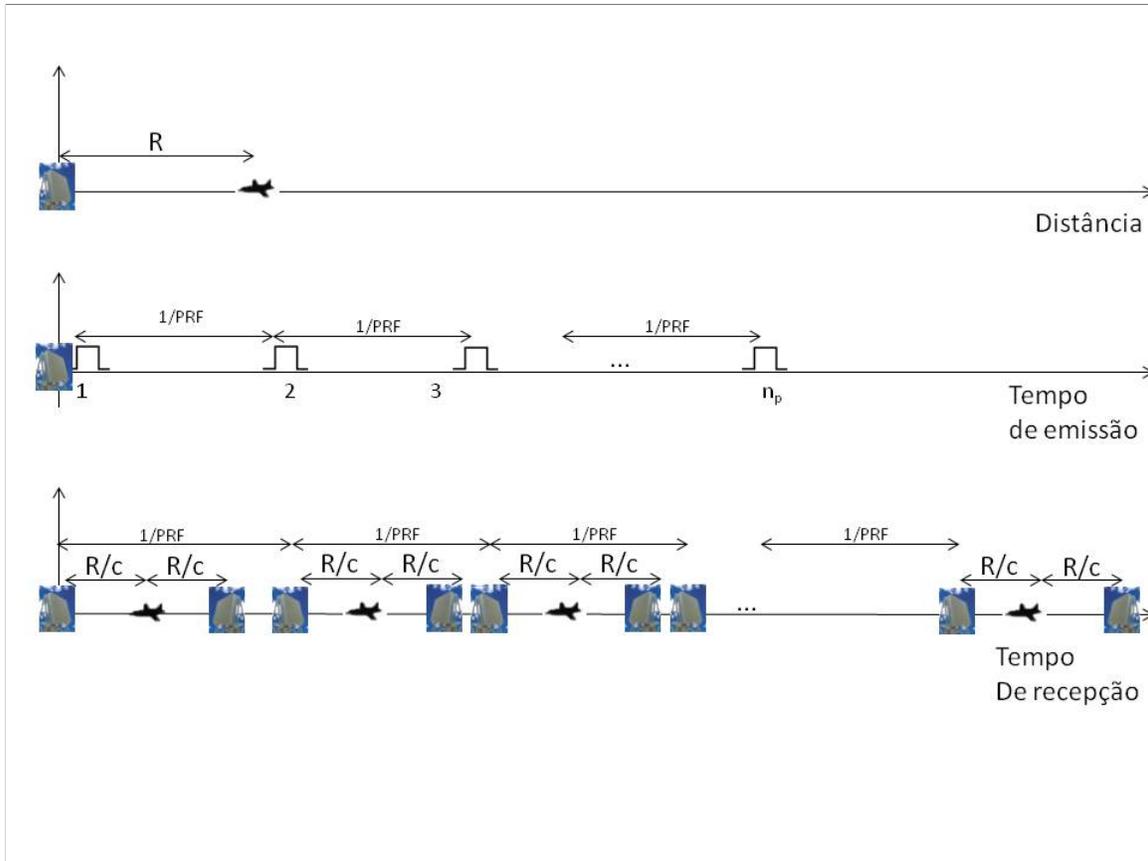


Figura 4.5: Tempo de iluminação

$$TI = n_p \cdot \frac{1}{PRF} + 2 \cdot \frac{R}{c} \quad (4.3)$$

Como PRF é um fator conhecido do sistema, c é a velocidade da luz e R é medido através da detecção do vetor aéreo, fica faltando só a variável n_p para calcular TI , a qual é encontrada seguindo o procedimento descrito acima.

Como a ideia é utilizar uma única função objetivo para encontrar qual tarefa será realizada, é preciso fazer algumas adequações, para que os valores encontrados possam ser comparáveis. Nesse sentido, o valor de TI para uma tarefa de busca ou vigilância geralmente é muito maior do que o valor de TI para um rastreamento. Isso se deve ao fato do sistema de radar transmitir com uma

potência suficientemente grande para detectar vetores aéreos até uma determinada distância. Como vetores aéreos mais próximos do sistema fornecem um grau de periculosidade maior, é bem provável que esses sejam rastreados. Assim, o número de pulsos utilizados na tarefa de busca ou vigilância geralmente já é mais do que suficiente para atingir uma determinada acurácia, fazendo TI ser menor do que o TI para vigilância.

No intuito de poder comparar as duas tarefas em uma única função objetivo, o tempo de iluminação de tarefas de busca ou de vigilância é alterado no momento do cálculo da prioridade, colocando-o na mesma ordem de grandeza dos TIs de rastreamento. Analisando o cálculo da SNR , essa alteração pode ser interpretada como um possível aumento do valor de n_p a fim de diminuir a potência de transmissão fornecida ao vetor aéreo que será rastreado, destinando a quantidade de energia restante na realização de outra tarefa.

Tempo sem ser iluminado

Em um sistema de defesa é sempre importante conhecer o cenário no qual o sistema está inserido. A partir dessa afirmação, percebe-se que há a necessidade de atualização de informações dos vetores aéreos contidos no espaço vigiado pelo radar. Assim, enquanto uma tarefa está sendo realizada, outras não estão sendo, e conseqüentemente, algumas informações estão sendo perdidas. Isso é ruim, pois no caso dos filtros estocásticos utilizados no algoritmo de rastreamento, o tempo entre a atualização das medidas é de suma importância para uma boa estimação, conforme mostrado na teoria de filtros mostrada em (Kay 1993). Dessa forma, é necessário que se tenha uma busca ou uma vigilância periódica, pois com isso as medidas de todos os vetores aéreos (considerando que sejam detectados) contidos no espaço de vigilância são atualizadas. Logo, o tempo que um determinado vetor aéreo fica sem ser detectado precisa fazer parte da função que determinará qual tarefa será realizada e quando.

Esse tempo é calculado para cada vetor aéreo e é dado pela soma de todos os tempos TIs utilizados antes dele ser detectado conforme mostrado na equação 4.4. Quando há vigilância ou busca, todos os TSV são zerados e começam a ser considerados no instante em que seus respectivos vetores deixam de ser iluminados.

$$TSV(k) = \sum_{v \in V} TI(v) \quad (4.4)$$

Onde V é o conjunto que compreende todos os vetores que foram iluminados desde o momento em que o vetor k foi iluminado.

Função Objetivo

Após o conhecimento desses três fatores preponderantes, é necessário juntá-los em uma função objetivo que garanta a prioridade e o agendamento das tarefas. Assim, a partir da descoberta dos parâmetros citados, é possível utilizá-los como entrada da função e essa fornecer um fator chamado α , que define o grau de prioridade de cada uma das tarefas. Esse fator α é

fruto do presente trabalho, e é dado pela equação 4.5.

$$\alpha_i = A \cdot \widehat{GP}_i^\beta + B \cdot \widehat{TI}_i^{-\gamma} + C(GP) \cdot \widehat{TSV}_i^\delta \quad (4.5)$$

Onde A e B são constantes, β é uma constante maior do que 1, γ e δ são constantes entre 0 e 1 e $C(GP)$ é uma função do grau de periculosidade. As constantes exponenciais seguem essas restrições devido às relações fornecidas na tabela 4.3. Já o valor de C necessariamente depende do grau de periculosidade, visto que quanto maior for esse grau, menos tempo sem ser iluminado ele deve ficar. Por fim, todas as variáveis possuem um “^” que indica que são normalizadas, de tal forma que o fator α fique restrito a um intervalo finito e positivo de valores.

Após o conhecimento de todos os fatores α_i , a tarefa que possuir o máximo valor de α será realizada. Antes da obtenção do valor máximo, esses fatores podem passar por um limiar, onde são definidas quais tarefas irão concorrer a lista de atividades, e assim, diminuir o tempo de processamento. Além disso, todas as tarefas possuem um grau de periculosidade, não necessariamente associado a um vetor aéreo. Esse valor é pré-determinado pelo operador antes do início do funcionamento do sistema.

Integração dos módulos

Em todo trabalho técnico é importante que se tenha uma ferramenta para testar os algoritmos desenvolvidos e simular situações que, porventura, venham a acontecer. O objetivo deste capítulo é propor uma plataforma que integre os aspectos de otimização do diagrama gerado pelo arranjo de antenas (capítulos 2 e 3) e os aspectos relativos ao critério de priorização de tarefas (capítulo 4), simulando suas atuações em um sistema de radar como um todo.

Para desenvolver um simulador que faça a ligação entre a geração do feixe transmitido/recebido pelas antenas e o critério de priorização utilizado no Gerenciamento de Recursos do Radar, é necessário que ele compreenda o ambiente no qual tais realizações sejam utilizadas. O simulador detalhado nesse capítulo foi desenvolvido com esse objetivo, proporcionando ao usuário a possibilidade de criar um determinado cenário de atuação, com múltiplos alvos, interferências e *clutters* e analisar como o sistema se comporta nesse ambiente gerado. Além disso, o simulador é modularizado, permitindo que novos módulos venham a ser adicionados, retirados ou modificados sem que a estrutura como um todo seja alterada.

Neste capítulo, a estrutura do simulador será explicada, definindo a ligação entre os módulos e detalhando as funções contidas em cada um deles. No capítulo seguinte serão mostrados alguns exemplos realizados e seus resultados.

5.1 Estrutura do simulador

Nessa seção, será apresentado o simulador construído para validar os conceitos apresentados durante o presente trabalho. O diagrama em blocos do simulador completo é apresentado na figura 5.1. Para melhor explicá-los, cada bloco mostrado na figura 5.1 será tratado em uma subseção, seguindo a sequência real dos dados. Utilizou-se o *software* MATLAB como plataforma de desenvolvimento, onde com o apoio do *toolbox* YALMIP, utilizado no bloco referente à otimização do diagrama de antena, foi possível realizar todas as simulações que serão mostradas no próximo capítulo.

As entradas desse simulador são arquivos gerados antes da simulação começar, ou seja, de forma *offline*. Esses arquivos de entrada são divididos em cinco tipos: Parâmetros do cenário, parâmetros gerais, parâmetros físicos, parâmetros de processamento e trajetórias dos vetores aéreos.

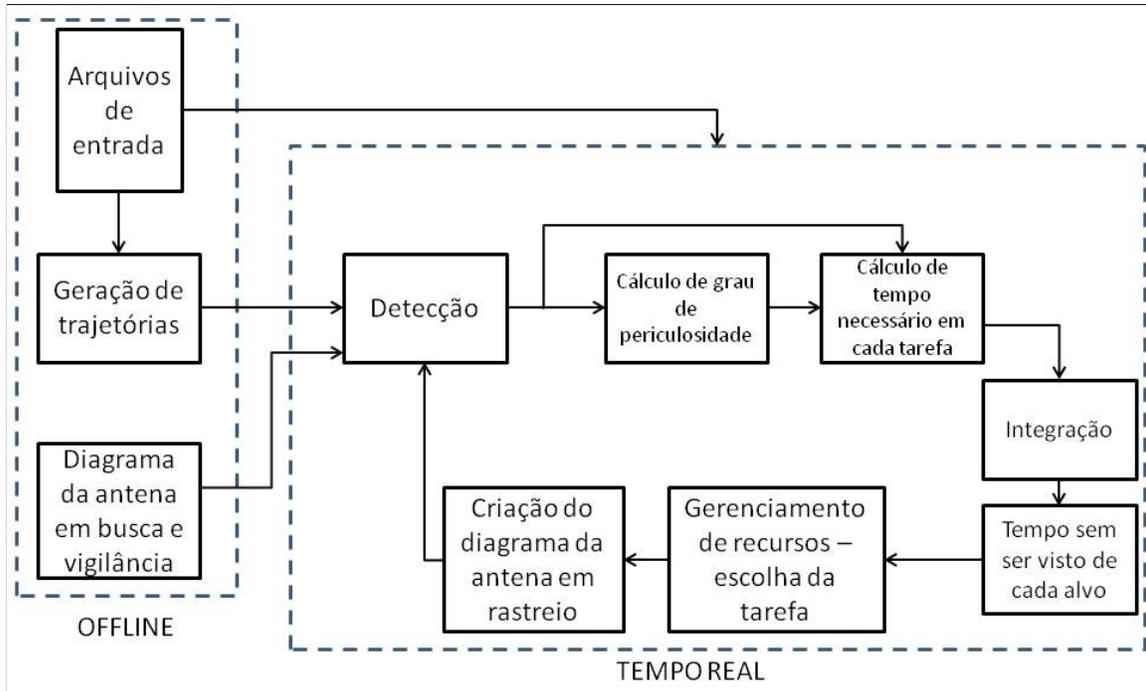


Figura 5.1: Diagrama em bloco do Simulador

5.1.1 Arquivos de Entrada

O simulador utiliza diversos parâmetros e constantes que são fornecidas através dos *Arquivos de parâmetros*. Esses arquivos são funções criadas em Matlab que não retornam nenhum valor, porém definem variáveis globais que são usadas durante toda a execução do programa. Além desses arquivos de parâmetros, existe mais um arquivo de entrada, mas com outro enfoque. Esse arquivo está em formato *txt*¹ e define as trajetórias de todos os vetores aéreos presentes na simulação. Diferente dos outros arquivos de entrada, ele só é lido na inicialização da função que gera as trajetórias completas de cada vetor aéreo. Para uma melhor apresentação, os primeiros foram divididos em quatro, contendo cada qual as seguintes variáveis:

1. **Parâmetros gerais:** São parâmetros relacionados à execução do simulador, assim como características de vigilância do radar.
 - *TempoInicial* - Tempo de início da simulação [s]
 - *dT* - Incremento temporal da simulação [s]
 - *TempoSimulacao* - Tempo total de simulação [s]
 - *cria_diagrama* - Criação dos diagramas de vigilância do arranjo, onde 0 significa não criar um novo diagrama e utilizar o último diagrama gerado e 1 significa criar um novo diagrama [0 ou 1]
 - *VelocidadeAntenaBusca* - Velocidade de varredura do feixe [graus/s]

¹Formato de arquivo texto considerado universal, já que pode ser aberto e lido por qualquer editor de texto

- *AngInicial* - Ângulo inicial de varredura [graus]
- *AngFinal* - Ângulo final de varredura [graus]

2. **Parâmetros do cenário:** São todos os parâmetros relacionados às características do cenário, tanto geográficas quanto impostas pelo sistema de radar.

- *AtivacaoSetores* - Ativa os setores de busca previamente escolhidos [0 ou 1]
- *Setores* - Define os setores de busca previamente escolhidos [graus]
- *GPBusca* - Define um grau de periculosidade fixo para cada setor da função busca [adm]
- *GPVigilancia* - Define um grau de periculosidade fixo para a função vigilância [adm]
- *AtivacaoClutters* - Ativa os azimutes onde encontram-se *clutters* [0 ou 1]
- *Clutters* - Define os azimutes onde encontram-se *clutters* ou interferências [graus]
- *Rprox* - Raio de distância onde o alvo é considerado próximo [m]

3. **Parâmetros Físicos:** São constantes universais e parâmetros relacionados às características físicas do radar.

- *c* - Velocidade da luz [m/s]
- *freq* - Frequência de transmissão [Hz]
- *Pt* - Potência de pico do transmissor [W]
- *GAntena* - Ganho da antena de transmissão/recepção [dB]
- *n* - Número de elementos em uma linha do arranjo [adm]
- *dx* - Distância entre os elementos do arranjo [comprimento de onda]
- *T* - Temperatura do sistema [Kelvin]
- *L* - Perdas Gerais [dB]
- *k* - Constante de Boltzmann [J/K]
- *g* - Aceleração da gravidade [m/s^2]
- *Rmax* - Máximo alcance do radar [m]

4. **Parâmetros de Processamento:** São parâmetros relacionados à forma de onda utilizada e às definições de processamento do sistema de radar.

- *PRF* - Frequência de repetição de pulsos [Hz]
- *Nint* - Número de pulsos integrados [adm]
- *B* - Banda do sinal [Hz]
- *F* - Figura de ruído [dB]
- *tau* - Largura de pulso [s]

- *LimiarDeteccao* - Limiar de detecção relacionado à SNR resultante de cada vetor aéreo [dB]
- *SecundariodB* - Nível máximo para lóbulos secundários em azimutes predeterminados [dB]
- *Pdet1* - Menor Probabilidade de Detecção aceitável [adm]
- *Pfal1* - Maior Probabilidade de Falso Alarme aceitável [adm]

Todos os três arquivos citados acima estão em formato *.m* e são lidos diretamente no corpo da função principal.

O quinto arquivo define as trajetórias de todos os vetores aéreos contidos na simulação, considerando os instantes iniciais e finais do movimento completo de cada um deles. Essa consideração foi criada para simular pousos e decolagens, pois nem todos os vetores aéreos começam suas trajetórias, e nem as encerram, no mesmo instante de tempo. Além disso, também é previsto que os vetores aéreos possam mudar de trajetória durante seu movimento, sendo esse dividido em trechos. Assim, os parâmetros escolhidos nesse arquivo são as variáveis cinemáticas iniciais de cada trecho do movimento. Esses parâmetros são:

- *tempo* - Instante de tempo no qual o vetor aéreo começa sua trajetória [s]
- *x* - Posição inicial do vetor aéreo no eixo x [m]
- *y* - Posição inicial do vetor aéreo no eixo y [m]
- *z* - Posição inicial do vetor aéreo no eixo z [m]
- *v_x* - Componente no eixo x da velocidade inicial do vetor aéreo [m/s]
- *v_y* - Componente no eixo y da velocidade inicial do vetor aéreo [m/s]
- *v_z* - Componente no eixo z da velocidade inicial do vetor aéreo [m/s]
- *RCS* - Seção Reta Radar [m^2]
- *IFF* - Identificação Amigo ou Inimigo, sendo um valor pertencente ao conjunto $\{-1, 0, 1\}$, conforme explicado no capítulo 4.
- *intervalo de tempo* - Duração de tempo do trecho [s]
- *aceleração tangencial* - Aceleração tangencial do vetor aéreo durante o respectivo trecho [m/s^2]
- *aceleração radial* - Aceleração radial do vetor aéreo durante o respectivo trecho [m/s^2]
- *elevação* - Ângulo que define a mudança do plano de movimento entre dois trechos, mantido o vetor tangente [graus]

Como já mencionado, o movimento completo dos vetores aéreos é dividido por trechos. Cada trecho é definido pelo intervalo de tempo de atuação, acelerações radial e tangencial e ângulo de mudança de inclinação do movimento. A figura 5.2 mostra um exemplo do arquivo, onde os valores 0* indicam onde a leitura de determinado vetor aéreo termina.

```

cnr1 - Notepad
File Edit Format View Help
{Vetor Aereo 1}
0 5000 3000 0 -200 -120 0 10 1*{tempo[s], x, y, z, v_x, v_y, v_z, RCS, IFF}
1. 0 0 0 * {intervalo de tempo[s], aceleracao tangencial[m/s2], aceleracao radial[m/s2], elevacao[°]}
0.75 0 1 0 * {intervalo de tempo[s], aceleracao tangencial[m/s2], aceleracao radial[m/s2], elevacao[°]}
0 *
{Vetor Aereo 2}
0 50000 -20000 0 200 300 0 20 0*{tempo[s], x, y, z, v_x, v_y, v_z, RCS, IFF}
1.5 0 0 0 * {intervalo de tempo[s], aceleracao tangencial[m/s2], aceleracao radial[m/s2], elevacao[°]}
0 *
{Vetor Aereo 3}
0.8 40000 12000 0 240 300 0 10 -1*{tempo[s], x, y, z, v_x, v_y, v_z, RCS, IFF}
0.9 0 0 0 * {intervalo de tempo[s], aceleracao tangencial[m/s2], aceleracao radial[m/s2], elevacao[°]}
0 *
0 *

```

Figura 5.2: Exemplo de arquivo que define as trajetórias

5.1.2 Diagrama da Antena em Busca e Vigilância

A variável *cria_diagrama* define se a função *Diagrama.Antena* será chamada ou não. Em caso positivo, essa função cria e armazena em um banco de diagramas todos os diagramas, em plano azimutal, que serão usados durante a operação de busca ou vigilância. Sabendo-se os azimutes final e inicial de vigilância, com discretização de um grau, define-se a quantidade de diagramas gerados, cada qual indo de -90° a $+90^\circ$ com discretização parametrizada dentro do corpo da função, podendo ser escolhida pelo usuário.

A função faz uso do método de Mínimos Quadrados em Amplitude explicado no capítulo 3. O diagrama ideal que deve ser seguido já está presente na função e é dado de antemão para cada azimute escolhido como lóbulo principal. Como essa etapa é relativamente demorada e sem necessidade de ser feita em tempo real, a saída do bloco é um banco de diagramas que é consultado durante o programa a medida em que o feixe principal da antena se movimenta. Esse banco de diagramas fica armazenado em um arquivo.

Já criados os diagramas, considerando que não se queira mudar o intervalo de vigilância e nem o diagrama ideal a ser seguido, pode-se atribuir valor 0 à variável *cria_diagrama* na próxima vez que executar o programa, diminuindo assim o tempo de processamento do simulador.

5.1.3 Geração de Trajetórias

Esse bloco é responsável por criar as trajetórias de todos os vetores aéreos presentes no cenário, considerando os tempos em que cada um deles surge, permanece no cenário e desaparece.

Relacionado a esse bloco há um arquivo de fomato *.txt* e duas funções em extensão *.m*², que atuam antes do sistema entrar no laço de execução (chamado de Tempo Real na figura 5.1), criando todas as trajetórias determinadas pelo usuário. O arquivo de entrada para essa função já foi explicado na seção anterior. A seguir, serão explicadas as duas funções que fazem parte desse módulo: *geradorTrajetorias.m* e *trecho.m*.

Função geradorTrajetorias.m

Essa função é responsável por gerar um banco de trajetórias que contém, para cada vetor aéreo, uma posição para cada instante de tempo discretizado pela variável dT mostrada na seção **Arquivos de Entrada**. Ela atua como uma função principal para a geração das trajetórias, lendo as informações do arquivo de trajetórias e fornecendo como entrada para a função *trecho.m* as características cinemáticas do trecho atual de cada vetor aéreo e sua última posição.

Função trecho.m

Essa função é responsável por encontrar a posição de um determinado vetor aéreo dadas as suas características cinemáticas. Para isso, em cada trecho fornecido como entrada utiliza-se conceitos de geometria diferencial de curvas para encontrar a posição atual do respectivo vetor aéreo, visto que as trajetórias são tridimensionais e podem seguir qualquer tipo de curvatura.

Após a execução da parte *offline*, o programa entra em um laço temporal incrementado pela variável dT . Enquanto o tempo for menor do que a variável *TempoSimulacao*, o programa executa todos os blocos contidos na parte Tempo Real, conforme demonstrado na figura 5.1.

5.1.4 Detecção

Dentre os blocos inseridos no laço, o primeiro a ser executado é o de Detecção, pois é ele o responsável por informar se existe ou não algum vetor aéreo no azimuth iluminado no respectivo intervalo de tempo. A função *Detecta.m* confronta a posição de todos os vetores aéreos existentes no cenário com a energia fornecida pelo diagrama de antena em cada um desses pontos. Com isso, sabe-se a potência média recebida na saída do receptor referente a cada um dos vetores aéreos. A partir dessa análise, a função *EquacaoRadar.m* (subfunção de *Detecta.m*) fornece a relação sinal/ruído de cada vetor aéreo calculando a equação 1.12, repetida na equação 5.1.

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma n_p T_p B_s}{(4\pi)^3 R^4 k T B F L_s} \quad (5.1)$$

Onde todas as variáveis são parametrizadas, exceto G_t e G_r que são provenientes da energia associada à posição do alvo em relação ao diagrama de radiação da antena, n_p que depende da tarefa que está sendo realizada e R que depende de cada um dos vetores aéreos no determinado instante.

Por fim, de posse de todos os valores de SNR, um limiar dado pela variável *LimiarDeteccao* é utilizado de tal maneira que somente vetores aéreos com valores de SNR acima dele são

²Formato de arquivo das funções criadas em Matlab

detectados pelo radar naquele instante de tempo. Os vetores aéreos detectados nesse instante são armazenados em uma variável chamada *AlvosDetectados*. Essa variável é a saída desse bloco e é dada pela tabela 5.1, modificada a cada execução do bloco.

ALVOS DETECTADOS							
Alvo	Tempo Atual	Distância	Azimuth	Elevação	RCS	IFF	Vel. Radial
1	t_i	R_1	Az_1	El_1	RCS_1	IFF_1	Vr_1
2	t_i	R_2	Az_2	El_2	RCS_2	IFF_2	Vr_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N	t_i	R_N	Az_N	El_N	RCS_N	IFF_N	Vr_N

Tabela 5.1: Variável *AlvosDetectados*

Em seguida, essa tabela passa por três blocos que acrescentam novas colunas a ela. A cada tarefa realizada, essa tabela passa novamente por todos os blocos mencionados a seguir.

5.1.5 Cálculo de Grau de Periculosidade

O primeiro desses blocos é o Cálculo de Grau de Periculosidade. A função *periculosidade.m* define o grau de periculosidade dos vetores aéreos detectados (GP) através de uma função de parâmetros citados na seção 4.2.1. Esse valor é tão maior quanto for o seu nível de ameaça. A saída dessa função é uma tabela que atualiza a variável *AlvosDetectados*, dada pela tabela 5.2.

ALVOS DETECTADOS								
Alvo	Tempo Atual	Distância	Azimuth	Elevação	RCS	IFF	Vel. Radial	GP
1	t_i	R_1	Az_1	El_1	RCS_1	IFF_1	Vr_1	GP_1
2	t_i	R_2	Az_2	El_2	RCS_2	IFF_2	Vr_2	GP_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N	t_i	R_N	Az_N	El_N	RCS_N	IFF_N	Vr_N	GP_N

Tabela 5.2: Variável *AlvosDetectados*

A função que determina o grau de periculosidade é dada pela equação 4.1 no capítulo 4, e mostrada novamente na equação 5.2 já com os valores dos coeficientes usados no presente trabalho. Percebe-se que o máximo valor que GP_i pode assumir é 10 (considerando RCS_i mínimo igual a $1m^2$).

$$GP_i = 5 \cdot (1 - \hat{R}_i) - 3 \cdot \hat{v}_{Ri} + (1 - \hat{H}_i) + 0.5 \cdot IFF_i + \frac{0.5}{RCS_i} \quad (5.2)$$

Onde \hat{x} indica o valor normalizado de x ($\hat{x} = x/\max(x)$).

Antes de passar essa tabela para o próximo bloco, um limiar de grau de periculosidade é usado no intuito de diminuir o processamento em seguida, garantindo que só permaneçam na tabela vetores aéreos que possuam um grau de periculosidade que ultrapassem esse limiar. Essa medida é interessante pois vetores aéreos que muito provavelmente não sejam ameaçadores não ocuparão tempo nem espaço no processamento.

5.1.6 Cálculo de Tempo necessário em cada tarefa

A variável *AlvosDetectados*, agora atualizada com os valores de grau de periculosidade, é a entrada da função *CalculoTempo.m* a qual fornece o tempo de iluminação necessário em cada vetor aéreo. Esse cálculo utiliza como parâmetro o GP de cada vetor aéreo, o qual define quanto de acurácia e precisão a medida precisa ter. A partir das probabilidade de detecção mínima e probabilidade de falso alarme máxima, é possível encontrar a SNR mínima necessária para tal, mostrada na equação 5.3 (Skolnik 2008).

$$SNR_1 = \ln\left(\frac{0.62}{P_{fal}}\right) + 0.12\ln\left(\frac{0.62}{P_{fal}}\right) \cdot \ln\left(\frac{P_{det}}{1 - P_{det}}\right) + 1.7\ln\left(\frac{P_{det}}{1 - P_{det}}\right) \quad (5.3)$$

Sendo P_{det} e P_{fal} as probabilidade de detecção mínima e probabilidade de falso alarme máxima admissíveis respectivamente.

Conhecendo-se a SNR fornecida durante a operação de vigilância, onde o número de pulsos enviados (n_p) é conhecido, calcula-se o número de pulsos que precisa ser integrado (N_{int}) para que atinja o valor de SNR necessário (SNR_1). Assim, encontra-se o tempo de iluminação suficiente para alcançar esse valor de SNR. A equação 5.4 indica esse procedimento.

$$N_{int} = \lceil SNR_1 / (SNR/n_p) \rceil$$

$$TI = N_{int} \cdot \frac{1}{PRF} + \frac{2R}{c} \quad (5.4)$$

Sendo N_{int} o número de pulsos integrados necessários para atingir SNR_1 , TI o tempo de iluminação e $\lceil x \rceil$ a operação de arredondamento para o maior inteiro mais próximo de x .

Em alguns casos, o valor de N é maior do que o valor de N_{int} , ou seja, o número de pulsos necessários para rastrear o vetor aéreo com maior precisão é menor do que o número de pulsos enviados durante as operações de busca ou vigilância. Isso não revela uma incoerência, pois como o sistema de radar precisa transmitir com uma potência suficiente para levar a onda eletromagnética até um determinado alcance máximo, vetores aéreos localizados em alcances menores do que esse recebem uma potência mais do que suficiente, garantindo uma alta SNR. Assim, uma análise que pode ser feita nesse bloco, é diminuir a potência de transmissão proporcionalmente à distância em que se encontra o vetor aéreo, e a partir daí calcular o tempo de iluminação necessário. Essa análise se torna importante quando se quer reduzir o recurso *energia* em cada tarefa no intuito de realizar diferentes tarefas simultaneamente.

Uma outra característica desse bloco é a possibilidade de fixar o valor de TI até que determinado alvo seja abatido. Quando se quer utilizar o radar como radar de tiro, o feixe principal do diagrama da antena precisa permanecer no alvo até que ele seja alvejado. Esse bloco aceita essa funcionalidade, onde TI seria dado pelo operador.

Independente da análise feita durante a execução da função *CalculaTempo.m*, sua saída é uma atualização da variável *AlvosDetectados*, conforme mostrada na tabela 5.3.

ALVOS DETECTADOS									
Alvo	Tempo Atual	Distância	Azimuth	Elevação	RCS	IFF	Vel. Radial	GP	TI
1	t_i	R_1	Az_1	El_1	RCS_1	IFF_1	Vr_1	GP_1	TI_1
2	t_i	R_2	Az_2	El_2	RCS_2	IFF_2	Vr_2	GP_2	TI_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
N	t_i	R_N	Az_N	El_N	RCS_N	IFF_N	Vr_N	GP_N	TI_N

Tabela 5.3: Variável *AlvosDetectados*

Durante as operações de busca ou vigilância a variável *AlvosDetectados* é modificada a cada mudança de direcionamento do feixe principal da antena. Para que não se perda os dados já coletados, uma nova variável, chamada *VetoresAereos* concatena essas tabelas a cada instante de tempo. Dessa forma, essa última pode ser dada, por exemplo, pela tabela 5.4.

VETORES AÉREOS									
Alvo	Tempo Atual	Distância	Azimuth	Elevação	RCS	IFF	Vel. Radial	GP	TI
1	t_i	R_1	Az_1	El_1	RCS_1	IFF_1	Vr_1	GP_1	TI_1
2	t_i	R_2	Az_2	El_2	RCS_2	IFF_2	Vr_2	GP_2	TI_2
1	t_{i+1}	R_1	Az_1	El_1	RCS_1	IFF_1	Vr_1	GP_1	TI_1
2	t_{i+1}	R_2	Az_2	El_2	RCS_2	IFF_2	Vr'_2	GP'_2	TI'_2
1	t_{i+2}	R'_1	Az_1	El_1	RCS_1	IFF_1	Vr_1	GP'_1	TI'_1
1	t_{i+3}	R'_1	Az'_1	El_1	RCS_1	IFF_1	Vr_1	GP''_1	TI''_1
3	t_{i+3}	R_3	Az_3	El_3	RCS_3	IFF_3	Vr_3	GP_3	TI_3
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
N	t_i	R_N	Az_N	El_N	RCS_N	IFF_N	Vr_N	GP_N	TI_N

Tabela 5.4: Variável *VetoresAereos*

Percebe-se que um mesmo vetor aéreo está em várias linhas da tabela. Isso acontece porque o lóbulo principal do diagrama criado pelo arranjo de antenas não é uma função impulso, fornecendo energia suficiente para detecção em azimutes adjacentes ao principal. Assim, é necessário que se tenha uma função que faça a integração de informações pertencentes a um único vetor aéreo, a fim de garantir uma única linha de dados para cada um deles.

5.1.7 Integração

Como para um mesmo vetor aéreo podem existir muitas linhas de informação na variável *VetoresAereos*, é necessário que se faça uma integração desses dados. Considerando que já se saiba de antemão de que vetor aéreo são determinadas informações (a área de fusão de dados estuda a relação vetor aéreo-informação, entre outras coisas e está fora do escopo do presente trabalho), é necessário fazer um agrupamento delas para que diminua o tempo de processamento e a redundância de dados. A função *Integracao.m* é responsável por fazer essa integração e fornece como saída uma tabela contendo uma linha de informação para cada vetor aéreo detectado durante a tarefa realizada conforme mostrado na tabela 5.5. Essa função simplesmente tira a média dos valores encontrados, mantendo na segunda coluna o último instante de tempo no qual o vetor foi detectado.

VETORES AÉREOS									
Alvo	Tempo Atual	Distância	Azimute	Elevação	RCS	IFF	Vel. Radial	GP	TI
1	t_{i+3}	\bar{R}_1	\bar{Az}_1	\bar{El}_1	\bar{RCS}_1	\bar{IFF}_1	\bar{Vr}_1	\bar{GP}_1	\bar{TI}_1
2	t_{i+1}	\bar{R}_2	\bar{Az}_2	\bar{El}_2	\bar{RCS}_2	\bar{IFF}_2	\bar{Vr}_2	\bar{GP}_2	\bar{TI}_2
3	t_{i+3}	\bar{R}_3	\bar{Az}_3	\bar{El}_3	\bar{RCS}_3	\bar{IFF}_3	\bar{Vr}_3	\bar{GP}_3	\bar{TI}_3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
N	t_i	\bar{R}_N	\bar{Az}_N	\bar{El}_N	\bar{RCS}_N	\bar{IFF}_N	\bar{Vr}_N	\bar{GP}_N	\bar{TI}_N

Tabela 5.5: Variável *VetoresAereos*

5.1.8 Tempo sem ser visto de cada alvo

Antes de se calcular a função objetivo que ordena as tarefas e escolher qual será realizada, ainda falta indicar quanto tempo cada vetor aéreo ficou sem ser visto pelo sistema de radar. Com base no tempo indicado na variável *VetoresAereos* e no tempo atual de execução, é possível encontrar a quanto tempo o vetor aéreo não é visto pelo sistema (TSV - Tempo Sem ser Visto).

Esse tempo é importante pois a cada tempo que passa sem um determinado vetor aéreo ser iluminado, sua prioridade cresce perante às outras tarefas. Por exemplo, enquanto o sistema estiver rastreando um, ele deixa de observar todos os outros, e seus TSVs vão aumentando. Na hora de escolher a próxima tarefa, a prioridade dos outros deverá crescer em relação ao vetor aéreo que acabou de ser rastreado, pois o TSV deste passou a ser nulo.

A coluna contendo os valores de TSVs junto com a variável *VetoresAereos* são as entradas da função *FuncaoObjetivo.m*.

5.1.9 Gerenciamento de Recursos - Escolha da tarefa

Esse bloco abriga a “inteligência” do sistema. Tendo os valores do grau de periculosidade de cada vetor aéreo, o tempo necessário de iluminação em cada um deles e a última vez que cada um foi visto, a função *FuncaoObjetivo.m* calcula o fator α para cada vetor aéreo conforme mostrado na equação 5.5.

$$\alpha = A \cdot \widehat{GP}^\beta + B \cdot \widehat{TI}^\gamma + C(g) \cdot \widehat{TSV}^\delta \quad (5.5)$$

Com base nesse fator, ordena-os de forma decrescente, onde a ordem indica a sequência de rastreio. Como as tarefas de busca ou vigilância também precisam entrar no cálculo, são fornecidos valores de grau de periculosidade previamente escolhidos e o tempo de realização da tarefa completa para cada uma delas, possibilitando a inserção no cálculo de α . Os valores dos coeficientes mostrados na equação 5.5 são parametrizados e podem ser modificados diretamente no corpo da função. Além disso, como o simulador é modular, qualquer mudança na métrica utilizada por essa função não acarretará problemas futuros na estrutura do simulador, sendo possível assim, tornar a *FuncaoObjetivo.m* mais complexa.

5.1.10 Criação do Diagrama da Antena em Rastreo

Esse bloco só é utilizado quando a tarefa a ser realizada for a de rastreo. Caso contrário, quando a execução do simulador chega nesse ponto, são lidos diagramas já construídos pelo bloco **Diagrama da Antena em Busca e Vigilância** e o laço de execução continua pelo bloco **Deteção** e assim sucessivamente.

Considerando que a tarefa seja de rastreo, esse diagrama é responsável por gerar o diagrama de antena dada as limitações impostas pelo cenário e pelo **Gerenciamento de Recursos**. O cenário indica se há *clutters* ou não, e caso exista, a quantidade de energia direcionada a esses pontos será muito pequena, assim como se houver algum tipo de interferência. Já o gerenciador indica qual vetor aéreo precisa ser rastreado, forçando o máximo direcionamento de energia para o local onde ele se encontra.

Esse bloco faz uso do critério de Desigualdades Matriciais Lineares discutido no capítulo 3. Para implementá-lo em Matlab, fez-se uso de um *toolbox* chamado YALMIP, que pode ser encontrado gratuitamente na internet.

5.2 Propriedades cognitivas inseridas no Simulador

O simulador possui algumas propriedades cognitivas de decisão já inseridas em seu contexto dentro do bloco **Gerenciamento de Recursos**. Além de ordenar as tarefas a partir de um fator α calculado para cada vetor aéreo, esse bloco também foi programado para realizar algumas escolhas automaticamente. Essas escolhas são:

- Setores de Busca - Considerando que haja setores de busca previamente escolhidos pelo usuário, através das variáveis *AtivacaoSetores* e *Setores*, já mencionadas na seção **Arquivos de Parâmetros**, o gerenciador utiliza o valor definido na variável *GPBusca*, referente ao grau de periculosidade para essa tarefa, e a insere no cálculo de α , garantindo a disputa dessa tarefa na ordem de prioridades.
- Interferências ou *clutters* - Considerando que já se saiba onde encontram-se interferências e *clutters* (na prática esse conhecimento é factível, basta o radar fazer um levantamento do cenário antes de sua operação propriamente dita), o gerenciador informa ao gerador de diagramas que esses pontos devem ser menos irradiados, evitando assim retorno de sinais fortes que não têm informação nenhuma. Esses sinais acabam prejudicando a recepção de sinais provenientes da reflexão de alvos de interesse.
- Vetores aéreos próximos - Assim como interferências e *clutters*, um vetor aéreo localizado muito próximo do radar (note que essa medida é relativa e por isso é parametrizada na variável *Rprox*) também atrapalha na recepção de outros vetores aéreos. Isso se deve ao fato de que por estar perto, energias provenientes de lóbulos secundários são suficientes para que ele seja visto pelo radar. Dessa forma, o gerenciador reconhece vetores aéreos localizados em raios inferiores a esse fornecido, e minimiza a energia emitida nas direções onde eles se encontram quando o feixe principal da antena não estiver direcionado a eles.

- Busca por alvo perdido - Após a tarefa de vigilância, uma tabela é formada contendo todas as informações de cada vetor aéreo (variável *VetoresAereos*). Como detalhado anteriormente, define-se a ordem das tarefas a serem realizadas, porém com informações antigas. Por exemplo, um vetor aéreo que estava em uma posição próxima de *azInicial* já está agora em outro ponto. Claro que os intervalos de tempo são pequenos impossibilitando uma mudança muito brusca dos vetores, mas é possível que eles estejam em outro azimute. Além disso, vetores mal intencionados podem realizar manobras no intuito de “se esconder” do radar, indo para trás de uma montanha ou voando muito baixo. Sendo assim, caso seja atribuída uma tarefa de rastreio a um vetor aéreo e o radar após ter o lóbulo principal do seu diagrama de radiação direcionado ao ponto informado e não for possível detectá-lo, o sistema automaticamente cria uma busca nos azimutes próximos ao azimute que foi informado na última vez. Essa busca para quando o vetor aéreo é encontrado ou após um determinado intervalo de tempo caso ele não seja encontrado, pois ele pode ter pousado ou colidido.

Essas inteligências são exemplos das possibilidades existentes em radares cognitivos multifuncionais. O campo de atividades inteligentes é vasto, podendo ser acrescentadas mais características cognitivas ao simulador.

Simulações e Resultados

O presente capítulo tem por finalidade mostrar o funcionamento do simulador criado utilizando tanto a otimização do diagrama de arranjo de antenas quanto o critério de priorização de tarefas. Além disso, apresenta-se as capacidades de cognição já implementadas nesse simulador. Dentre diversas simulações realizadas, foram selecionadas duas para serem documentadas nessa dissertação.

Na primeira, um exemplo simples, com poucos vetores aéreos, é realizado. O objetivo é somente apresentar a proposta do simulador, contendo a construção dos diagramas de busca, vigilância ou rastreamento e escolha de vetores aéreos para rastrear. Já a segunda simulação visa apresentar um cenário mais complexo, contendo diversos vetores aéreos, *clutters* e interferências, e utilização de todas as propriedades cognitivas já implementadas mostradas no capítulo 5.

6.1 Exemplo 1

Esse exemplo visa apresentar a capacidade de escolha do sistema dentre as possíveis tarefas a serem realizadas. Ao término de cada tarefa, o sistema atualiza os parâmetros de entrada da função objetivo dada na equação 5.5 e define qual será desempenhada e por quanto tempo. O cenário é livre de *clutters* e de interferências e somente três vetores aéreos permanecem no espaço aéreo vigiado pelo radar durante todo o tempo de execução. Como a característica principal desse exemplo é a simplicidade, ele foi escolhido de tal forma que nenhuma propriedade cognitiva implementada no sistema precisasse ser empregada. Para melhor visualização, as principais características dessa simulação são mostradas em tópicos:

- Número de vetores aéreos no cenário: 3
- *Clutters* ou interferências: Inexistentes
- Setores de busca pré-determinados: Inexistentes
- Tempo simulado de atividade aérea: 3 minutos
- Discretização temporal: 0.05 segundos

- Área azimutal de vigilância: De -60° a 60°
- Limiar de detecção: 36dB
- Velocidade de rotação do feixe principal em vigilância: 10 rpm ($60^\circ/s$)

As trajetórias completas de cada vetor aéreo são mostradas na figura 6.1 em sistema de coordenadas cartesianas, em metros, e na figura 6.2 em sistema de coordenadas polares, com os raios dados em metros e os ângulos em graus.

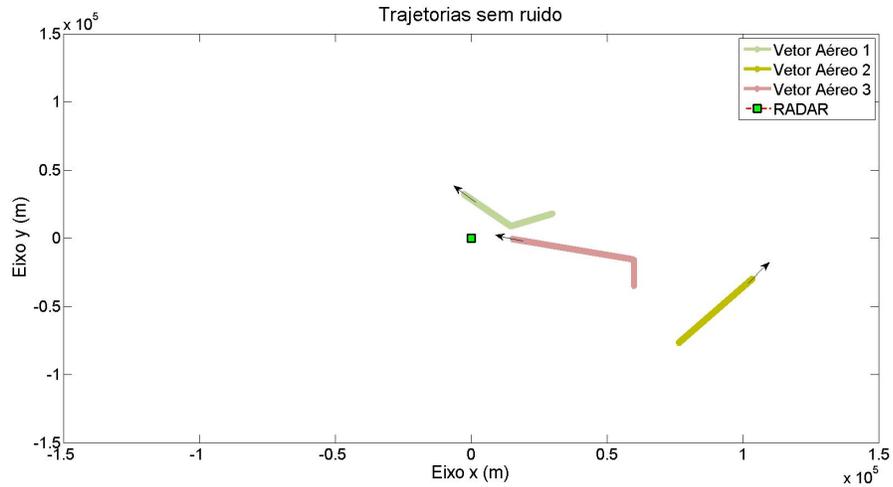


Figura 6.1: Trajetórias dos vetores aéreos em sistema de coordenadas cartesianas

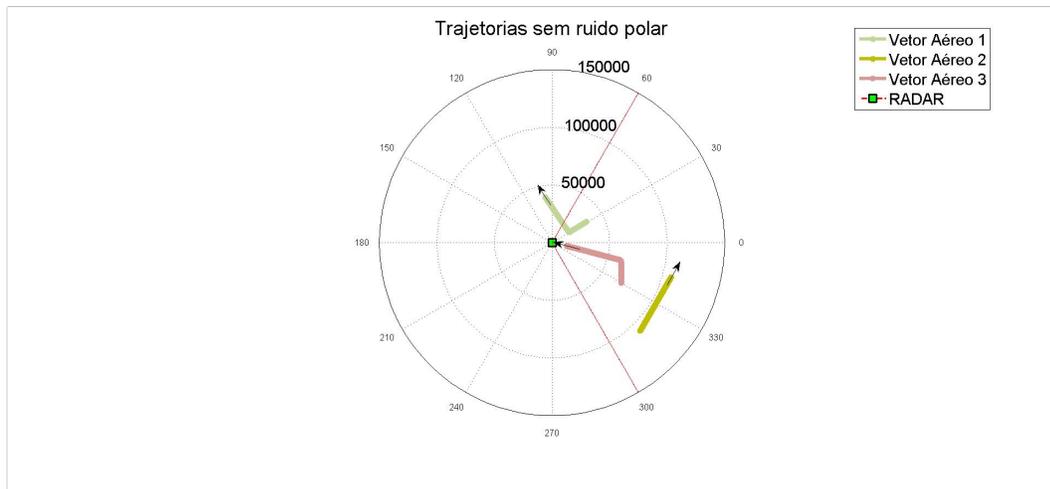


Figura 6.2: Trajetórias dos vetores aéreos em sistema de coordenadas polares

Analisando as figuras 6.1 e 6.2, percebe-se que o vetor aéreo 1 encontra-se, em uma primeira instância em uma situação que aparentemente oferece maior risco ao sistema de radar, pois além dele estar com seu vetor velocidade na direção radial e sentido de encontro ao radar, é

o vetor mais próximo do sistema. Em um determinado instante de tempo ($t = 75s$), o vetor aéreo 1 muda sua trajetória, passando a se afastar do sistema em trajetória retilínea a partir de $t = 76.8s$. No entanto, um outro vetor, o vetor aéreo 3, antes de $t = 75s$, em $t = 60s$, já começa a alterar sua trajetória e passa a se aproximar do sistema de radar com vetor velocidade na direção radial e sentido de encontro ao radar em $t = 68s$, mantendo essa trajetória até o fim da simulação. A partir de um certo ponto, ele passa a ser considerado uma ameaça maior do que o vetor aéreo 1. Simultaneamente a isso, um outro vetor aéreo (vetor aéreo 2) aparentemente não oferece perigo nenhum, estando mais distante do radar do que os outros e em uma trajetória que se afasta do radar. A figuras 6.3 e 6.4 mostram a distância e a velocidade radial de cada um dos vetores aéreos em relação ao radar em cada instante de tempo respectivamente, comprovando a análise descrita acima.

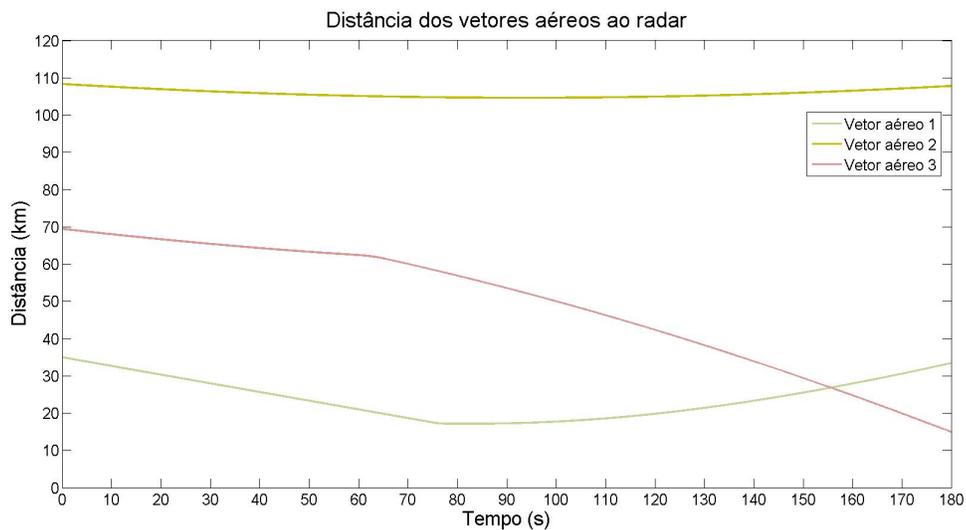


Figura 6.3: Distâncias dos vetores aéreos ao radar referentes ao Exemplo 1

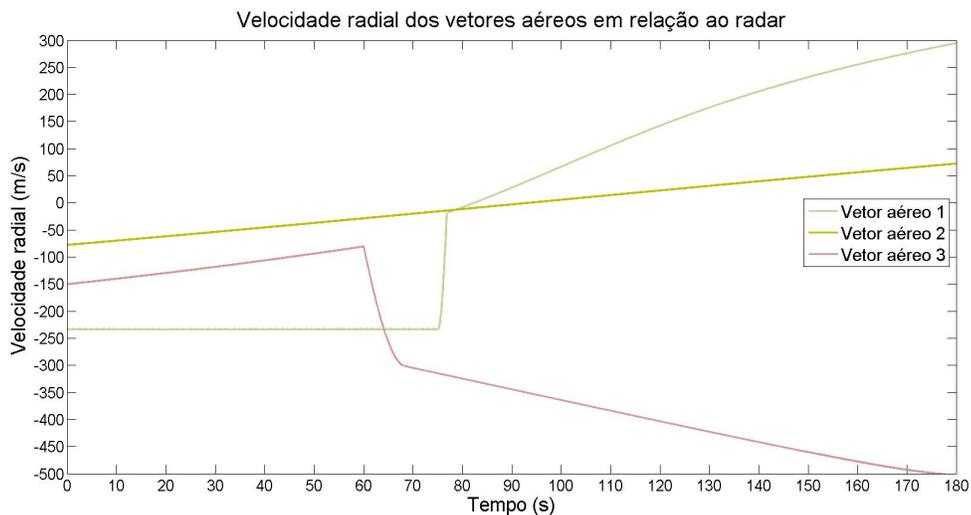


Figura 6.4: Velocidades radiais dos vetores aéreos ao radar referentes ao Exemplo 1

As trajetórias mostradas nas figuras 6.1 e 6.2 e as distâncias e velocidades indicadas nas figuras 6.3 e 6.4 independem da ação do radar. Para que o sistema tenha informações sobre os vetores aéreos é preciso que ele os detecte. Sendo assim, é importante que de tempos em tempos o sistema realize a tarefa de vigilância, no intuito de atualizar o cenário em que se encontra. Dependendo da SNR recebida pelo radar, o vetor aéreo será detectado ou não.

Percebe-se assim, que quando o sistema é ligado, antes de realizar qualquer tarefa, uma vigilância precisa ser feita. Momentos relativos à primeira vigilância, iniciada em $t = 0s$ e finalizada em $t = 2s$, junto com a SNR de cada vetor aéreo no respectivo momento, são mostrados na figura 6.5. Note que dependendo do limiar de detecção escolhido pelo usuário, determinados vetores aéreos podem ser detectados de forma errada, não condizente com o azimute em que se encontram. Esse pode ser o caso em $t = 0s$ se o limiar de detecção for inferior à $36dB$. O vetor aéreo 1 seria detectado em -60° quando na verdade ele se encontra em aproximadamente 30° .

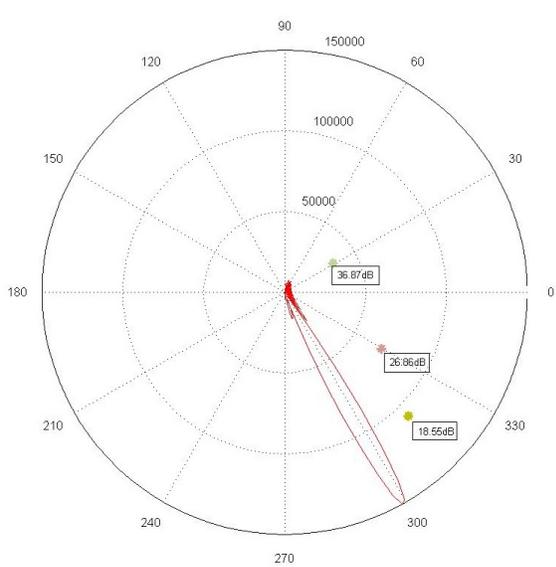
Como é importante realizar vigilância frequentemente a fim de atualizar o cenário, essa tarefa precisa estar presente na lista de tarefas do sistema. Assim, é necessário atribuir a ela um grau de periculosidade (GP) fixo para que se consiga calcular um fator α (equação 5.5) para a tarefa de vigilância, e essa possa concorrer com as outras tarefas. Esse valor é previamente escolhido pelo operador de tal forma que seja tão maior quanto maior for a possibilidade de aparição de novos vetores no espaço aéreo vigiado pelo radar. O tempo de iluminação (TI) da vigilância é dado pela razão entre o setor azimutal vigiado e a velocidade de rotação do feixe da antena. No caso desse exemplo, $TI_{vig} = 2s$.

6.1.1 Resultados

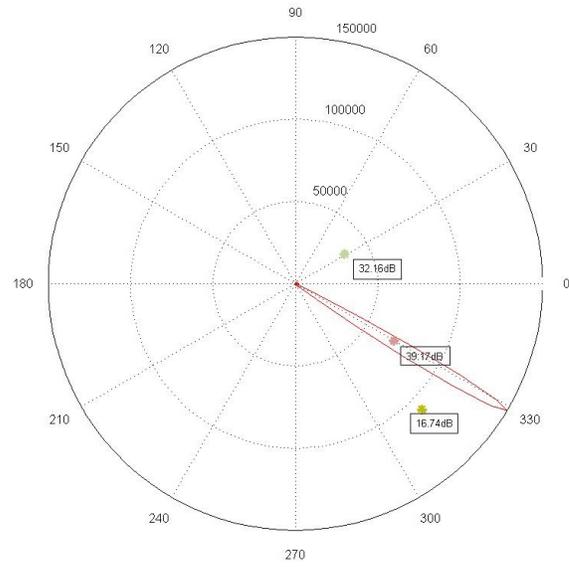
A partir da primeira vigilância mostrada na seção anterior, há a integração dos dados obtidos, e assim calcula-se o grau de periculosidade, o tempo de iluminação e o tempo sem ser visto de cada vetor aéreo. Com isso, o fator α é calculado para cada vetor aéreo, assim como para as tarefas de busca e de vigilância, e a partir disso, a tarefa que obtiver o máximo α será realizada nesse instante. É importante citar que dentro das tarefas de busca e vigilância, o tempo sem ser visto de cada vetor é computado a partir do momento que ele deixa de ser iluminado, e não a partir do momento que a tarefa termina. Para o exemplo mencionado, as tarefas realizadas em cada instante de tempo estão mostradas na tabela 6.1.

Percebe-se que os resultados são coerentes com o que foi discutido na seção anterior. Primeiramente as tarefas se revezam entre vigilância e rastreamento do vetor aéreo 1. A partir de um instante entre $70s$ e $80s$, onde o vetor aéreo 1 começa a mudar sua trajetória, um intervalo de tempo indica que o vetor aéreo 3 também foi rastreado, junto com o vetor aéreo 1 ou não (dois vetores ou mais podem ser rastreados ao mesmo tempo caso estejam em um mesmo azimute). A partir daí, a frequência com que o vetor aéreo 3 é visto aumenta até atingir um valor α_3 ¹ que supera de vez o valor de α_1 em todos os instantes a partir desse. Analisa-se também, que o vetor aéreo 2 apesar de possuir um valor de grau de periculosidade acima do limiar escolhido para tal (visto que ele possui um fator de prioridade em todos os instantes e participa da disputa entre as tarefas), só é visto quando há vigilância, não sendo rastreado pelo sistema nenhuma vez. Isso é coerente pois dentre os três vetores aéreos, ele é o que segue, aparentemente, uma

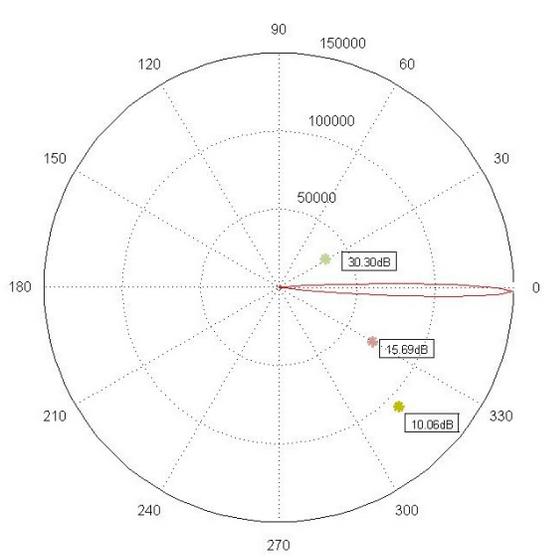
¹ α_i indica o fator prioridade do vetor aéreo i e α_{vig} o fator prioridade da tarefa Vigilância



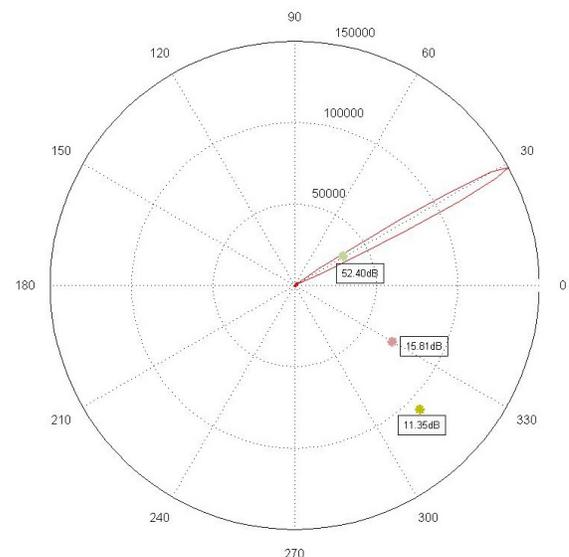
(a) $t=0s$



(b) $t=0.5s$



(c) $t=1s$

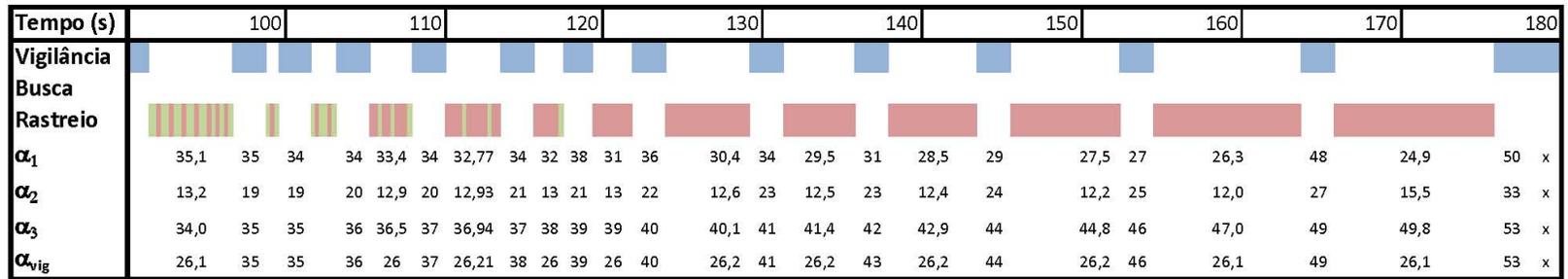
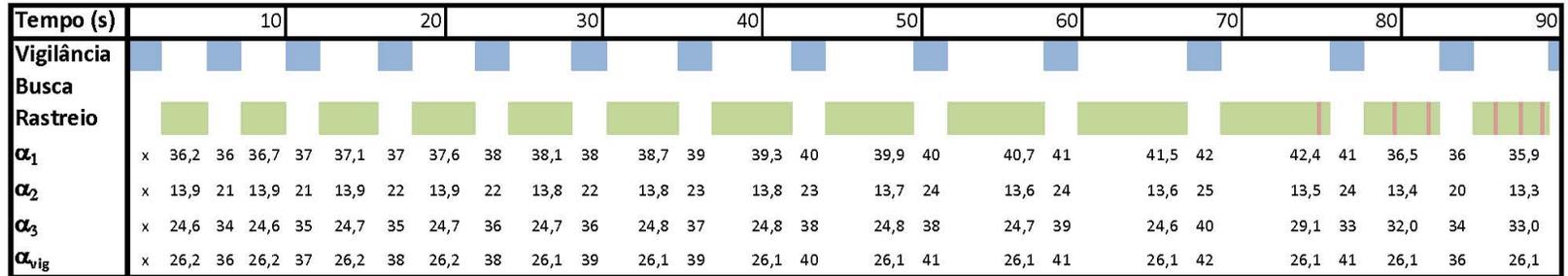


(d) $t=1.5s$

Figura 6.5: Instantes relativos à primeira vigilância realizada pelo radar

trajetória que não oferece risco ao sistema e tem suas características atualizadas durante a tarefa de vigilância, a qual atualiza as informações de todos os vetores aéreos contidos no cenário. O valor dos fatores α s mostrados na tabela 6.1 são referentes ao instante inicial da tarefa.

Tabela 6.1: Tarefas realizadas por instante de tempo referentes ao Exemplo 1



6.2 Exemplo 2

Esse exemplo visa apresentar a capacidade de escolha do sistema dentre as possíveis tarefas a serem realizadas e a influência de interferências ou *clutters* presentes no cenário no sistema. Essa última exige que quando haja tarefas do tipo rastreamento, o diagrama gerado pela antena seja otimizado de tal maneira que emita o mínimo de energia nos azimutes onde esses efeitos externos estejam presentes. Além disso, um setor de busca predefinido é selecionado, competindo dessa forma entre as tarefas a serem realizadas.

Ao término de cada tarefa, o sistema atualiza os parâmetros de entrada da função objetivo dada na equação 5.5 e define qual será desempenhada e por quanto tempo. Sete vetores aéreos estão presentes no espaço aéreo vigiado pelo radar, porém não durante todo o tempo de execução, ou seja, alguns “desaparecem” durante a operação, enquanto outros “aparecem”. A característica principal desse exemplo é mostrar toda a capacidade funcional do simulador, inclusive propriedades cognitivas já implementadas no sistema. Para melhor visualização, as principais características dessa simulação são mostradas em tópicos:

- Número de vetores aéreos no cenário: 7
- *Clutters* ou interferências: Sim, nos azimutes -10° e 35° .
- Setores de busca pré-determinados: Sim, de 30° a 50° .
- Tempo simulado de atividade aérea: 2 minutos
- Discretização temporal: 0.1 segundos
- Área azimutal de vigilância: De -50° a 50°
- Limiar de detecção: 40dB
- Velocidade de rotação do feixe principal em vigilância: 4.167 rpm ($25^\circ/s$)

As trajetórias completas de cada vetor aéreo são mostradas na figura 6.6 em sistema de coordenadas cartesianas, em metros, e na figura 6.7 em sistema de coordenadas polares, com os raios dados em metros e os ângulos em graus.

As figuras 6.6 e 6.7 mostram as trajetórias de cada vetor aéreo, não detalhando o instante de tempo em que cada vetor aéreo surgiu no espaço aéreo ou desapareceu. Como são muitos vetores aéreos, a descrição de cada um deles será feita em tópicos. De antemão, os vetores aéreos já presentes no cenário no instante zero são os de número 1 a 5.

- **Vetor Aéreo 1**

O vetor aéreo 1 encontra-se no instante $t = 0s$ a uma distância igual a 71063m do radar, e com sentido de trajetória na direção vertical, não apresentando assim um risco aparente ao sistema. No entanto, no instante $t = 50s$ ele começa a alterar sua trajetória e em $t = 57s$ ele já está mais próximo do radar, com vetor velocidade na direção radial e sentido de encontro a ele. A partir desse momento ele realiza um movimento retilíneo uniformemente variado em direção ao radar até o fim da simulação, passando a aumentar seu grau de periculosidade a cada instante de tempo.

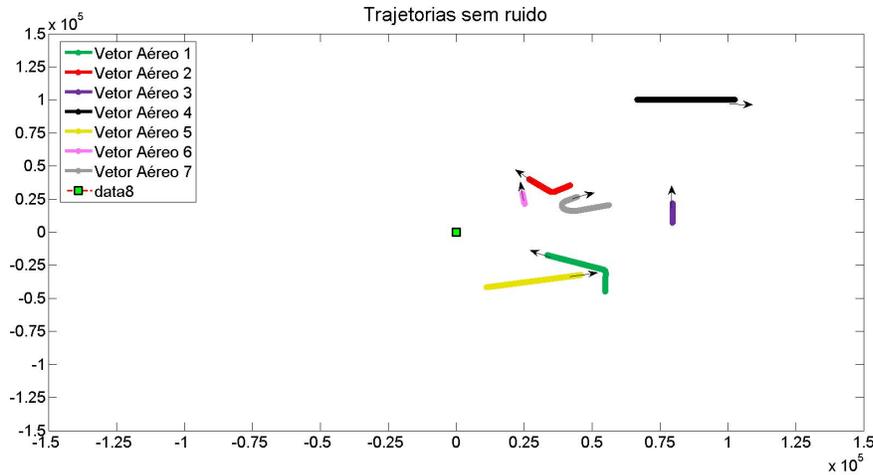


Figura 6.6: Trajetórias dos vetores aéreos em sistema de coordenadas cartesianas

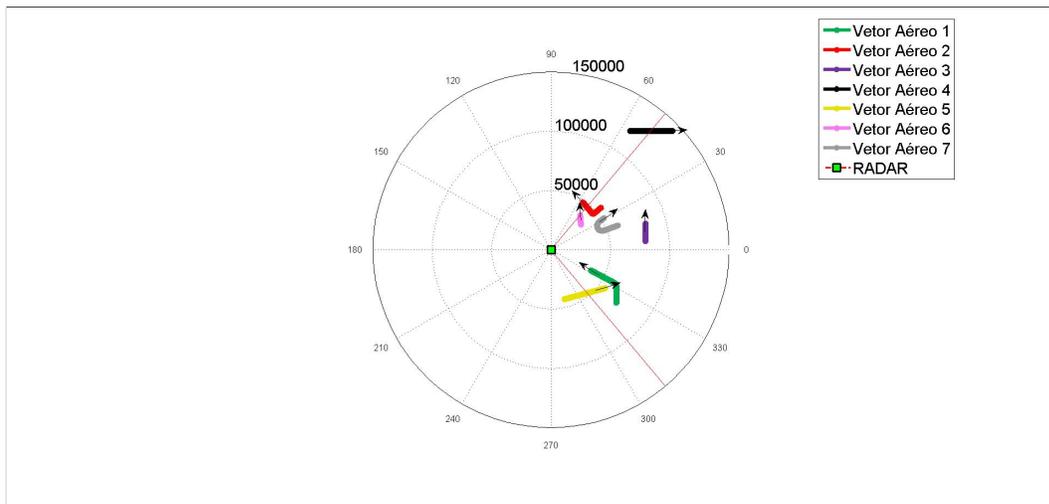


Figura 6.7: Trajetórias dos vetores aéreos em sistema de coordenadas polares

- **Vetor Aéreo 2**

O vetor aéreo 2 encontra-se, em uma primeira instância em uma situação que aparentemente oferece maior risco ao sistema de radar, pois além dele estar com seu vetor velocidade na direção radial e sentido de encontro ao radar, é o vetor mais próximo do sistema (dentro da área visível do radar). Em um determinado instante de tempo ($t = 30s$), o vetor aéreo 2 começa a mudar a sua trajetória, passando a seguir uma trajetória quase tangencial a uma circunferência centrada no radar em $t = 38s$, diminuindo bastante o módulo de sua velocidade radial. Com o passar do tempo ele acaba saindo do campo de visada do sistema, até desaparecer do cenário em $t = 70s$.

- **Vetor Aéreo 3**

O vetor aéreo 3 inicia sua trajetória bem distante do radar, a 80000m. Sua trajetória

aparentemente não oferece risco ao sistema, pois permanece retilínea e uniforme no sentido vertical durante todo o tempo em que se encontra no cenário. Inclusive com o passar do tempo ele se afasta cada vez mais do radar. Sua trajetória termina em $t = 100s$.

- **Vetor Aéreo 4**

O vetor aéreo 4 inicia sua trajetória no ângulo azimutal de 56.31° em relação ao sistema, ou seja, fora do campo de visada do radar. Em $t = 57.5s$, o vetor aéreo adentra ao campo de visada do radar. No entanto, sua trajetória é de afastamento em relação ao radar, além de se manter sempre bem distante dele ($R_4 \geq 120km$ em qualquer tempo maior do que $0s$).

- **Vetor Aéreo 5**

O vetor aéreo 5 inicia sua trajetória no ângulo azimutal de -75° em relação ao sistema, ou seja, fora do campo de visada do radar. No entanto, diferente do vetor aéreo 4, quando ele adentra ao campo de visada, em $t = 67.2s$, passa a ser o vetor mais próximo do radar. Sua trajetória é retilínea e uniforme durante toda a simulação.

- **Vetor Aéreo 6**

O vetor aéreo 6 inicia sua trajetória em $t = 80s$, decolando em um ponto próximo ao radar ($R_6 = 33km$), tornando-se o vetor mais próximo do radar naquele instante. Mesmo tendo sua velocidade radial pequena, ele encontra-se bem perto do radar, podendo ser um vetor que ofereça algum risco. Em $t = 119,9s$ ele sai do campo de visada do radar, continuando como o vetor aéreo mais próximo dele.

- **Vetor Aéreo 7**

O vetor aéreo 7 inicia sua trajetória em $t = 60s$, decolando em um ponto distante de aproximadamente $60km$, mas com um vetor velocidade de módulo relativamente alto na direção radial e sentido de encontro ao radar. Dessa forma, ele passa a ser uma possível ameaça ao sistema. No entanto, em $t = 85s$ ele começa a seguir uma trajetória curvilínea, passando a desenvolver uma trajetória retilínea em seguida, se afastando do radar em $t = 109s$, diminuindo dessa forma seu grau de periculosidade.

No caso desse exemplo, diferente do primeiro, a partir de um determinado momento é difícil prever qual tarefa será realizada pelo radar, dado que o número de vetores aéreos é maior e o início e término de suas trajetórias ocorrem em tempos diferentes. As figuras 6.8 e 6.9 mostram a distância e a velocidade radial de cada um dos vetores aéreos em cada instante. Assim, é possível verificar os instantes em que há mudanças significativas em alguma trajetória. Já que no presente exemplo não foram considerados indicações de *IFF* e a altitude de todos os vetores são iguais é possível prever qual tarefa, dentre os rastreios, será realizada nesses instantes. Os vetores aéreos que não constam em determinados valores temporais indicados nas figuras 6.8 e 6.9 não se encontram no cenário nos respectivos instantes.

As trajetórias mostradas nas figuras 6.6 e 6.7 e os valores indicados nas figuras 6.8 e 6.9 independem da ação do radar. Para que o sistema tenha informações sobre os vetores aéreos é preciso que ele os detecte. Sendo assim, é importante que de tempos em tempos o sistema realize a tarefa de vigilância, no intuito de atualizar o cenário em que se encontra. Dependendo da *SNR*

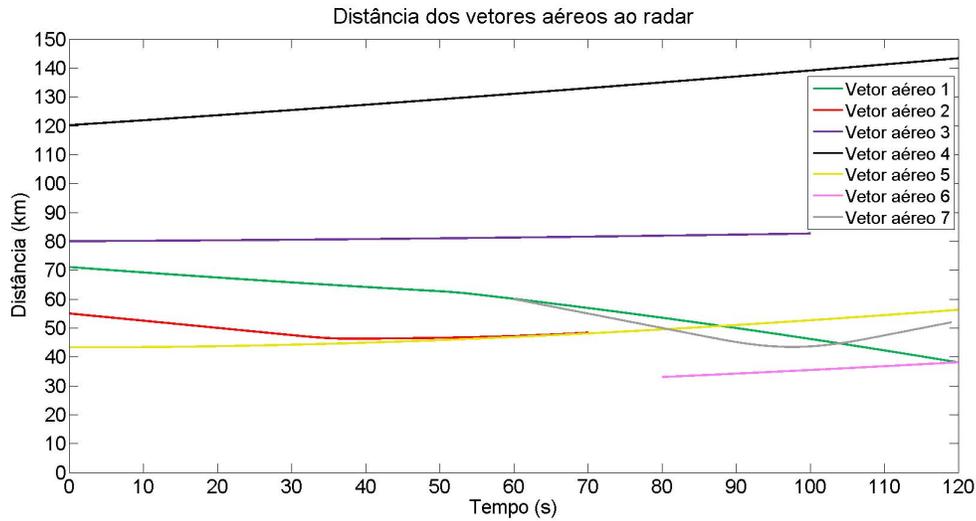


Figura 6.8: Distâncias dos vetores aéreos ao radar referentes ao Exemplo 1

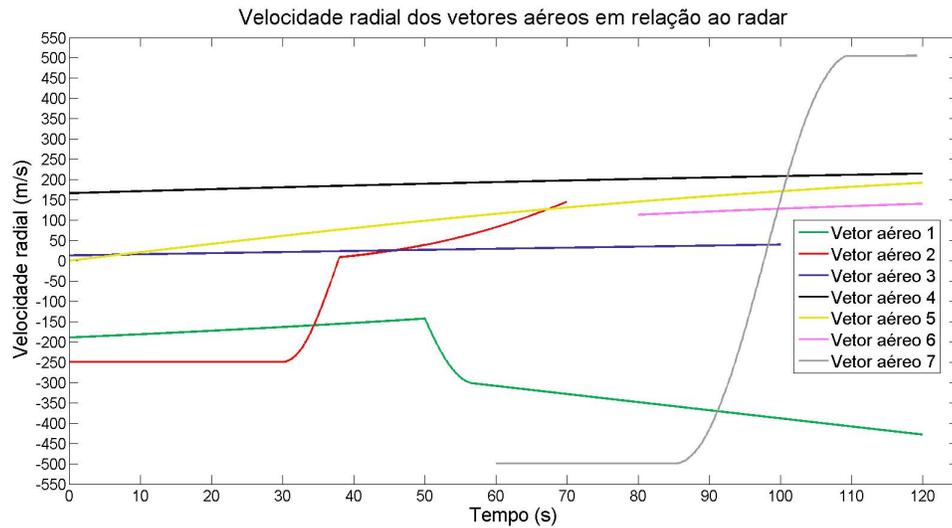


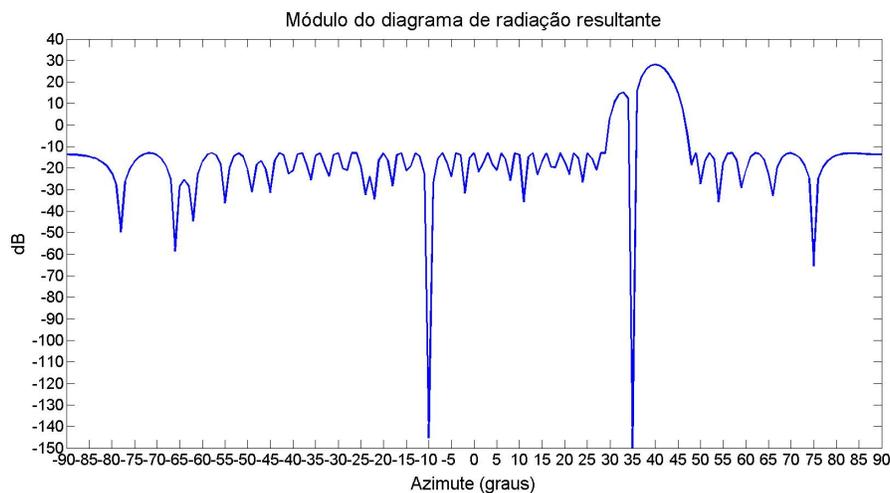
Figura 6.9: Velocidades radiais dos vetores aéreos ao radar referentes ao Exemplo 1

recebida pelo radar, o vetor aéreo será detectado ou não. Como já foi mostrado na figura 6.5, dependendo do limiar de detecção escolhido pelo usuário, determinados vetores aéreos podem ser detectados de forma errada, não condizente com o azimute em que se encontram. Também pode acontecer de um vetor aéreo que se encontra muito longe e tem uma baixa RCS não ser detectado, como acontece no presente exemplo durante a primeira vigilância. O vetor aéreo de número 1 retorna um sinal com $SNR = 39.06$ em seu valor máximo, o qual não ultrapassa o valor de limiar de detecção que é igual a $40dB$.

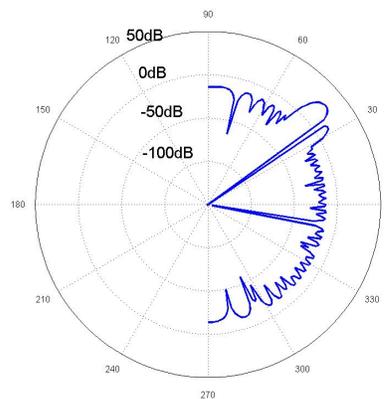
Como é importante realizar vigilância frequentemente a fim de atualizar o cenário, essa tarefa precisa estar presente na lista de tarefas do sistema. Assim, é necessário atribuir a ela um grau de periculosidade (GP) fixo para que se consiga calcular um fator α (equação 5.5) para a tarefa de vigilância, e essa possa concorrer com as outras tarefas. Esse valor é previamente escolhido

pelo operador de tal forma que seja tão maior quanto maior for a possibilidade de aparição de novos vetores no espaço aéreo vigiado pelo radar. O tempo de iluminação (TI) da vigilância é dado pelo produto entre a velocidade de rotação do feixe da antena e o setor azimutal vigiado. No caso desse exemplo, $TI_{vig} = 4s$.

Diferente do primeiro exemplo, nesse há obstáculos estáticos (*clutters*) e interferências no cenário, o que faz o sistema otimizar o diagrama de radiação fornecendo uma baixa energia nessas direções. A figura 6.10 mostra o diagrama gerado no instante $t = 40.1s$, onde o sistema precisa rastrear o vetor aéreo 2, no azimute 40° , e o mínimo de energia nos azimutes -10° e 35° , azimutes onde existem interferências ou *clutters*. Além disso, é importante que haja um nível de energia razoável nos lóbulos secundários, sem comprometer a factibilidade do problema. Nesse caso, esse nível escolhido é de $-13dB$.



(a) Diagrama Planar



(b) Diagrama Polar

Figura 6.10: Diagrama de radiação que suprime regiões de interferências e maximiza energia em 40°

6.2.1 Resultados

A partir da primeira vigilância realizada entre os tempos $t = 0s$ e $t = 4s$, há a integração dos dados obtidos, e assim calcula-se o grau de periculosidade, o tempo de iluminação e o tempo sem ser visto de cada vetor aéreo. Com isso, o fator α é calculado para cada vetor aéreo, assim como para as tarefas de busca e de vigilância, e a partir disso, a tarefa que obtiver o máximo α será realizada nesse instante. É importante citar que dentro das tarefas de busca e vigilância, o tempo sem ser visto de cada vetor aéreo é computado a partir do momento que ele deixa de ser iluminado, e não a partir do momento que a tarefa termina. Para o exemplo mencionado, as tarefas realizadas em cada instante de tempo estão mostradas na tabela 6.2.

Percebe-se que os resultados são coerentes com o que foi descrito na seção anterior. Primeiramente, as tarefas se revezam entre vigilância e rastreo do vetor aéreo 2. Isso acontece porque até o instante $t = 30s$ o cenário visto pelo radar é composto por quatro vetores aéreos, sendo dois realizando trajetórias na direção vertical e sentido positivo do eixo y , aparentemente não oferecendo risco ao sistema, um bem distante nem sendo detectado pelo radar e o vetor aéreo 2 com vetor velocidade na direção radial e sentido de aproximação ao sistema. De $t = 30s$ a aproximadamente $t = 52s$, é difícil prever o que vai acontecer com a escolha de prioridades entre as tarefas. O vetor aéreo 2 já alterou a sua trajetória e segue uma reta quase tangencial a uma circunferência centrada na posição do radar, desenvolvendo um movimento com baixa velocidade radial. Já o vetor aéreo 1 encontra-se em uma trajetória curvilínea, sendo difícil prever a direção e o sentido de movimento que serão tomados em seguida por ele. Os outros dois vetores, 3 e 4, continuam desenvolvendo suas trajetórias retilíneas, com baixo módulo de velocidade radial e se afastando do radar.

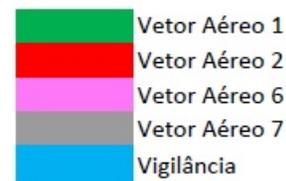
A partir de $t \simeq 57s$, o vetor aéreo 1 passa a ser a maior ameaça aérea presente no cenário, com um grau de periculosidade crescente, forçando o sistema a alternar entre o seu rastreo e a vigilância do espaço aéreo. Isso persiste até aproximadamente $t = 60s$ quando o vetor aéreo 7 passa a fazer parte do cenário aéreo compreendido pelo radar, aparecendo com uma velocidade de aproximação bem alta. O vetor 7 passa a ser a ameaça de maior prioridade até aproximadamente $t = 85s$, alternado seu rastreo com a tarefa de vigilância, quando nesse instante ele muda de trajetória. Essa nova trajetória curvilínea termina em $t = 109s$ quando passa a seguir uma trajetória retilínea uniforme. Prosseguindo, em $t \simeq 95s$ o vetor aéreo 1 volta a ser rastreado, alternando essa tarefa com a de vigilância até o término da simulação.

Percebe-se que alguns vetores aéreos não possuem valor de α em determinados instantes. Há duas vertentes que explicam isso: A primeira diz respeito a um vetor aéreo que é detectado, mas possui um grau de periculosidade menor do que o limiar de grau de periculosidade escolhido previamente pelo usuário, tendo suas informações atualizadas somente durante a tarefa de vigilância. Já a segunda está relacionada a vetores aéreos que se encontram no espaço aéreo e no campo de visada do radar, mas não retornam uma relação sinal-ruído suficiente para serem detectados, ou seja, a SNR do vetor aéreo não ultrapassa o limiar de detecção escolhido previamente.

É importante dizer que as simulações podem ser feitas de diversas maneiras, não limitando-se aos casos citados. O simulador foi desenvolvido de modo a possibilitar a criação de incontáveis cenários, cada qual com características próprias.

Tabela 6.2: Tarefas realizadas por instante de tempo referentes ao Exemplo 2

Tempo (s)	10			20			30			40			50			60		
Vigilância																		
Busca																		
Rastreo																		
α_1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	26	25.07	25.67	25.76	25.63	25.49	26		
α_2	x	30.73	30.8	31.08	31.32	31.61	31.86	32.16	32.44	32	31.24	30.59	26.18	25.89	25.61	25		
α_3	x	17.84	22.36	17.80	22.74	17.70	23.03	17.64	23.30	17	21.50	21.99	18.34	17.96	17.71	17		
α_4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
α_5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
α_6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
α_7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
α_{vig}	x	25.25	30.98	25.25	31.51	25.25	32.00	25.25	32.45	25	30.26	30.88	26.34	25.92	25.72	25		
α_{bus}	x	10.25	13.69	10.25	14.01	10.25	14.30	10.25	14.57	10	13.26	13.63	10.90	10.65	10.53	10		



Tempo (s)	70			80			90			100			110			120		
Vigilância																		
Busca																		
Rastreo																		
α_1	30.12	31.83	31.08	33.03	34.89	34.65	35.71	38.89	36.33	38.42	38.38	40.29	x					
α_2	29.79	27.82	24.41	25.90	38.58	30.55	25.65	24.14	30.70	23.96	36.00	28.78	x					
α_3	21.19	17.18	27.03	17.05	27.62	16.94	28.39	19.96	25.40	16.90	26.85	20.80	x					
α_4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
α_5	30.26	25.25	36.88	24.62	36.99	23.83	37.07	26.60	32.79	22.58	33.80	21.64	x					
α_6	x	x	x	x	x	27.20	27.93	30.56	27.52	26.38	26.36	25.70	x					
α_7	x	36.72	37.29	38.01	38.73	39.72	40.07	36.06	35.12	27.29	22.97	16.55	x					
α_{vig}	30.32	25.25	37.93	25.25	38.90	25.25	40.10	29.30	36.39	25.46	38.43	25.25	x					
α_{bus}	13.29	10.25	18.39	10.47	18.66	10.35	20.13	13.98	18.22	10.80	18.59	10.43	x					

Conclusão

No presente trabalho realizaram-se pesquisas e desenvolvimentos de algoritmos em dois campos distintos, porém complementares, pertencentes a um sistema de radar cognitivo multifuncional. Além disso, um simulador desenvolvido em módulos foi criado para validar os conceitos apresentados e poder ser utilizado e atualizado em trabalhos relacionados a esse tipo de radar, mas com enfoque diferente.

Primeiramente desenvolveram-se três métodos de otimização para o diagrama de radiação gerado pelo arranjo de antenas. Para tal, foi proposto um modelo matemático, onde se considerou tanto as ponderações a serem aplicadas nos elementos do arranjo quanto o diagrama gerado como vetores complexos, com módulo e fase. Foram objetos de estudo o método clássico de mínimos quadrados (MMQ), o método de mínimos quadrados em amplitude (MMQA), onde se deseja otimizar apenas o módulo do vetor diagrama de radiação, e o método de otimização convexa com uso de matriz de restrições (LMIs).

O primeiro critério utilizado foi o de mínimos quadrados clássico, que apresenta um erro médio quadrático muito pequeno quando o diagrama de radiação dado como ideal é factível em sua forma complexa (considerando módulo e fase). No entanto, como esse método leva em conta tanto a fase quanto a amplitude dos valores do diagrama de radiação, ele fornece baixo desempenho em casos onde só se conhecem o formato da diretividade do diagrama, ou seja, seu módulo. Como em projetos voltados a área de radar o interesse está na energia associada a cada ângulo, as fases pontuais desse são irrelevantes, tornando o método nesses casos ineficiente.

Identificando essa limitação do método, um outro método foi proposto, que só considera o módulo do diagrama de radiação. Esse método, chamado método de mínimos quadrados em amplitude, baseia-se nos mesmos conceitos do primeiro, porém está interessado em minimizar o erro médio quadrático entre os módulos do diagrama de radiação encontrado pelo algoritmo e do diagrama de radiação dado como ideal. Em casos onde a fase e o módulo do diagrama são conhecidos e considerados, esse método forneceu resultados iguais ao do primeiro método, porém necessitando de uma maior quantidade de operações matemáticas. Já nos casos onde somente a amplitude era conhecida, o método se tornou mais eficiente do que o primeiro, inclusive em casos onde o diagrama de radiação dado como ideal era infactível. Foram feitas comparações com outros métodos, demonstrando que a eficiência desse método é compatível com a deles, podendo ser utilizado na formação de qualquer tipo de diagrama desde que se conheça o formato

do diagrama ideal.

No entanto, diferente do primeiro método, o segundo não garante o mínimo erro possível, encontrando assim um mínimo local. Dependendo da escolha do primeiro vetor ponderação utilizado na iteração do método, o resultado pode estar próximo ou não do mínimo global. Para garantir que o diagrama final esteja mais próximo do mínimo global, assumindo que este exista, a saída do método pode servir de ponto inicial em outros métodos de otimização. Essa análise não foi desenvolvida nesse trabalho.

Quando não se sabe o formato da diretividade que se deseja, somente restrições que devam ser obedecidas, o método de mínimos quadrados em amplitude se torna inadequado. Nesse tipo de configuração não se faz uso de um diagrama ideal, o que impossibilita o uso dos dois primeiros métodos. Para ser possível trabalhar com esse tipo de análise, um terceiro método foi proposto. Esse método baseia-se no uso de desigualdades matriciais lineares (LMIs), limitando a energia associada a determinados pontos do cenário e maximizando a energia do feixe principal direcionado a determinado ponto. Ele mostrou ser um método eficiente nesses casos, diminuindo a energia máxima encontrada quanto maior for as limitações impostas, podendo chegar ao ponto de se tornar um problema infactível. Logo, esse método conta com a experiência do operador em escolher as limitações impostas ao diagrama de radiação.

Analisando os três métodos apresentados, conclui-se que não existe um método de otimização que abrange todos os tipos de aplicação. Esses métodos, utilizados em conjunto, cada qual em momentos coerentes com suas características, podem ser empregados em qualquer análise.

O passo seguinte do trabalho foi desenvolver um critério que fornecesse as prioridades na realização das tarefas desempenhadas pelo sistema. Como há limitação de recursos, o sistema precisa decidir qual tarefa será realizada em determinado instante, quais recursos estão envolvidos e por quanto tempo permanecerá nela. Esse trabalho realiza uma análise operacional levando em consideração, dentre os recursos envolvidos, somente o recurso *tempo*. Para definir a escolha da tarefa, foi desenvolvida uma função objetivo dada por três argumentos: grau de periculosidade, tempo necessário de iluminação e tempo sem que a tarefa seja realizada. Como a ideia é utilizar uma única função objetivo independente da tarefa, tarefas de busca e vigilância precisam ter graus de periculosidade fixos, informados previamente pelo usuário. A partir da criação função objetivo, o máximo valor encontrado nesse critério proposto define a tarefa que será desempenhada pelo sistema.

O critério de otimização de prioridades e agendamento de tarefas proposto no presente trabalho analisa somente o instante de aplicação da função objetivo, não levando em consideração algum horizonte de tempo. Após a realização da tarefa escolhida, os argumentos da função são atualizados e uma nova tarefa (ou a mesma) é realizada. Apesar dessa análise instantânea, o critério analisa de forma indireta dados passados, através do tempo em que cada tarefa está sem ser realizada, e dados futuros, através do impacto causado pelo tempo de iluminação necessário.

Por fim, um simulador foi desenvolvido no intuito de validar esses dois conceitos propostos no trabalho. Como são conceitos complementares, mas analisados separadamente, foi necessário criar uma ferramenta que fizesse a integração das duas análises. Os resultados obtidos, discutidos no capítulo 6, são coerentes com o esperado, indicando que os algoritmos desenvolvidos são eficazes e úteis.

7.1 Trabalhos futuros

Como sistemas de radares cognitivos multifuncionais é uma área de estudo relativamente recente, muitos trabalhos ainda devem ser feitos. Focando somente nas análises apresentadas nessa dissertação, podem-se citar os seguintes:

- Considerar quantização e erros existentes em amplificadores/atenuadores e defasadores analógicos contidos nos módulos de transmissão e recepção na análise de otimização do diagrama de radiação do arranjo de antena.
- Ampliar os métodos de otimização do diagrama de radiação da antena para casos em três dimensões e arranjos com outros formatos.
- Utilizar os resultados obtidos com o método dos mínimos quadrados em amplitude como entrada para outros métodos de otimização a fim de verificar uma possível melhora na resposta.
- Implementar os algoritmos de otimização do diagrama de radiação do arranjo de antena em linguagens que possam ser utilizadas em tempo real, escrevendo os algoritmos de tal forma que o tempo de processamento seja coerente com a aplicação.
- Desenvolver o fator grau de periculosidade de forma mais complexa e condizente com cenários reais.
- Aprofundar o estudo da escolha dos coeficientes utilizados na função objetivo.
- Atualizar o simulador possibilitando novas análises em um mesmo programa. Para isso, basta adicionar novos módulos a ele.
- Criar uma interface com o usuário mais bem elaborada e mais “amigável”, tornando a interação com o usuário mais natural.

Publicações

Trabalhos relacionados à respectiva dissertação, que foram publicados, são os seguintes:

- *Comparação e Criação de Diagramas de Antena Phased Array Linear Utilizando Três Métodos Diferentes de Otimização* - XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT-2012), Brasília, Brasil.
- *Radiation Pattern Generation Using a Modified Least Squares Method* - Radar Methods and Systems Workshop (RMSW-2012), Kiev, Ucrânia.
- *Phase-only pattern synthesis using a modified Least Squares Method for phased arrays* - European Microwave Week 2013, Nuremberg, Alemanha.

Bibliografia

- Balanis, C. A. (1982). *Antenna theory: analysis and design/Constantine A. Balanis*, J. Wiley, New York.
- Bertsekas, D. (1988). The auction algorithm: A distributed relaxation method for the assignment problem, *Annals of operations research* **14**(1): 105–123.
- Boyd, S., El Ghaoul, L., Feron, E. & Balakrishnan, V. (1987). *Linear matrix inequalities in system and control theory*, Vol. 15, Society for Industrial Mathematics.
- Carvalho, R. (2005). *Temas Atuais de Física: Microondas, 1ed*, Sociedade Brasileira de Física.
- Ding, Z. (2008). A survey of radar resource management algorithms, *Electrical and Computer Engineering, 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on*, IEEE, pp. 001559–001564.
- Ding, Z. & Defence, R. (2009). *A Literature Survey of Radar Resources Management Algorithms*, Defence R&D Canada-Ottawa.
- Fenn, A., Temme, D., Delaney, W. & Courtney, W. (2000). The development of phased-array radar technology, *Lincoln Laboratory Journal* **12**(2): 321–340.
- Ferreira, A. (2004). *Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa*, Editora Positivo.
- Guarnieri, M. (2010). The early history of radar [historical], *Industrial Electronics Magazine, IEEE* **4**(3): 36–42.
- Guerci, J. (2013). Cognitive radar: The next radar wave?, <http://www.microwavejournal.com/articles/10487-cognitive-radar-the-next-radar-wave>.
- Hacker, P. & Schrank, H. (1982). Range distance requirements for measuring low and ultralow sidelobe antenna patterns, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* **30**(5): 956–966.
- Halliday, D., Resnick, R. & J., W. (1995). *Fundamentos da Física 4 - Ótica e Física Moderna, 4th ed.*, LTC.
- Harris, F. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform, *Proceedings of the IEEE* **66**(1): 51–83.

- James, R. (1989). A history of radar, *IEE Review* **35**(9): 343–349.
- Kassakian, P. (2006). Convex approximation and optimization with applications in magnitude filter design and radiation pattern synthesis, *University of California, Berkeley*.
- Kay, S. (1993). *Fundamentals of Statistical Signal Processing - Estimation Theory, vol.1, 2nd ed.*
- Koch, W. (1999). Adaptive parameter control for phased-array tracking, *Proceedings of SPIE*, Vol. 3809, p. 444.
- Komorniczak, W., Kuczerski, T. & Pietrasinski, J. (2000). The priority assignment for detected targets in multi-function radar, *Microwaves, Radar and Wireless Communications. 2000. MIKON-2000. 13th International Conference on*, Vol. 1, IEEE, pp. 244–247.
- Komorniczak, W. & Pietrasinski, J. (2000). Selected problems of mfr resources management, *Information Fusion, 2000. FUSION 2000. Proceedings of the Third International Conference on*, Vol. 2, IEEE, pp. WEC1–3.
- Krishnamurthy, V. & Evans, R. (2001). Hidden markov model multiarm bandits: a methodology for beam scheduling in multitarget tracking, *Signal Processing, IEEE Transactions on* **49**(12): 2893–2908.
- Mailloux, R. J. (2005). *Phased array antenna handbook*, Artech House Boston.
- Meikle, H. (2008). *Modern radar systems*, Artech House on Demand.
- Miranda, S., Baker, C., Woodbridge, K. & Griffiths, H. (2006). Knowledge-based resource management for multifunction radar: a look at scheduling and task prioritization, *Signal Processing Magazine, IEEE* **23**(1): 66–76.
- Miranda, S., Baker, C., Woodbridge, K. & Griffiths, H. (2007). Fuzzy logic approach for prioritisation of radar tasks and sectors of surveillance in multifunction radar, *Radar, Sonar & Navigation, IET* **1**(2): 131–141.
- Orman, A., Potts, C., Shahani, A. & Moore, A. (1996). Scheduling for a multifunction phased array radar system, *European Journal of operational research* **90**(1): 13–25.
- Ozdamar, L. (1999). A genetic algorithm approach to a general category project scheduling problem, *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on* **29**(1): 44–59.
- Qu, Y., Liao, G., Zhu, S. & Liu, X. (2008). Pattern synthesis of planar antenna array via convex optimization for airborne forward looking radar, *Progress In Electromagnetics Research* **84**: 1–10.
- Rahmat-Samii, Y. & Michielssen, E. (1999). *Electromagnetic optimization by genetic algorithms*, J. Wiley.

- Richards, A., Holm, W. & Scheer, J. (2008). *Principles of Modern Radar*, SciTech Publishing, Incorporated.
- Sabatini, S. & Tarantino, M. (1994). *Multifunction array radar- System design and analysis*.
- Shih, C., Gopalakrishnan, S., Ganti, P., Caccamo, M. & Sha, L. (2003). Scheduling real-time dwells using tasks with synthetic periods, *Real-Time Systems Symposium, 2003. RTSS 2003. 24th IEEE*, IEEE, pp. 210–219.
- Shin, H., Hong, S. & Hong, D. (1995). Adaptive-update-rate target tracking for phased-array radar, *Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings-*, Vol. 142, IET, pp. 137–143.
- Skolnik, M. (2008). *Radar Handbook, Third Edition*, Electronics electrical engineering, McGraw-Hill.
- Southall, H., Simmers, J. & O'Donnell, T. (1995). Direction finding in phased arrays with a neural network beamformer, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* **43**(12): 1369–1374.
- Trees, H. (2002). *Optimum Array Processing, Detection, Estimation and Modulation Theory*, Wiley.
- Vendik, O. & Yegorov, Y. (2000). The first phased-array antennas in russia: 1955-1960, *Antennas and Propagation Magazine, IEEE* **42**(4): 46–52.
- Willems, J. (1971). Least squares stationary optimal control and the algebraic riccati equation, *Automatic Control, IEEE Transactions on* **16**(6): 621–634.
- Wintenby, J. & Krishnamurthy, V. (2006). Hierarchical resource management in adaptive airborne surveillance radars, *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* **42**(2): 401–420.
- Yan, K. & Lu, Y. (1997). Sidelobe reduction in array-pattern synthesis using genetic algorithm, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* **45**(7): 1117–1122.
- Zooghby, A., Christodoulou, C. & Georgiopoulos, M. (1998). Neural network-based adaptive beamforming for one-and two-dimensional antenna arrays, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* **46**(12): 1891–1893.

ANEXO A

Os janelamentos mostrados no presente trabalho são dados pelas seguintes funções, onde N é o número total de elementos e $0 \leq n \leq N - 1$:

1. Uniforme

$$w(n) = 1$$

2. Hamming

$$w(n) = \alpha - \beta \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$$

Com $\beta = 1 - \alpha$, $\alpha, \beta \in \mathfrak{R}_+$

3. Gaussian

$$w(n) = \exp\left(-0.5\left(\frac{n - (N-1)/2}{\sigma(N-1)/2}\right)^2\right)$$

Com $\sigma \leq 0.5$

4. Blackman

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$$

Com $a_0 = \frac{1-\alpha}{2}$, $a_1 = \frac{1}{2}$ e $\frac{\alpha}{2}$

5. Dolph-Chebyshev

$$w(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\cos(N \cos^{-1}[\beta \cos(\frac{\pi k}{N})])}{\cosh[N \cosh^{-1}(\beta)]} \cdot e^{i2\pi k(n - \frac{N-1}{2})/N}$$

Com $\beta = \cosh\left[\frac{1}{N} \cosh^{-1}(10^a)\right]$ e a o parâmetro que indica que o lóbulo secundário seja de $-20a$ dB

A janela de Dolph-Chebyshev garante a mínima largura de 3dB, dado máximo valor de lóbulo secundário que se queira.