

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Paulo Henrique Crippa

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO
PARA APONTAMENTO AUTOMÁTICO DE UMA ANTENA
PARABÓLICA RECEPTORA**

Taubaté - SP
2011

Paulo Henrique Crippa

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO
PARA APONTAMENTO AUTOMÁTICO DE UMA ANTENA
PARABÓLICA RECEPTORA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de concentração: Automação.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Gonçalves

Co-Orientador: Prof. Dr. Alvaro Manoel de Souza Soares

**Taubaté - SP
2011**

C931p Crippa, Paulo Henrique
Projeto de um sistema de controle adaptativo para o apontamento automático de uma antena parabólica receptora / Paulo Henrique Crippa. – 2011.
107f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, 2011.

Orientação: Prof. Dr. João Bosco Gonçalves, Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Manipuladores Robóticos. 2. Modelagem Dinâmica.
3. Sistemas de Controle Adaptativos. I. Título.

PAULO HENRIQUE CRIPPA

**PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ADAPTATIVO PARA
APONTAMENTO AUTOMÁTICO DE UMA ANTENA PARABÓLICA RECEPTORA**

Dissertação apresentada para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.
Área de concentração: Automação.

Data: 26 / 10 / 2011

Resultado: Aprovado

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Bosco Gonçalves

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Alvaro Manoel de Souza Soares

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo

Universidade Estadual Paulista

Assinatura: _____

*Dedico este trabalho ao meu pai,
Paulo Crippa*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, fonte de toda ciência e sabedoria, por ter me concedido a graça de finalizar este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Bosco Gonçalves, por todo apoio, orientação e dedicação despendidas a este trabalho. Tenha certeza que aprendi muito ao seu lado. Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Alvaro Manoel de Souza Soares, por suas sugestões e contribuições.

Aos meus pais: Paulo Crippa e Claudete Aparecida Valério Crippa por terem me transmitido a vida, por terem sido excelentes educadores e amigos e por me conduzirem a experimentar o maior dom entre todos: o Amor de Deus.

À minha noiva, Ana Elisabete de Lucena Calado pelo amor, compreensão e estímulo. Sem sua presença amorosa e fiel ao meu lado não teria condições de concluir este trabalho.

Ao meu Pai Fundador Monsenhor Jonas Abib, por ser exemplo de determinação, empenho, fidelidade e santidade. Quero com muita humildade seguir seus passos.

À Comunidade Canção Nova, por ser o lugar do meu repouso e meu descanso. Ser Canção Nova é bom demais!

À Fundação João Paulo II, na pessoa do seu presidente Sr. Wellington Silva Jardim, por ter acreditado nesse trabalho. Obrigado por todo investimento e apoio dedicado. Deus lhe pague!

“A fé e a razão constituem como que as duas asas pelas quais o espírito humano se eleva para a contemplação da verdade. Foi Deus quem colocou no coração do homem o desejo de conhecer a verdade e, em última análise, de O conhecer a Ele, para que, conhecendo-O e amando-O, possa chegar também à verdade plena sobre si próprio”

Beato João Paulo II

RESUMO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle capaz de realizar o apontamento automático de uma antena parabólica de forma mais precisa e com menor tempo de apontamento quando comparado ao apontamento manual. A antena parabólica em estudo consta de uma parábola metálica de 1.60 m de diâmetro, base de sustentação em ferro, dois conjuntos de engrenagens e dois motores elétricos para realização dos movimentos. Os parâmetros físicos do sistema mecânico, tais como massa, volume e inércia, puderam ser facilmente obtidos a partir de uma modelagem tridimensional em um software de plataforma CAD. Para a modelagem dinâmica do sistema utilizou-se a similaridade do sistema físico em estudo com um manipulador de cadeia aberta de dois graus de liberdade o que permitiu que se aplicassem conceitos referentes a cinemática e modelagem de manipuladores robóticos. Através da notação de *Denavit-Hartenberg* a cinemática direta da antena com dois graus de liberdade foi obtida com sucesso. As equações dinâmicas que descrevem o movimento do sistema foram levantadas através de um modelador automático implementado em um software de manipulação simbólica. Para tanto foi desenvolvido um algoritmo que descreve os passos necessários para obtenção das equações de movimento de um manipulador robótico em cadeia aberta, a partir da formulação *Lagrangeana*. Um sistema de controle adaptativo por modelo de referência foi projetado e implementado considerando as incertezas do modelo oriundas de imperfeições contidas na modelagem tridimensional realizada. Os resultados obtidos por simulação do sistema de controle adaptativo se mostraram satisfatórios e os índices de desempenho esperados para um perfeito apontamento foram alcançados.

Palavras-chave: Manipuladores Robóticos em Cadeia Aberta, Cinemática Direta, Equações Dinâmicas de Movimento, Sistemas de Controle Adaptativo.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a control system capable of performing the automatic maneuver of a satellite dish more accurately with less time maneuvering when compared to manual maneuver. The dish consists of a study on metal parabola 1.60 m in diameter, base of support in iron, two sets of gears and two electric motors to perform the movements. The physical parameters of the mechanical system, such as mass, volume and inertia could be easily obtained from a three-dimensional modeling in a CAD software platform. For modeling the system dynamics we used the similarity of the physical system under study with an open chain manipulator of two degrees of freedom that allowed it to apply concepts related to kinematics and modeling of robotic manipulators. Through the *Denavit-Hartenberg* notation of the direct kinematics of the antenna with two degrees of freedom was successfully obtained. The dynamic equations describing the motion of the system were raised through an automatic model implemented in symbolic manipulation software. To that end, an algorithm that describes the steps necessary to obtain the equations of motion of a robotic manipulator in open chain, from the *Lagrangian* method, was developed. A model reference adaptive control system was designed and implemented considering the uncertainties of the model arising from imperfections within the three-dimensional modeling. The results obtained by simulation of the system of closed loop control were satisfactory as well as the high rates of the perfect maneuver have been achieved.

Keywords: Serial Robotic Manipulators, Direct Kinematics, Equations of Motion, Adaptive Control Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de comunicação via satélite – transmissão em um único sentido	17
Figura 2 - Sistema de comunicação via satélite – transmissão em ambos os sentidos.....	17
Figura 3– Estação de transmissão via satélite – sentido único	18
Figura 4– Estação de recepção via satélite – sentido único.....	18
Figura 5– Estação bidirecional de comunicação via satélite	19
Figura 6 – Esquema construtivo da antena receptora	25
Figura 7 – Partes do sistema físico da antena receptora	28
Figura 8 – Modelo físico da antena receptora	30
Figura 9 – Barra de ferramenta Measure	31
Figura 10 – Grandezas físicas do elo 1	31
Figura 11 – Grandezas físicas do elo 2.....	31
Figura 12 –Transformação entre variáveis de junta e variáveis cartesianas.....	33
Figura 13 – Notação de Denavit-Hartenberg.....	34
Figura 14 – Antena receptora com DH.....	37
Figura 15 – Diagrama de blocos para o modelo de dinâmica inversa.....	44
Figura 16 – Diagrama de blocos para o modelo de dinâmica direta	44
Figura 17 – Ponto p_i no elo i	47
Figura 18 – Manipulador planar com 2 gdl	58
Figura 19 - Sistema de controle.....	69
Figura 20 – Sistema de controle em malha aberta.....	70
Figura 21 – Sistema de controle em malha fechada	70
Figura 22 – Estrutura de um controlador adaptativo	72

Figura 23 - Controle adaptativo direto	73
Figura 24 – Controle adaptativo indireto.....	74
Figura 25 - Controle adaptativo não baseado em identificador.....	74
Figura 26 – Esquemático do controlador MRAC direto	76
Figura 27 – Controle adaptativo da antena receptora	79
Figura 28 - Implementação do sistema de controle da antena receptora no simulink.....	90
Figura 29 – Ação de controle – junta 1	91
Figura 30 – Ação de controle – junta 2	91
Figura 31 – Análise do sinal de saída (variável controlada) – junta 1.....	92
Figura 32 - Análise do sinal de saída (variável controlada) – junta 2	92
Figura 33 – Erro das juntas 1 e 2	93
Figura 34 - Análise do parâmetro de controle adaptativo – junta 1	94
Figura 35 - Análise do parâmetro de controle adaptativo – junta 2	95
Figura 36 - Ação de controle - juntas 1 e 2	95
Figura 37 - Análise da influência de γ na saída - junta 1.....	96
Figura 38 - Análise da influência de γ na saída - junta 2.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas e construtivas	29
Tabela 2 – Grandezas físicas do modelo tridimensional	32
Tabela 3 – Transformações homogêneas DH.....	36
Tabela 4 – Parâmetros DH da antena receptora	37
Tabela 5 – Parâmetros físicos da antena receptora.....	38
Tabela 6 – Algoritmo de obtenção das equações dinâmicas de movimento	55
Tabela 7 – Entradas do modelador automático	57
Tabela 8 – Entradas do modelador automático para o manipulador 2R planar.....	59
Tabela 9 – Índices de desempenho calculados para as saídas da junta 1	98
Tabela 10 - Índices de desempenho calculados para as saídas da junta 2	98

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AG	-	Algoritmo genético
APPC	-	<i>Adaptive pole position controller</i>
CAD	-	<i>Computer-aided design</i>
CC	-	Corrente contínua
CG	-	Centro de gravidade
DH	-	Notação de Denavit-Hartenberg
EMM-Natal	-	Estação Multi-Missão de Natal/RN
FI	-	Frequência intermediária
gdl	-	Graus de liberdade
GPS	-	<i>Global positioning system</i>
HPA	-	<i>High power amplifier</i>
LNA	-	<i>Low noise amplifier</i>
MR	-	Modelo de referência
MRAC	-	Controle adaptativo por modelo de referência
MRC	-	Controle por modelo de referência
PI	-	Controlador do tipo proporcional integrativo
PID	-	Controlador do tipo proporcional integrativo e derivativo
Rot	-	Rotação
SCG	-	<i>Symbolic computation group</i>
SCR	-	Subsistema de controle e rastreamento
Trans	-	Translação

LISTA DE SÍMBOLOS

n	- Número de graus de liberdade
x, y, z	- Coordenadas cartesianas
i, j, k, m	- Índices das juntas ou graus de liberdade
${}^j A_i$	- Matriz de transformação homogênea
J_i	- Matriz de momentos de inércia
Q_i	- Matriz auxiliar derivativa
U_{ij}	- Matriz que representa o efeito de movimento relativo de uma junta j sobre o elo i
U_{jkm}	- Matriz que representa o efeito de interação do movimento entre as juntas j e k
D	- Matriz que representa as inércias
H	- Vetor que representa os efeitos de Coriolis e forças centrífugas
C	- Vetor que representa os efeitos da aceleração da gravidade
B	- Vetor que representa as forças dissipativas do sistema
$a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i$	- Parâmetros de Denavit-Hartenberg
θ	- Variável da junta
I	- Momentos de inércia
F	- Forças generalizadas
q	- Variável generalizada
\dot{q}	- Velocidade da variável
\ddot{q}	- Velocidade da variável
L	- Lagrangeano
T	- Energia cinética
V	- Energia potencial

${}^i p_i$	- Ponto fixo no elo i
$v(t)$	- Velocidade
${}^i r_i$	- Vetor posição do centro de massa do elo i
m_i	- Massa do elo i
g	- Vetor de aceleração da gravidade
l	- Comprimento de um elo do manipulador 2R planar
e	- Sinal de erro
K	- Função custo
τ	- Torque generalizado
τ_m	- Termo do modelo da lei de controle
τ_a	- Termo adaptativo da lei de controle
α	- Parâmetro do controlador
γ	- Ganho adaptativo
u_i	- Entrada do sistema
b_{a_1}	- Coeficiente de amortecimento viscoso a ser estimado, junta 1
b_{a_2}	- Coeficiente de amortecimento viscoso a ser estimado, junta 2
E_{MQ_1}	- Erro médio quadrático – sinal de erro da junta 1
E_{MQ_2}	- Erro médio quadrático – sinal de erro da junta 2
ω_n	- Frequência natural
ζ	- Razão de amortecimento
s	- Operador derivativo
T_p	- Tempo de pico
$\%UP$	- Ultrapassagem percentual
Ω_i	- Matriz das frequências naturais para cada grau de liberdade
Z_i	- Matriz das relações de amortecimento para cada grau de liberdade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Revisão Bibliográfica.....	21
1.2 Objetivo	23
1.3 Estrutura da Dissertação	23
2 SISTEMA FÍSICO DA ANTENA RECEPTORA.....	25
2.1 Modelagem Tridimensional.....	26
2.1.1 Obtenção das Grandezas Físicas do Modelo.....	30
2.2 Modelagem Cinemática.....	32
2.2.1 Cinemática Direta – Notação Denavit-Hartenberg	33
2.2.2 Cinemática Inversa.....	39
3 MODELAGEM DINÂMICA	42
3.1 Método de Euler-Lagrange.....	45
3.1.1 Energia Cinética e Energia Potencial	47
3.1.2 Equações Dinâmicas de Movimento	52
3.2 Modelador Automático para Manipuladores Robóticos em Cadeia Aberta com Dois Graus de Liberdade	56
3.3 Modelo Dinâmico de Um Manipulador 2R Planar	58
3.4 Modelo Dinâmico da Antena Receptora.....	65
4 SISTEMA DE CONTROLE.....	69
4.1 Controle Adaptativo	71
4.1.1 Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC)	75
4.1.2 Regra MIT.....	77
4.2 Projeto do Sistema de Controle da Antena Receptora.....	78
4.2.1 Incertezas do Modelo.....	79

4.2.2 Modelo de Referência.....	81
4.2.3 Lei de Controle Adaptativa	83
5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS	90
6 CONCLUSÃO.....	99
6.1 Trabalhos Futuros	101
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1 INTRODUÇÃO

Os meios de comunicação desempenham um papel fundamental no desenvolvimento da civilização moderna. Muitos segmentos da sociedade utilizam esse recurso para uma difusão rápida e eficiente de informações. A comunicação via satélite tem se apresentado como uma solução eficaz para a comunicação entre pontos distantes entre si, uma vez que a cobertura dos satélites geoestacionários existentes alcança quilômetros de extensão (Ha, 1986).

São denominados satélites geoestacionários aqueles inseridos em uma órbita sobre a linha do equador e cujo período de rotação seja igual ao período de rotação da Terra. Para que um satélite entre em órbita é necessário que ele atinja uma velocidade de pelo menos 28.800 km/h. Com essa velocidade todo satélite colocado a 36.000 km de altitude sobre o equador, entrará em órbita geoestacionária (ROODY, 2001).

Um enlace de comunicação via satélite pode ser compreendido como uma transmissão de sinais eletromagnéticos em um ou em ambos os sentidos estabelecendo a comunicação entre dois ou mais pontos pertencentes à área de cobertura do satélite. A função do satélite é amplificar o sinal recebido e transmiti-lo em uma nova frequência.

Em um sistema de comunicação via satélite, as informações podem trafegar em um ou em ambos os sentidos, dependendo do tipo de aplicação. São compostas por uma estação de transmissão, por um satélite e por uma estação de recepção (enlace ponto - ponto) ou mais estações (enlace ponto-múltiplos).

A transmissão de sinais em apenas um sentido pode ser visualizada na Figura 1, enquanto que a Figura 2 apresenta um sistema de comunicação com transmissão de sinais em ambos os sentidos. Tanto na Figura 1 como na Figura 2, a condição (a) representa o enlace ponto-ponto e a condição (b) o enlace ponto-múltiplos.

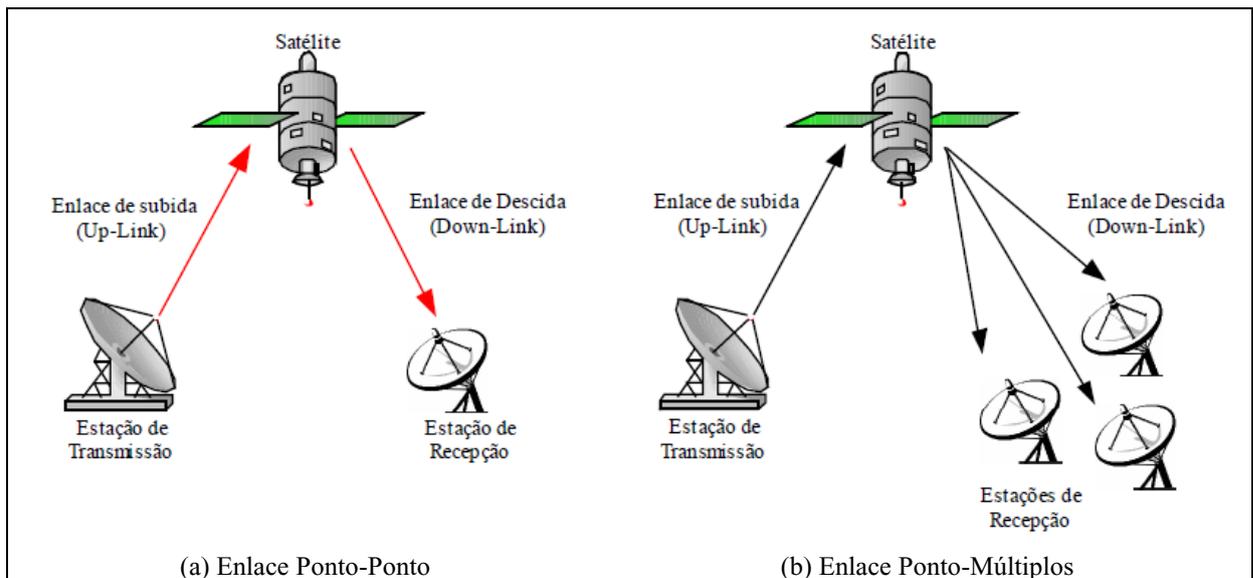


Figura 1 - Sistema de comunicação via satélite – transmissão em um único sentido

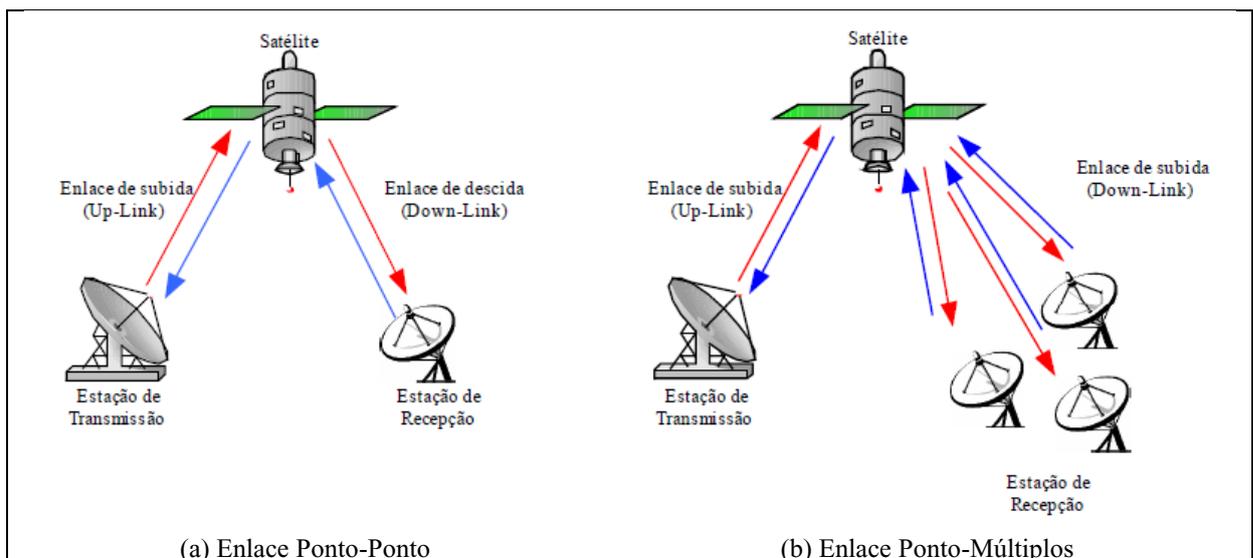


Figura 2 - Sistema de comunicação via satélite – transmissão em ambos os sentidos

Basicamente em uma estação de transmissão via satélite encontram-se três estágios de processamento do sinal: *modulação, conversão de frequência e amplificação*.

Na modulação o sinal é entregue em uma frequência intermediária FI que varia conforme o sistema ou configuração adotada. Atualmente os valores usados para essa frequência intermediária são 70 MHz ou 140 MHz. A conversão de frequência é realizada pelo *Up-Converter* que converte o sinal modulado em FI para a faixa de frequência do enlace. Assim o sinal convertido para sua faixa de canal é amplificado pelo amplificador de alta

potência HPA (*High Power Amplifier*) e aplicado a uma antena de transmissão que irá irradiá-lo na direção do satélite (PRATT *et al.*, 2002).

A Figura 3 apresenta a configuração básica de uma estação de transmissão via satélite para operação em sentido único.

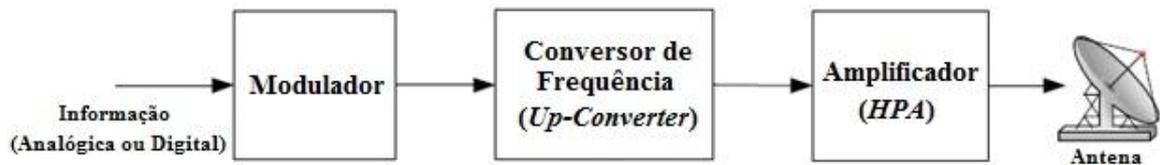


Figura 3– Estação de transmissão via satélite – sentido único

Uma estação de recepção via satélite é, basicamente, composta pelos mesmos estágios presente na estação de transmissão, porém na ordem inversa: *amplificação, conversão de frequência e modulação*.

O sinal retransmitido pelo satélite é recebido pela antena da estação de recepção e amplificado por uma estrutura de baixo ruído denominada LNA (*Low Noise Amplifier*). Este sinal, ainda na faixa de frequência de recepção, é convertido novamente para a frequência *FI* (70 ou 140 MHz) pelo *Down-Converter*. O sinal de *FI* é aplicado ao demodulador que retorna, na saída do sistema, o sinal original (PRATT *et al.*, 2002).

A Figura 4 apresenta a configuração básica de uma estação de recepção via satélite para operação em sentido único.

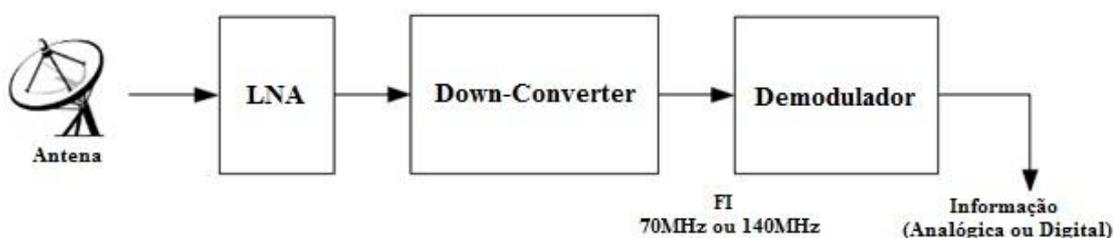


Figura 4– Estação de recepção via satélite – sentido único

A Figura 5 apresenta a configuração básica de uma estação de comunicação via satélite bidirecional que é adotada nos extremos tanto do enlace ponto-ponto como no enlace ponto-múltiplos. Esta configuração é a união das estações de transmissão e recepção apresentadas respectivamente na Figura 3 e na Figura 4. Compartilham uma mesma antena utilizando um combinador de sinais com níveis diferentes que operam frequências distintas.

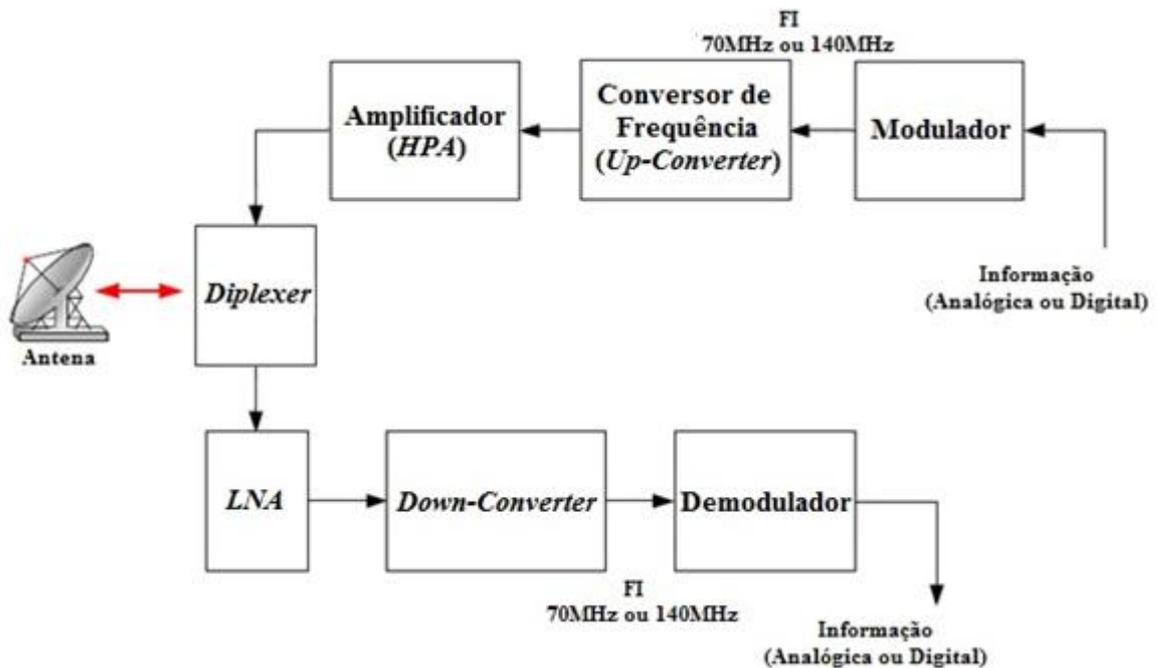


Figura 5– Estação bidirecional de comunicação via satélite

Um enlace de comunicação via satélite conta com vários fatores de degradação que afetam diretamente o sinal transmitido/recebido, ou seja, provocam atenuações que comprometem a qualidade do sinal. Tais atenuações podem ser divididas em dois grandes grupos. O primeiro está relacionado com o meio de propagação e as condições de radiação. O segundo está relacionado com os componentes utilizados nas estações terrestres, tais como: conectores, cabos, *flanges* de conexão, guias de onda e outros (MARINS, 2004).

Segundo Marins (2004) as atenuações relacionadas com o meio de propagação e condições de radiação podem ser entendidas como resultantes das atenuações por espaço livre (presentes nos enlaces de comunicação via satélite devido às grandes distâncias percorridas pelo sinal fora da nossa atmosfera) por mau apontamento de antenas, pelo erro de polarização e pelo efeito da chuva.

Nota-se, portanto, que um apontamento incorreto ou desajustado de uma antena compromete consideravelmente o funcionamento de uma estação de comunicação via satélite. Em uma estação de recepção as antenas são os primeiros equipamentos a processar o sinal enviado pelo satélite. Minimizar as atenuações nessa altura é essencial para que o sistema de comunicação atinja um desempenho satisfatório.

Na maioria das vezes o apontamento acontece de forma manual onde se necessita de um técnico com uma expertise tal que consiga, paralelamente, conciliar os serviços mecânicos

do apontamento (movimento da antena em elevação e azimute), com os conceitos de telecomunicações necessários para a análise do sinal recebido. A escassez desses profissionais no mercado de trabalho gera grandes transtornos para as empresas de telecomunicações seja na dificuldade de contratação como nos elevados salários exigidos pelos poucos profissionais qualificados disponíveis.

Além de ser um processo de elevada precisão, o apontamento manual demanda bastante tempo, principalmente quando nos referimos às antenas de recepção móveis que necessitam se adaptar às coordenadas geográficas e às condições climáticas e de relevo que são expostas em cada utilização.

Nesse sentido inúmeros esforços têm sido aplicados pelas empresas de telecomunicações para aperfeiçoar o apontamento das antenas receptoras, em busca de uma melhor qualidade no sinal recebido. A utilização de recursos que auxiliam o apontamento tem se mostrado como uma alternativa eficiente para a solução desse problema.

Atualmente existem alguns produtos disponíveis no mercado para este fim. Eles vão desde a realização dos cálculos matemáticos para o apontamento até sistemas incorporados às antenas que realizam o apontamento automático.

É possível conseguir gratuitamente, junto aos fabricantes de antenas, *softwares* que realizam os cálculos matemáticos necessários para o apontamento de antenas residenciais. Esses recursos apresentam uma linguagem simples podendo ser utilizado por pessoas sem capacitação técnica e necessitam que o usuário informe as coordenadas geográficas em que se encontra.

Quando se fala em realizar um apontamento profissional em alguma estação de recepção, as opções do mercado para esse guia de apontamento tendem a sistemas que realizam os cálculos de apontamento de forma instantânea. Esses sistemas possuem equipamentos de leitura de posição ou sensores de posição, como por exemplo bússolas eletrônicas e GPS (*Global Positioning System*), que fornecem as informações de posição ao sistema. Além disso, possuem um banco de dados com os satélites destinados a operação específica daquela recepção, de forma que o usuário escolha o satélite desejado.

Alguns sistemas para apontamento automático de antenas receptoras já estão disponíveis no mercado. Em sua grande maioria atendem a antenas com diâmetro do refletor parabólico não superior a 2,4m. Apresentam um sistema de servomecanismo constituído por

motores elétricos acoplados em cada junta do sistema. A técnica de controle clássica é geralmente empregada no sistema de controle que tem a malha retroalimentada pelos sensores de posição que monitoram o movimento da antena. O sistema de controle implementado é capaz de ler as entradas de orientação e posição e os sinais dos sensores, além de fornecer ao servomecanismo as informações de movimento.

1.1 Revisão Bibliográfica

A necessidade de se controlar uma antena dentro de um sistema de telecomunicações tem se tornado constante. A capacidade de rastrear satélites e a comunicação entre dois pontos sendo um deles móvel tem justificado tais esforços.

Os conceitos amplamente sedimentados sobre modelagem cinemática e dinâmica de manipuladores robóticos servem como base para a obtenção das equações dinâmicas de movimento desses sistemas. Adade Filho (1999) discorre sobre a modelagem cinemática e dinâmica para manipuladores robóticos em cadeia aberta e cadeia fechada. Fu *et al.* (1987) apresenta um método sistemático para obtenção do modelo dinâmico para um manipulador planar 2R.

Alguns autores tem discutido o sistema de controle e a implementação desses mecanismos de apontamento de antenas. As soluções encontradas vão desde sistemas baseados em microcontroladores como desenvolvimento de projetos de controle modernos. Sistemas de controles clássicos robustos apresentam-se como a solução mais implementada para realização do apontamento.

Em Armellini (2006, 2010) foi desenvolvido um sistema de controle capaz de suportar e posicionar uma antena de radar. Cada eixo posicionador da antena é comandado por uma malha dupla de controle independente (sistema desacoplado). A malha interna é responsável pelo controle do acionador do sistema, a malha externa é retroalimentada pelos sensores de posição e são responsáveis pela geração da trajetória de referência para a malha de controle.

O modelo dinâmico obtido é linear e a técnica de controle clássica com projeto do compensador através do Lugar das Raízes foi adotada.

De forma similar ao trabalho anteriormente descrito, Queiroz (2006) e Souto (2009) apresentam um sistema de controle, denominado Subsistema de Controle e Rastreo (SCR), destinado ao controle de uma antena de rastreo de satélite instalada na Estação Multi-Missão de Natal/RN (EMM-Natal). O servomecanismo é constituído por um inversor de frequência e um motor de ímãs permanentes adicionado a um *resolver* que fecha a malha de controle. Em função da operação de rastreo de satélites é utilizado um controlador do tipo proporcional integrativo (PI) na malha de controle de posição (externa). Na malha de controle de velocidade é usado um controlador do tipo proporcional integrativo e derivativo (PID) para o acionamento dos motores.

Trabalhos abordando sistemas de controles baseados em microcontroladores também são encontrados. Cúnico (2006) apresenta um sistema automatizado para posicionamento de antenas parabólicas. Tal sistema opera mediante o acionamento de dois motores de passos (elevação e azimute), a posição da antena é determinada por dois potenciômetros acoplados à antena. O sinal captado pela antena é simulado através de laser e a recepção através de fototransistores dispostos geometricamente na superfície da antena. No *hardware* do sistema foram utilizados um kit de microcontrolador e uma placa desenvolvida exclusivamente para o projeto.

Malaquias (2009) desenvolveu um mecanismo de controle automático para uma antena direcional utilizada na estação em solo de um sistema de comunicação com aeronaves em pleno vôo. O circuito de controle consiste na junção do circuito de controle original para um motor do tipo polar-rotor, largamente utilizado em sistemas de apontamento de antenas domésticos, com um circuito de acionamento específico. Foi utilizado para o acionamento o circuito conhecido como Ponte H, utilizado em acionamento de motores CC e de passo. Os sinais que controlam a Ponte H são provenientes do circuito de controle original do polar-rotor. O sistema foi implementado utilizando motores de limpador de pára-brisa de automóveis como acionadores devido ao elevado torque oferecido por esses motores. Os resultados de simulação foram satisfatórios.

1.2 Objetivo

O objetivo desse trabalho é projetar um sistema de controle adaptativo para o apontamento automático de uma antena parabólica receptora através da abordagem cinemática e dinâmica utilizada em manipuladores robóticos em cadeia aberta. Tal sistema terá condição de compensar as partes desconhecidas do modelo da planta. Para tanto uma modelagem tridimensional do sistema foi realizada para obtenção dos parâmetros físicos do sistema.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação de mestrado está organizada da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentado o esquemático construtivo da antena receptora. Através do *software* CATIA® V5 R19 é realizada a modelagem tridimensional do sistema físico da antena receptora e obtidos os parâmetros físicos do sistema. Nesse capítulo é realizada a modelagem cinemática onde são conhecidos os parâmetros de Denavit-Hartenberg do sistema.

No capítulo 3 é realizada a modelagem dinâmica da antena receptora. É desenvolvido um algoritmo para obtenção das equações de movimento através do formalismo de Euler-Lagrange. Esse algoritmo é implementado no *software* MAPLE® 13. O resultado dessa implementação foi um modelador automático de obtenção das equações dinâmicas de movimento para manipuladores robóticos em cadeia aberta. Por fim são obtidas as equações de movimento para a antena receptora.

O capítulo 4 discute as principais técnicas de controle utilizadas no comando de manipuladores robóticos. A técnica de controle adaptativa apresenta-se como uma ferramenta eficaz nos projetos de sistemas de controle onde não se conhece partes do modelo da planta. Tal técnica é utilizada no projeto do sistema de controle da antena receptora.

No capítulo 5 é realizada a implementação do sistema de controle desenvolvido no capítulo 3 para a antena receptora através do *software* MATLAB[®] *toolbox* SIMULINK[®]. São apresentados e discutidos os resultados de simulação.

No capítulo 6 conclui-se que o controlador adaptativo desenvolvido e simulado para a antena receptora se comportou de forma satisfatória. A interferência do ganho adaptativo é discutida e são apresentadas as propostas de trabalhos futuros.

2 SISTEMA FÍSICO DA ANTENA RECEPTORA

Uma antena parabólica de comunicação via satélite deve apresentar capacidade de movimento em dois planos: vertical (elevação) e horizontal (azimute). Para realizar de forma satisfatória a comunicação com qualquer satélite geo-estacionário, o sistema deve permitir um deslocamento angular de 0° a 90° no plano de elevação e, no plano de azimute, deslocamento angular de 0° a 360° (ELBERT, 2004).

O sistema físico proposto é composto basicamente por uma base de sustentação móvel, que possibilita a fixação da antena em qualquer superfície plana, dois conjuntos de engrenagens dispostos de forma que promova a movimentação da antena nos dois planos de deslocamento (elevação e azimute), dois motores elétricos e uma antena com refletor parabólico do tipo *focal point*. A Figura 6 mostra o esquema construtivo do sistema físico proposto para a antena receptora.

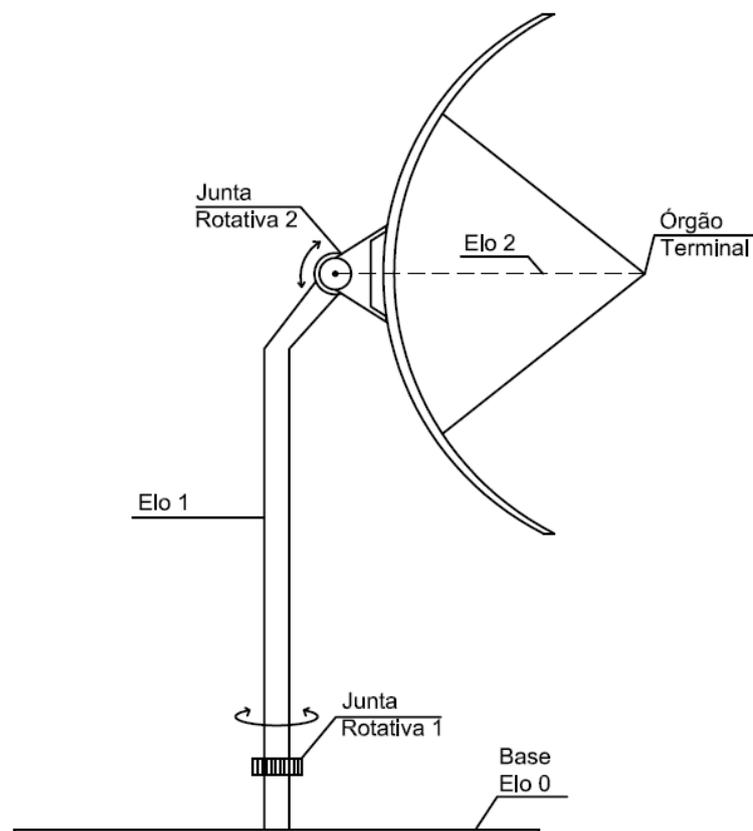


Figura 6 – Esquema construtivo da antena receptora

A similaridade do sistema físico proposto com manipuladores robóticos em cadeia aberta discutidos em Adade Filho (1999), Schilling (1990), Groover *et al.*(1986), Romano (2002) e Paul (1982), permitiu o uso dos conceitos de cinemática e dinâmica de manipuladores robóticos na modelagem da antena receptora.

Os parâmetros físicos do sistema, tais como: massas, momento de inércia e centro de massa, foram obtidas através da modelagem tridimensional do sistema em um *software* de plataforma CAD (CATIA[®] V5 R19). A utilização dessa ferramenta computacional para a modelagem do sistema contribuiu significativamente para o aperfeiçoamento do projeto mecânico e os recursos desse *software* permitiram a reprodução exata das partes de uma antena parabólica além de possibilitar definir os eixos de coordenadas para cada um dos elos e juntas do sistema.

2.1 Modelagem Tridimensional

Usou-se o software CATIA[®] V5 R19 (TAKEUDI, 2009; TICKOO, 2009) para a modelagem tridimensional da antena parabólica de comunicação via satélite do sistema físico. Os recursos oferecidos pelo *software* possibilitaram um acompanhamento total do projeto, que foi desde sua concepção e criação até a manutenção, incluindo produção e reciclagem (TAKEUDI, 2009). Torna-se, portanto uma ferramenta eficaz no desenvolvimento de projetos mecânicos estando disponíveis em três diferentes plataformas básicas: P1, P2 e P3. A primeira é destinada às pequenas e médias empresas que desejam avançar no desenvolvimento digital de seus produtos; P2 é empregado em empresas de engenharia que necessitam agregar tecnologia a seus projetos que lhes possibilitem modelar seus produtos, processos e recursos; a plataforma P3 é voltada para aplicações de alta qualidade e é basicamente utilizada por empresas automotivas e aeroespaciais. (TICKOO, 2009).

Segundo Tickoo (2009), o CATIA[®] V5 R19 é constituído por bancadas de trabalho específicas para cada etapa do desenvolvimento do projeto. Uma bancada de trabalho pode ser definida como um ambiente específico constituído por um conjunto de ferramentas próprias que permite ao projetista realizar tarefas que correspondem à finalidade da mesma. As

bancadas de trabalho básicas do CATIA® V5 R19 são: *Part Design*, *Wireframe and Surface Design*, *Assembly Design*, *Drafting*, *Generative Sheet Metal Design* e *DMU Kinematics*.

Para a construção do modelo físico da antena receptora no modo *Mechanical Design*, onde é possível conceber o modelo em partes e depois juntá-las de forma que se obtenha o sistema final, foram utilizadas as bancadas de trabalho: *Part Design* e *Assembly Design*. Tickoo (2009) define essas bancadas de trabalho:

- *Part Design* – Bancada de trabalho com as ferramentas necessárias para a criação de sólidos. O requisito básico para isso é a construção de seu esboço em 2D. A construção desse esboço ocorre na bancada *Sketcher* que pode ser acessada dentro da *Part Design*. Ao retornar para a bancada *Part Design*, o esboço criado na bancada *Sketcher* torna-se o limite físico do sólido a ser formado. As ferramentas dispostas na bancada *Part Design* possibilitam a criação do sólido conforme especificações de projeto.
- *Assembly Design* – A finalidade desse módulo é montar os componentes usando as restrições dessa bancada de trabalho, ou seja, os sólidos são combinados entre si de forma que seja obtida a forma geométrica. Nessa bancada encontra-se a ferramenta necessária para a aplicação do tipo de material aos sólidos selecionados.

O sistema físico da antena receptora foi modelado em seis partes distintas na bancada *Part Design* e depois justapostas na bancada *Assembly Design*. Cada parte do sistema foi projetada visando a possibilitar o movimento em azimute e elevação da antena parabólica de comunicação via satélite. O torque necessário para o movimento será provido por dois motores elétricos acoplados aos conjuntos de engrenagens simples. A Figura 7 apresenta as seis partes concebidas para o modelo físico da antena receptora.

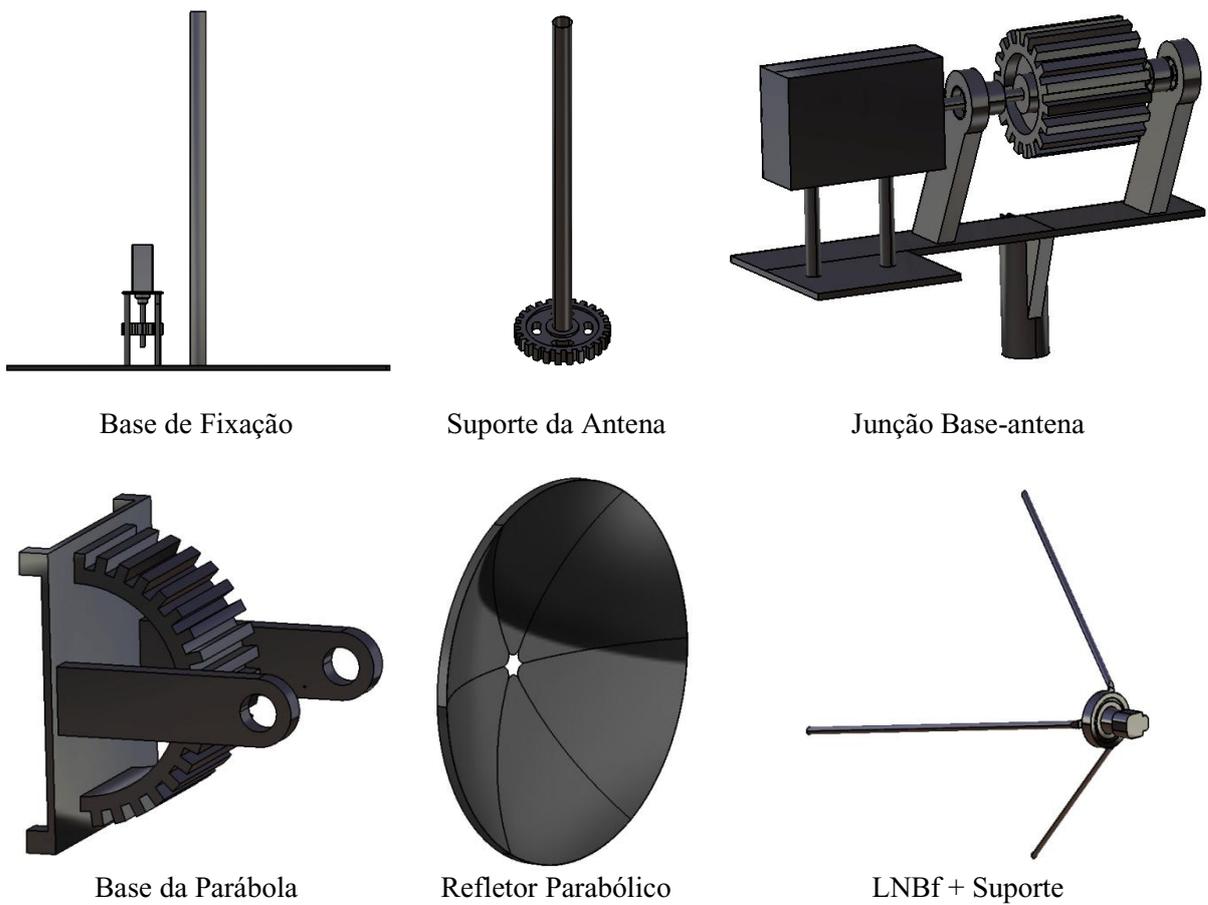


Figura 7 – Partes do sistema físico da antena receptora

Com o intuito de aproximar o modelo às aplicações reais, adotaram-se as características físicas de um refletor parabólico disponível no mercado. O mesmo apresenta 1.6m de diâmetro e é constituído de chapas de aço galvanizadas.

A Tabela 1 apresenta as características construtivas e as propriedades físicas dos materiais empregados em cada uma das partes do sistema físico.

Tabela 1 – Características físicas e construtivas

Partes do Sistema Físico	Função	Material Aplicado	Densidade (kg/m³)
Base de Fixação	Fixação do sistema em superfícies planas	Ferro	7900
Suporte da Antena	Realiza o acoplamento do conjunto de engrenagens para o movimento em azimute		
Junção Base-Antena	Une a base de suporte da antena com a base da parábola	Aço	7830
Base da Parábola	Base onde é fixado o refletor parabólico. Realiza o acoplamento do sistema de engrenagens para o movimento de elevação.		
Refletor Parabólico	Realiza a reflexão do sinal recebido.	Aço galvanizado	7850
LNBF + suportes	Amplifica e converte o sinal para uma faixa de frequência desejado. Os suportes garantem o posicionamento do LNBF no foco do refletor parabólico.	Alumínio	2700

O sistema físico da antena receptora foi modelado como um sistema de elos rígidos articulados através de juntas no espaço tridimensional, o que comprova segundo Romano (2002) e Rosário (2005), a similaridade do modelo físico da antena receptora como um modelo de um manipulador em cadeia aberta.

A junção das partes do sistema físico mostrado na Figura 2, obedecendo ao esquemático construtivo da Figura 1, resultou no modelo físico da antena receptora apresentado na Figura 8.

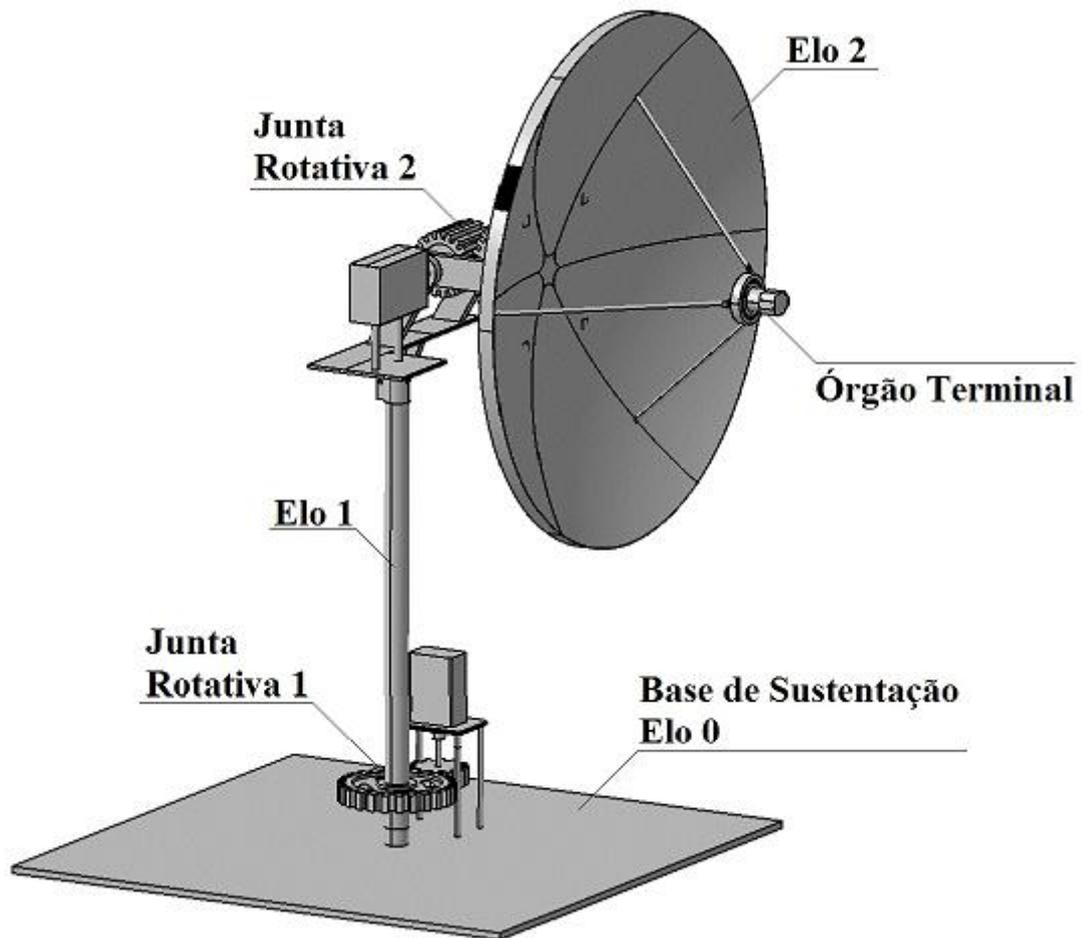


Figura 8 – Modelo físico da antena receptora

2.1.1 Obtenção das Grandezas Físicas do Modelo

Com o modelo tridimensional implementado na bancada de trabalho *Assembly Design* e, uma vez identificadas as partes do sistema que compõem cada elo, é possível obter as grandezas físicas de cada um dos elos rígidos do sistema.

O CATIA® V5 R19 disponibiliza na bancada *Assembly Design* uma barra de ferramentas denominada *Measure* na qual encontram-se recursos disponíveis para obtenção das dimensões dos sólidos, distâncias entre duas formas geométricas e as propriedades de massa do objeto (TICKOO, 2009). A Figura 9 apresenta a barra de ferramentas *Measure*.

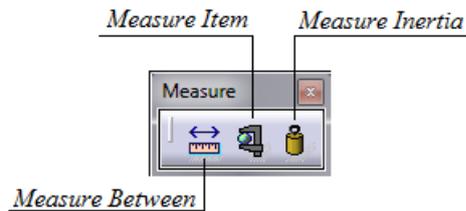


Figura 9 – Barra de ferramenta Measure

Utilizando o recurso *Measure Inertia* foram obtidas as grandezas físicas de cada elo do sistema. Ao ser selecionado tal recurso, abre-se uma tela na qual se pode realizar as leituras das grandezas físicas de forma direta. A Figura 10 e a Figura 11 mostram, respectivamente, as telas com as propriedades físicas do elo 1 e do elo 2 para o modelo da antena receptora.

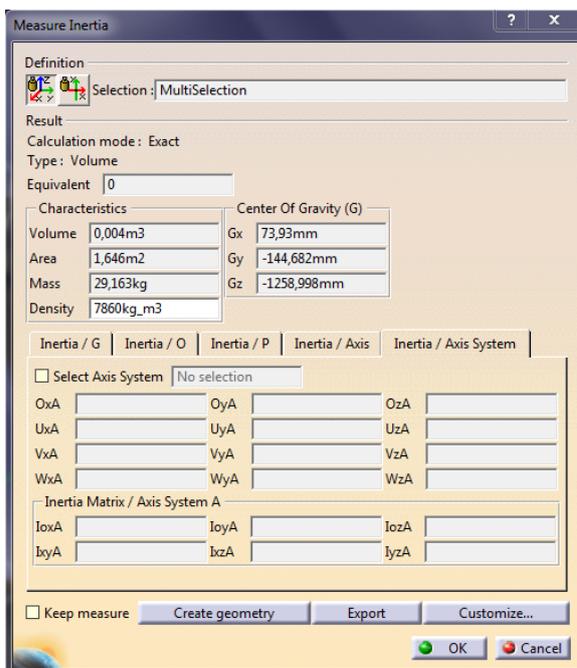


Figura 10 – Grandezas físicas do elo 1

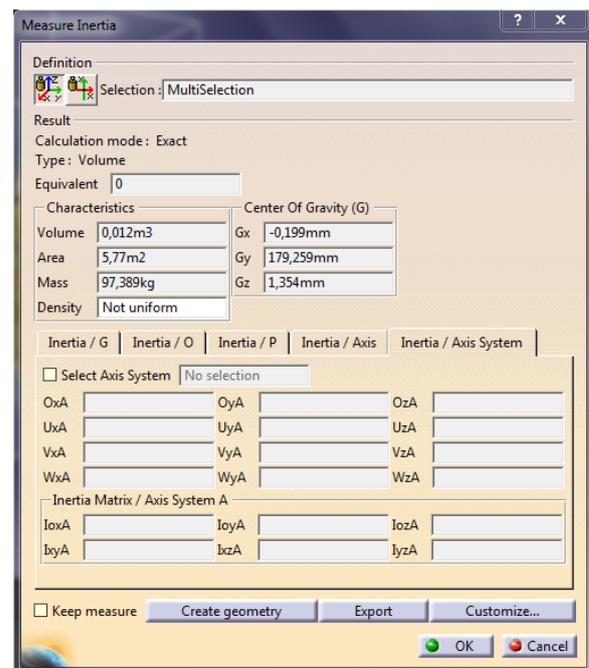


Figura 11 – Grandezas físicas do elo 2

Analisando a Figura 10 e a Figura 11 observa-se que o recurso *Measure Inertia* além de fornecer as grandezas físicas do sistema, calcula os momentos de inércia e o centro de gravidade (CG) de cada elo desde que seja indicado um sistema cartesiano de referência. É possível obter os momentos de inércia medidos a partir do CG de cada elo ou, se necessário, definir um novo sistema de coordenadas cartesiano.

As leituras das grandezas físicas para cada elo do sistema modelado foram agrupadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Grandezas físicas do modelo tridimensional

Elos	Partes Constituintes	Massa (kg)	Área (m²)	Volume (m³)
1	Suporte da Antena + Junção Base-Antena	29,163	1,646	0,004
2	Base da Parábola + Refletor Parabólico + LBNf e suportes	97,389	5,770	0,012

2.2 Modelagem Cinemática

O modelo cinemático de um sistema articulado no espaço consiste em descrever o movimento do seu órgão terminal e dos elos que o compõe sem se atentar para as forças que o provocam (ADADE FILHO, 1999; GROOVER *et al.*, 1986). Sistemas articulados podem ser compostos por juntas prismáticas ou revolutas. O movimento prismático permite um deslocamento em uma única direção; o revoluto realiza um deslocamento angular. Um elo se movimenta em relação ao seu elo anterior de acordo com o tipo da junta que os une. Assim as juntas determinam os movimentos do manipulador e associados às formas e tamanhos dos elos, determinam a arquitetura dos manipuladores (PAZOS, 2002; SILVA *et al.*, 2006).

O pleno conhecimento dos movimentos de um manipulador robótico é obtido aplicando-se técnicas que descrevem a posição e orientação dos elos em relação ao movimento das juntas.

Segundo Adade Filho (1999) e Silva *et al.* (2006) é extremamente importante a determinação da posição e orientação do órgão terminal em relação ao sistema coordenado da base do manipulador, expressas em função das variáveis das juntas. Em outras palavras, a posição do órgão terminal depende, a cada instante, dos valores dos deslocamentos angulares, para juntas rotativas, ou de deslocamentos lineares, para juntas prismáticas.

Verifica-se, portanto, que o problema da modelagem cinemática consiste em:

- Calcular a posição e orientação do órgão terminal a partir das posições das juntas, denominado de *Cinemática Direta*;
- Calcular as posições das juntas a partir de uma coordenada cartesiana (posição e orientação) desejada do órgão terminal, denominado de *Cinemática Inversa*.

A posição da junta, que pode ser medida tanto em ângulos para juntas rotativas como em deslocamentos para juntas prismáticas, recebe o nome de *variável de junta*. Já a posição no espaço descrita em um sistema coordenado recebe o nome de *coordenadas cartesianas*. A Figura 12 mostra a transformação que ocorre entre variáveis das juntas e coordenadas cartesianas na modelagem cinemática.

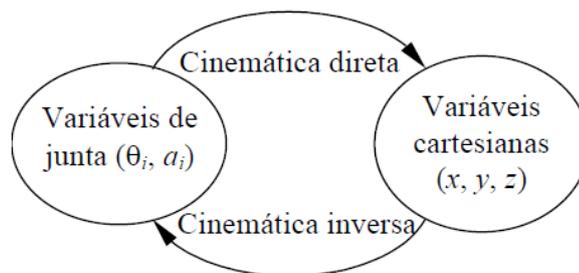


Figura 12 – Transformação entre variáveis de junta e variáveis cartesianas

Fonte: Junek Filho (2008)

2.2.1 Cinemática Direta – Notação Denavit-Hartenberg

Considerando um sistema físico com n graus de liberdade, é possível escrever a posição e orientação do órgão terminal em relação ao sistema de coordenadas da base, desde que seja inserido sistemas coordenados de forma conveniente em cada elo do sistema físico. Assim as posições e orientações desses sistemas coordenados variam à medida que o mecanismo se articula (ADADE FILHO, 1999).

A Notação de Denavit-Hartenberg (DH) é uma ferramenta utilizada para sistematizar a descrição cinemática de sistema mecânicos articulados com n graus de liberdade (Silva *et al.*,

2006), ou seja, é um método sistemático para atribuição de um referencial a cada elo da cadeia cinemática, a fim de descrever a posição e orientação relativa entre dois elos consecutivos através de transformações homogêneas (ADADE FILHO, 1999; ROMANO, 2002).

A Figura 13 apresenta um par de elos adjacentes com sistemas coordenados devidamente inseridos conforme o procedimento de locação de eixos conforme DH (LOPES, 2002; SCHILLING, 1990).

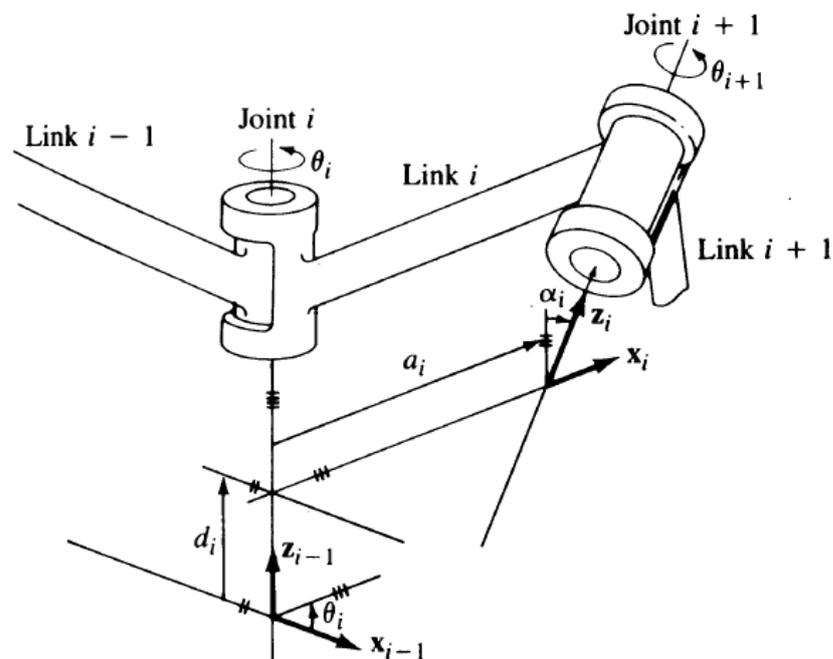


Figura 13 – Notação de Denavit-Hartenberg

Fonte: Adade Filho (1999)

Segundo Lopes (2002) existem algumas observações a cerca da notação DH, são elas:

- A origem do sistema coordenado da base pode ser alocado em qualquer ponto sobre o eixo z_0 . Os demais eixos devem obedecer a regra da mão direita;
- A origem do sistema coordenado do órgão terminal pode ser alocada em qualquer ponto conveniente do órgão terminal. A orientação dos eixos deve ser tal que x_n seja perpendicular a z_{n-1} , os demais eixos devem obedecer a regra da mão direita;

A representação DH de um elo rígido fornece quatro parâmetros a ele associados, os quais descrevem o comportamento cinemático de uma junta, ou seja, descrevem a cinemática de uma junta em relação à junta seguinte e vice-versa; descritos a seguir (Silva *et al.*, 2006):

- a_i : distância em módulo entre a interseção do eixo z_{i-1} e z_i , medida ao longo do eixo x_i , que é normal comum entre z_{i-1} e z_i ;
- α_i : ângulo (*off-set*) entre o eixo z_{i-1} e o eixo z_i , medido em torno ao eixo x_i , segundo a regra da mão direita, ou seja, é o ângulo de rotação em torno do eixo x_i , que o eixo z_{i-1} , deve girar para que fique paralelo ao eixo z_i ;
- d_i : distância entre a origem do $(i-1)$ -ésimo sistema coordenado até a interseção do eixo z_{i-1} com o eixo x_i ao longo do eixo z_{i-1} ;
- θ_i : ângulo de junta obtido entre o eixo x_{i-1} e o eixo x_i , medido em torno ao eixo z_{i-1} , segundo a regra da mão direita, ou seja, é o ângulo de rotação em torno do eixo z_{i-1} , que o eixo x_{i-1} deve girar para que fique paralelo ao eixo x_i .

Os parâmetros a_i e α_i são constantes e são obtidos através da geometria dos elos; os parâmetros d_i (se a junta for prismática) ou θ_i (se for revoluta) variam a medida que a articulação se move. Matrizes de transformações homogêneas associadas aos parâmetros DH permitem relacionar os sistemas coordenados adjacentes (LOPES, 2002).

Com os parâmetros DH definidos, o i -ésimo sistema coordenado relaciona-se com o $(i-1)$ -ésimo sistema coordenado através de quatro transformações homogêneas. A Tabela 3 apresenta as transformações homogêneas associadas aos parâmetros DH.

Tabela 3 – Transformações homogêneas DH

Transformação	Parâmetros DH	Descrição	Simbologia
Rotação	θ_i	Rotação em torno do eixo z_i de um ângulo θ_i para alinhar x_{i-1} com x_i .	$Rot(z, \theta_i)$
Translação	d_i	Translação ao longo do eixo z_{i-1} , de uma distância d_i para colocar coincidentes os eixos x_{i-1} e x_i .	$Trans(z, d_i)$
Translação	a_i	Translação ao longo do eixo x_i , de uma distância a_i para colocar coincidentes as origens e os eixos x .	$Trans(x, a_i)$
Rotação	α_i	Rotação em torno do eixo x_i de um ângulo α_i para alinhar z_{i-1} com z_i .	$Rot(x, \alpha_i)$

O produto dessas quatro transformações homogêneas dá origem a uma matriz de transformação homogênea, conhecida como Matriz de DH, onde se consegue referenciar qualquer elemento do i -ésimo sistema coordenado ao $(i-1)$ -ésimo sistema coordenado (LOPES, 2002; SILVA *et al.*, 2006). A Eq. (1) descreve a matriz de DH.

$${}^{i-1}A_i = Rot(z, \theta_i)Trans(z, d_i)Trans(x, a_i)Rot(x, \alpha_i) \quad (1)$$

Em termos de transformação homogênea direta, Adade Filho (1999), Schilling (1990), Silva *et al.* (2006) e Lopes (2002), descrevem da seguinte forma a matriz de DH:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

O software CATIA[®] V5 R19 na bancada de trabalho *Part Design* permite a inserção de sistemas de coordenadas no modelo tridimensional. Seguindo a metodologia DH, foram inseridos os sistemas de coordenadas para cada elo do modelo físico da antena receptora. A Figura 14 apresenta o resultado obtido após a aplicação do procedimento de Denavit-Hartenberg.

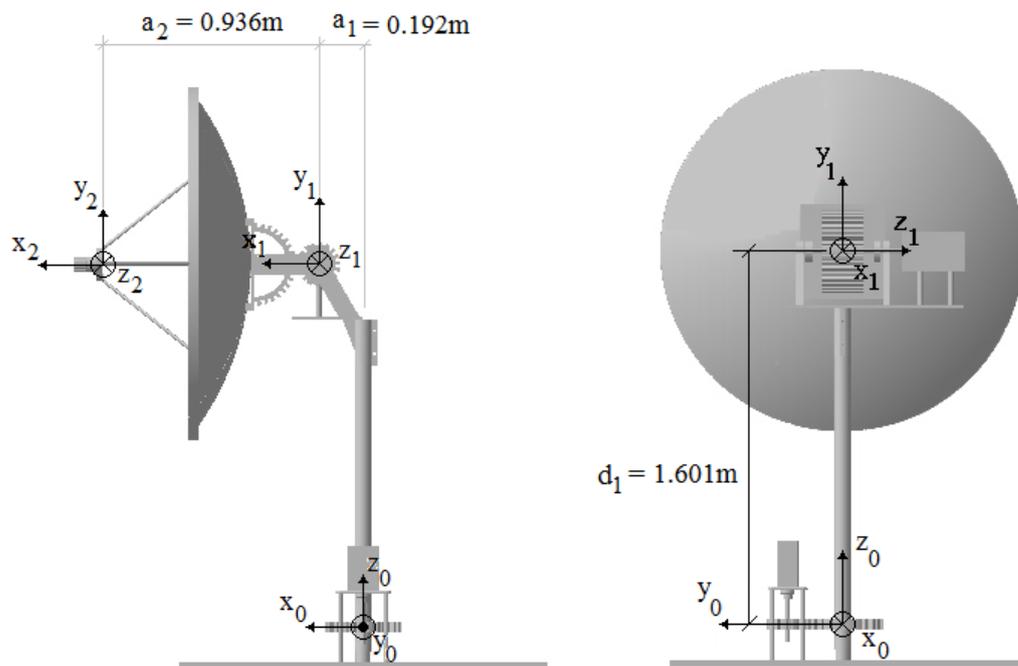


Figura 14 – Antena receptora com DH

Os parâmetros DH da antena receptora são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros DH da antena receptora

Elo (i)	a_i (m)	α_i (rad)	d_i (m)	θ_i (rad)	Variável
1	0,192	$-\pi/2$	1,601	θ_1	θ_1 (rotação)
2	0,936	0	0	θ_2	θ_2 (rotação)

Com os sistemas de coordenadas devidamente inseridos ao modelo físico da antena receptora, o CATIA[®] V5 R19 calcula os momentos de inércia e os centros de gravidade de cada elo já referenciado ao sistema de coordenadas afixado aos elos. A Tabela 5 resume os parâmetros físicos para a antena receptora.

Tabela 5 – Parâmetros físicos da antena receptora

Parâmetros Físicos		Elo 1	Elo 2
Massa (kg)		29,163	97,389
Centro de Massa (m)	x_c	-0,145	-0,757
	y_c	-1,259	0,001
	z_c	0,074	0,000
Momentos de Inércia (kg.m ²)	I_{xx}	58,378	7,887
	I_{yy}	2,094	62,400
	I_{zz}	58,173	62,328
	I_{xy}	-6,872	0,007
	I_{xz}	0,003	0,007
	I_{yz}	0,248	$2,755 \cdot 10^{-4}$

Uma vez reconhecidos os parâmetros DH do modelo físico da antena receptora, as matrizes DH podem ser facilmente obtidas a partir da Eq. 2. As matrizes DH que relaciona o $(i-1)$ -ésimo sistema coordenado com o i -ésimo sistema coordenado, ${}^{i-1}A_i$, são apresentadas nas Eq. (3) e (4).

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & 0,192 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0,192 \sin \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & 1,601 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0,936 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0,936 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A matriz DH que relaciona o sistema coordenado locado no órgão terminal com o sistema de coordenadas da base da antena receptora, 0A_2 , é expressa de forma analítica na Eq. (5).

$${}^0A_2 = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \quad (5)$$

Reescrevendo a Eq. (5) na forma matricial temos:

$${}^0A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \theta_2 & -\cos \theta_1 \sin \theta_2 & -\sin \theta_1 & 0,936 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + 0,192 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \cos \theta_2 & -\sin \theta_1 \sin \theta_2 & \cos \theta_1 & 0,936 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + 0,192 \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 1,601 - 0,936 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2.2 Cinemática Inversa

A Cinemática Inversa consiste em, uma vez escolhida a posição do órgão terminal e conhecido o comprimento dos elos do sistema, calcular o deslocamento que cada junta deverá realizar com relação ao sistema de coordenadas da base para que o órgão terminal de fato assumira aquela posição (JUNEK FILHO, 2008).

Quando comparado com a cinemática direta o problema da cinemática inversa se torna muito mais complexo (CRAIG, 2004; LOPES, 2002):

- Envolve equações não-lineares onde nem sempre se consegue uma solução analítica;
- Podem existir soluções múltiplas que aumentam com o número de parâmetros DH não nulos;
- Podem existir infinitas soluções, no caso de uma ou mais juntas serem *redundantes*¹ para a realização da tarefa ou se tornarem redundantes por estar trabalhando em um posição/orientação *singular*²;
- Não existir solução. A posição desejada para o órgão terminal não está contida no espaço de trabalho do manipulador.

Outro fator implicante na complexidade é a inexistência de um procedimento sistemático explícito como a Notação DH na cinemática direta para a solução do problema cinemático inverso (SCHILLING, 1990). Devido a isso cada classe de manipulador deve ser tratada separadamente na intenção de se encontrar uma solução tangível a seu problema.

No entanto, mesmo sendo mais complexo, o problema da cinemática inversa se torna mais útil no estudo de controle de trajetória dos manipuladores robóticos. A mesma contribui na escolha da melhor configuração de juntas para o mecanismo visando um movimento com o mínimo de esforço possível.

De maneira geral os métodos para solução do problema cinemático inverso podem ser divididos em dois segmentos: aqueles que resultam em uma *solução analítica* e aqueles que se baseiam em *soluções numéricas iterativas* (ADADE FILHO, 1999; LOPES, 2002).

As *soluções analíticas* são conhecidas como soluções em “forma fechada” pois permitem obter todas as soluções para uma certa coordenada cartesiana. Geralmente são aplicadas no estudo de manipuladores robóticos cuja quantidade de parâmetros DH nulos seja elevada. Por consumirem menor tempo em relação às *soluções numéricas iterativas* são

¹ Um manipulador robótico é chamado de redundante quando o número de graus de liberdade do mecanismo é maior que o número de variáveis necessárias para realizar uma tarefa (SCIAVICCO; SICILIANO, 1996).

² A singularidade ocorre quando há o alinhamento de dois ou mais eixos dos sistemas de coordenadas presentes no manipulador robótico (SCIAVICCO; SICILIANO, 1996).

adequadas em aplicações em tempo real. Quanto aos métodos envolvidos podem se valer de métodos geométricos e métodos algébricos. Nos métodos geométricos busca-se decompor a geometria espacial do mecanismo numa série de problemas de geometria plana, ao passo que, nos métodos algébricos utilizam-se das matrizes DH donde advém um conjunto de equações não-lineares (ADADE FILHO, 1999).

As *soluções numéricas iterativas*, segundo Lopes (2002) são mais gerais sendo aplicados a qualquer tipo de manipuladores robóticos, onde para uma dada coordenada cartesiana apresentam apenas uma única solução, embora possam apresentar problemas de convergência.

Alguns exemplos de aplicações das *soluções analíticas* e das *soluções numéricas iterativas*, bem como uma explanação mais criteriosa sobre o problema cinemático inverso podem ser encontrados em Adade Filho (1999), Craig (2004) e Lopes (2002). Recentemente, Scofano (2010) e Santos (*et al.*, 2006), abordaram soluções utilizando Algoritmos Genéticos (AG) para o problema da cinemática inversa de manipuladores redundantes.

3 MODELAGEM DINÂMICA

O modelo dinâmico de um manipulador robótico consiste em relacionar a evolução temporal de sua configuração (em termos de posição, velocidade e aceleração) com as forças e momentos que nele atuam (LOPES, 2002); em outras palavras relacionam os movimentos de seus elos (deslocamentos) com as forças generalizadas (torques) que atuam sobre cada junta do mecanismo. Tal relação pode ser expressa por um conjunto de equações diferenciais ordinárias chamadas de *equações dinâmicas de movimento* (CAMPOS, 2005).

O objetivo da modelagem dinâmica é obter as equações de movimento. Em síntese são equações diferenciais não-lineares que resultam do processo da modelagem, cuja solução descreve os movimentos do órgão terminal em função dos torques aplicados às juntas dos mecanismos (LATRE, 1988).

Lee (1983) afirma que o pleno conhecimento do modelo dinâmico de um manipulador robótico é fundamental para a implementação computacional de seus movimentos e para o projeto de sistema de controle.

Os conceitos de modelagem dinâmica para manipuladores robóticos em cadeia aberta estão claramente estabelecidos na comunidade acadêmica. Os esforços tem se direcionado em encontrar modelos com implementações computacionais mais eficientes, sobretudo quando se trata da inclusão em sistemas de controle em tempo real (LOPES, 2002).

Segundo Fu *et al.* (1987), Latre (1988) e Santos, R. (2005), o modelo dinâmico de um manipulador robótico em cadeia aberta pode ser matematicamente expresso por:

$$F_i = \sum_{k=1}^n D_{ik} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n H_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m + C_i \quad (7)$$

Na forma matricial:

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{D}(\mathbf{q}(t))\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{H}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) + \mathbf{C}(\mathbf{q}(t)) \quad (8)$$

Onde:

$\mathbf{F}(t)$	vetor $n \times 1$ das forças generalizadas nas juntas;
$\mathbf{D}(\mathbf{q}(t))$	matriz $n \times n$ que representa a inércia;
$\mathbf{H}(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t))$	vetor $n \times 1$ de efeitos de Coriolis e a força centrífuga;
$\mathbf{C}(\mathbf{q}(t))$	vetor $n \times 1$ dos efeitos da aceleração da gravidade;
$\mathbf{q}(t)$	vetor $n \times 1$ da posição das variáveis da junta;
$\dot{\mathbf{q}}(t)$	vetor $n \times 1$ da velocidade das variáveis da junta;
$\ddot{\mathbf{q}}(t)$	vetor $n \times 1$ da aceleração das variáveis da junta;

Segundo Lopes (2002) a modelagem dinâmica de um sistema físico assume um papel fundamental na simulação e no projeto de sistema de controle:

- Para o sistema de controle se faz necessário conhecer as forças generalizadas (torques) aplicados às juntas, para que o órgão terminal execute a trajetória desejada. Nessa configuração são conhecidas a posição (\mathbf{q}) e velocidade da junta ($\dot{\mathbf{q}}$) sendo especificada a aceleração desejada $\ddot{\mathbf{q}}$. A isso se dá o nome de *dinâmica inversa*. A Figura 15 apresenta o diagrama de blocos para a dinâmica inversa;

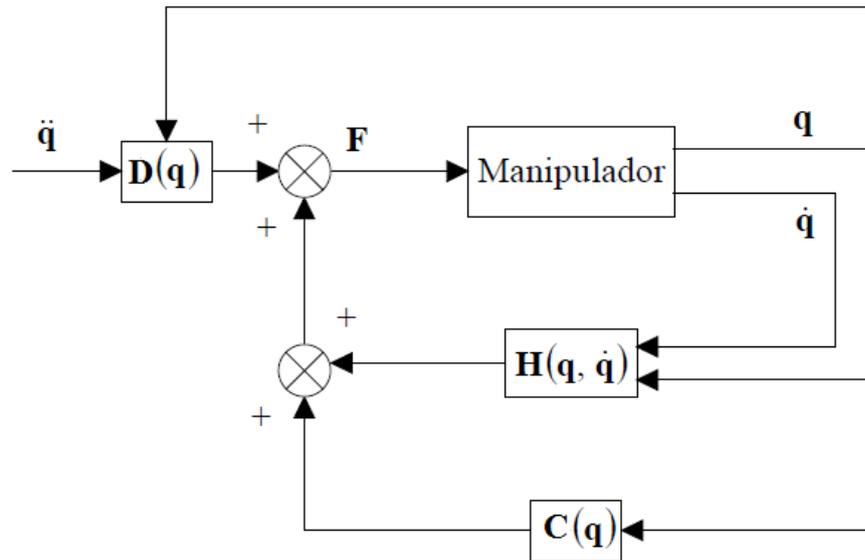


Figura 15 – Diagrama de blocos para o modelo de dinâmica inversa

- Para a simulação busca-se saber como se comportará o mecanismo uma vez aplicados as forças generalizadas (torques) às juntas, ou seja, qual será a posição, velocidade e aceleração do órgão terminal em função das forças generalizadas aplicadas. Nessa configuração são conhecidas a posição (\mathbf{q}) e velocidade da junta ($\dot{\mathbf{q}}$) sendo especificada a ação de controle \mathbf{F} . A atualização da posição e velocidade ocorre pela integração da aceleração. A isso se dá o nome de *dinâmica direta*. A Figura 16 apresenta o diagrama de blocos para a dinâmica direta.

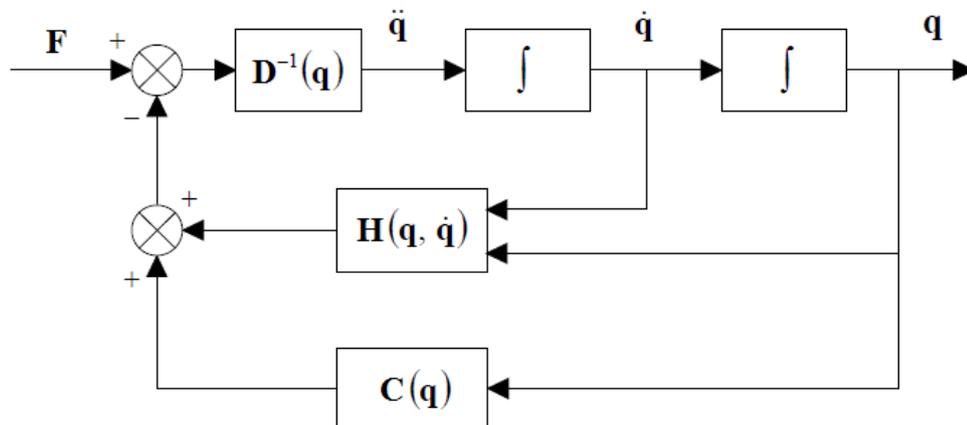


Figura 16 – Diagrama de blocos para o modelo de dinâmica direta

Tipicamente as duas técnicas bastante utilizadas na literatura para obtenção do modelo dinâmico são o *Método de Lagrange* e o *Método de Newton-Euler* (LATRE, 1988).

O método de *Newton-Euler* consiste em descrever a dinâmica de um mecanismo a partir das forças e momentos aplicados aos corpos rígidos (elos). Baseia-se em duas equações: a equação de *Newton* que descreve a translação do centro de massa do corpo rígido, e a equação de *Euler* que descreve a rotação do corpo rígido em torno do centro de massa (LOPES, 2002).

O método de *Lagrange* descreve o comportamento dinâmico do sistema em termos das energias armazenadas no sistema. Mais precisamente é descrito em função de um escalar o *Lagrangeano* que é formado pela diferença entre a energia cinética e a energia potencial para cada junta do sistema (ADADE FILHO, 1999).

Por fim, tanto o método de *Lagrange* como o método de *Newton-Euler*, são métodos sistemáticos que permitem obter as equações dinâmicas de movimento para sistemas físicos (LOPES, 2002).

3.1 Método de Euler-Lagrange

O Formalismo de *Euler-Lagrange* provem do desdobramento do estudo da mecânica variacional, mais precisamente do *Princípio de Hamilton* ou *Princípio da Mínima Ação*. Tal princípio diz que o movimento de um sistema é aquele o qual a ação seja mínima, dentre aqueles movimentos permitidos. Uma abordagem mais detalhada sobre o formalismo variacional e o *Princípio de Hamilton* pode ser encontrada em Barcellos Neto (2004), Lemos (2007) e Meirovitch (1970).

A equação de *Euler-Lagrange* para sistemas conservativos pode ser expressa por:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = F_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (9)$$

Onde:

- j índice do grau de liberdade analisado;
- q variável generalizada;
- F força generalizada aplicada na junta;
- T energia cinética;
- V energia potencial.

O *Lagrangeano* (L) é função da coordenada e velocidade generalizada (ADADE FILHO, 1999). Pode ser expresso por:

$$L(q, \dot{q}) = T - V \quad (10)$$

As equações de movimentos para sistemas articulados no plano tridimensional podem ser obtidas estendendo o formalismo de *Euler-Lagrange*, empregando-se a notação DH para locação dos sistemas de coordenadas e determinação dos parâmetros DH (apresentado no capítulo 2 dessa dissertação).

3.1.1 Energia Cinética e Energia Potencial

O desenvolvimento da formulação Lagrangeana para obtenção das equações de movimento de um manipulador robótico consiste em conhecer as energias contidas no sistema. Por conseguinte, para se conhecer a energia cinética do sistema necessita-se conhecer a velocidade de cada junta do sistema (FU *et al.*, 1987).

Seja p_i um ponto fixo no elo i , cuja posição está descrita em coordenadas homogêneas referenciadas ao sistema de coordenadas do próprio elo i , conforme ilustrado na Figura 17:

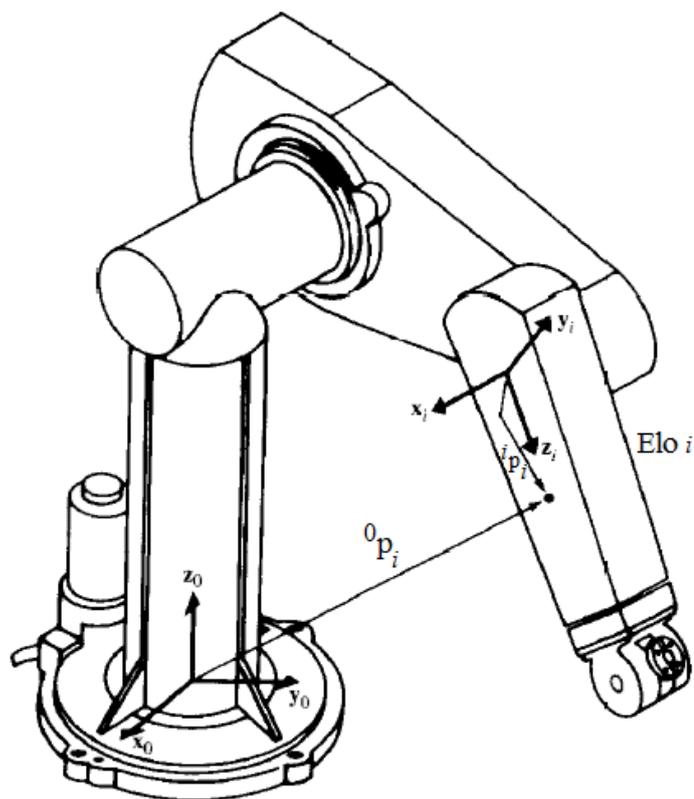


Figura 17 – Ponto p_i no elo i

Fonte: Fu *et al.* (1987)

Logo, defini-se:

$${}^i p_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = (x_i, y_i, z_i, 1)^T \quad (11)$$

Utilizando uma matriz homogênea ${}^0 A_i$, que relaciona o i -ésimo sistema de coordenadas com o sistema coordenado da base, é possível reescrever o ponto p_i referenciado a base:

$${}^0 p_i = {}^0 A_i \cdot {}^i p_i \quad (12)$$

A velocidade do ponto é, então,

$$v_i = \frac{d}{dt} ({}^0 p_i) = \frac{d}{dt} ({}^0 A_i \cdot {}^i p_i) \quad (13)$$

Segundo Fu *et al.* (1987) e Adade Filho (1999), a velocidade pode ser escrita de uma forma compacta por:

$$v_i = \left(\sum_{j=1}^i \frac{\partial {}^0 A_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \right) {}^i p_i \quad (14)$$

A derivada parcial de 0A_i em relação a q_i pode ser obtida através de produtos de matrizes com o auxílio de uma matriz Q_i , assim definida (FU *et al.*, 1987; Adade Filho, 1999):

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ para junta rotativa} \quad (15)$$

$$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ para junta prismática} \quad (16)$$

Então,

$$\frac{\partial {}^{i-1}A_i}{\partial q_i} = Q_i \cdot {}^{i-1}A_i \quad (17)$$

Assim, segundo Fu *et al.* (1987) o efeito de movimento relativo de uma junta j sobre o elo i pode ser escrito utilizando a notação U_{ij} por:

$$U_{ij} = \frac{\partial {}^0A_i}{\partial q_j} = \begin{cases} {}^0A_{j-1} \cdot Q_j \cdot {}^{j-1}A_i & \text{para } j \leq i \\ 0 & \text{para } j > i \end{cases} \quad (18)$$

Logo, a Eq. (14) pode ser expressa por:

$$v_i = \left(\sum_{j=1}^i U_{ij} \dot{q}_j \right) {}^i p_i \quad (19)$$

Observa-se que, para encontrar o efeito de interação do movimento entre as juntas j e k , basta derivar U_{ij} em relação a q_k :

$$U_{ijk} = \frac{\partial U_{ij}}{\partial q_k} = \begin{cases} {}^0A_{j-1} \cdot Q_j \cdot {}^{j-1}A_{k-1} \cdot Q_k \cdot {}^{k-1}A_i & i \geq k \geq j \\ {}^0A_{k-1} \cdot Q_k \cdot {}^{k-1}A_{j-1} \cdot Q_j \cdot {}^{j-1}A_i & i \geq j \geq k \\ 0 & i < j \text{ ou } i < k \end{cases} \quad (20)$$

Portanto a energia cinética total do manipulador é dada por (ADADE FILHO, 1999):

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i Tr(U_{ij} J_i U_{ik}^T) \dot{q}_j \dot{q}_k \quad (21)$$

Sendo que J_i é a matriz de inércia do elo i , expressa por:

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{-I_{xx}^i + I_{yy}^i + I_{zz}^i}{2} & I_{xy}^i & I_{xz}^i & m_i \bar{x}_i \\ I_{xy}^i & \frac{I_{xx}^i - I_{yy}^i + I_{zz}^i}{2} & I_{yz}^i & m_i \bar{y}_i \\ I_{xz}^i & I_{yz}^i & \frac{I_{xx}^i + I_{yy}^i - I_{zz}^i}{2} & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad (22)$$

Onde:

m_i	massa do elo i ;
I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}	momentos de inércia diretos;
I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}	momentos de inércia cruzados.

O vetor da posição do centro de massa do elo i expresso no sistema de coordenadas do próprio elo i é dado por:

$${}^i r_i = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, 1)^T \quad (23)$$

A energia potencial de um elo de um manipulador robótico pode ser escrito por:

$$V = -m_i g {}^0 r_i = -m_i g ({}^0 A_i {}^i r_i) \quad (24)$$

Onde:

m_i massa do elo i ;
 $g = (0, 0, g_z, 0)$ vetor de aceleração da gravidade referenciado no sistema de coordenadas da base. (Admitindo-se o eixo z na vertical)

A energia potencial total de um manipulador é expressa por (FU *et al.*, 1987):

$$V = \sum_{i=1}^n V_i = - \sum_{i=1}^n m_i g ({}^0A_i {}^i r_i) \quad (25)$$

3.1.2 Equações Dinâmicas de Movimento

Seguindo a metodologia de se aplicar em conjunto o formalismo de *Euler-Lagrange* com a Notação DH foi desenvolvido um algoritmo para obtenção das equações dinâmicas de movimento para manipuladores robótico em cadeia aberta. Tal procedimento consiste basicamente em operações matriciais a partir das matrizes DH do sistema, fazendo com que a complexidade computacional seja reduzida.

A proposta desse algoritmo é escrever as equações dinâmicas de movimento, apresentada na Eq. (7) obtendo-se cada um dos termos que a compõe.

Substituindo-se as Eq. (21) e (25) na Eq. (10) encontra-se o Lagrangeano (L):

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i [Tr(U_{ij}J_i U_{ik}^T) \dot{q}_j \dot{q}_k] + \sum_{i=1}^n m_i g ({}^0A_i^i r_i) \quad (26)$$

Aplicando a equação de *Euler-Lagrange*, Eq. (9), é obtido o torque generalizado τ_i necessário para impulsionar o elo i do manipulador robótico (FU *et al.*, 1987):

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^j Tr(U_{jk}J_j U_{ji}^T) \ddot{q}_k + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^j \sum_{m=1}^j Tr(U_{jkm}J_j U_{ji}^T) \dot{q}_k \dot{q}_m - \sum_{j=1}^n m_j g U_{ji}^j r_j \quad (27)$$

Comparando a Eq. (7) com a Eq. (27), são obtidos isoladamente os termos da equação dinâmica de movimento. Para tanto basta igualar o segundo termo das duas equações.

Logo,

$$D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^n Tr(U_{jk}J_j U_{ji}^T) \quad (28)$$

$$H_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n Tr(U_{jkm}J_j U_{ji}^T) \quad (29)$$

$$C_i = \sum_{j=i}^n -m_j g U_{ji}^j r_j \quad (30)$$

O algoritmo para obtenção das equações dinâmicas de movimento pode ser definido da seguinte forma:

Passo 1: Construir as matrizes DH, ${}^{i-1}A_i$, a partir da aplicação da notação DH e dos Parâmetros DH;

Passo 2: Construir as matrizes de inércia, J_i , dado os momentos de inércia diretos I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} e os momentos de inércia cruzados I_{xy}, I_{xz}, I_{yz} ;

Passo 3: Construir o vetor de posição do centro de massa, ${}^i r_i$, a partir da geometria de cada elo do sistema, dadas as coordenadas cartesianas do centro de massa;

Passo 4: Ler as matrizes auxiliares de derivação, Q_i ;

Passo 5: Obter as matrizes U_{ij} – efeitos de movimento da junta j sobre os pontos do elo i , a partir da Eq. (18);

Passo 6: Obter as matrizes U_{ijk} – efeitos de interação de movimento da junta j e k sobre os pontos do elo i , a partir da Eq. (20);

Passo 7: Calcular os elementos da matriz de inércia D_{ik} (primeiro termo da equação dinâmica de movimento), a partir da Eq. (28);

Passo 8: Calcular os elementos do vetor de efeitos de Coriolis e a força centrífuga, H_{ikm} (segundo termo da equação dinâmica de movimento), a partir da Eq. (29);

Passo 9: Calcular os elementos do vetor dos efeitos da aceleração da gravidade C_i (terceiro termo da equação dinâmica de movimento), a partir da Eq. (30);

Passo 10: Construir a equação dinâmica de movimento para a junta i , τ_i , através da adição dos termos obtidos nos passos 6, 7 e 8, conforme Eq. (7);

Passo 11: Repetir o passo 9 para as n juntas do sistema.

A Tabela 6 apresenta as equações envolvidas em cada passo do algoritmo de obtenção das equações dinâmicas de movimento para manipuladores robóticos em cadeia aberta.

Tabela 6 – Algoritmo de obtenção das equações dinâmicas de movimento

Passos	Equações Envolvida
1	${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen } \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen } \theta_i \text{sen } \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \text{sen } \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen } \alpha_i & a_i \text{sen } \theta_i \\ 0 & \text{sen } \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (2)}$
2	$J_i = \begin{bmatrix} \frac{-I_{xx}^i + I_{yy}^i + I_{zz}^i}{2} & I_{xy}^i & I_{xz}^i & m_i \bar{x}_i \\ I_{xy}^i & \frac{I_{xx}^i - I_{yy}^i + I_{zz}^i}{2} & I_{yz}^i & m_i \bar{y}_i \\ I_{xz}^i & I_{yz}^i & \frac{I_{xx}^i + I_{yy}^i - I_{zz}^i}{2} & m_i \bar{z}_i \\ m_i \bar{x}_i & m_i \bar{y}_i & m_i \bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \quad \text{Eq. (22)}$
3	${}^i r_i = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, 1)^T \quad \text{Eq. (23)}$
4	$Q_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Junta Rotativa} \quad \text{Eq. (15),}$ $Q_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Junta Prismática} \quad \text{Eq. (16)}$
5	$U_{ij} = \begin{cases} {}^0A_{j-1} \cdot Q_j \cdot {}^{j-1}A_i & \text{para } j \leq i \\ 0 & \text{para } j > i \end{cases} \quad \text{Eq. (18)}$

$$6 \quad U_{ijk} = \begin{cases} {}^0A_{j-1} \cdot Q_j \cdot {}^{j-1}A_{k-1} \cdot Q_k \cdot {}^{k-1}A_i & i \geq k \geq j \\ {}^0A_{k-1} \cdot Q_k \cdot {}^{k-1}A_{j-1} \cdot Q_j \cdot {}^{j-1}A_i & i \geq j \geq k \\ 0 & i < j \text{ ou } i < k \end{cases} \quad \text{Eq. (20)}$$

$$7 \quad D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^n \text{Tr}(U_{jk}J_jU_{ji}^T) \quad \text{Eq. (28)}$$

$$8 \quad H_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^n \text{Tr}(U_{jkm}J_jU_{ji}^T) \quad \text{Eq. (29)}$$

$$9 \quad C_i = \sum_{j=i}^n -m_j g U_{ji}^j r_j \quad \text{Eq. (30)}$$

$$10 \quad \tau_i = \sum_{k=1}^n D_{ik} \ddot{q}_k + \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n H_{ikm} \dot{q}_k \dot{q}_m + C_i \quad \text{Eq. (7)}$$

$$11 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

3.2 Modelador Automático para Manipuladores Robóticos em Cadeia Aberta com Dois Graus de Liberdade

Foi implementado o algoritmo desenvolvido para obtenção das equações dinâmicas de movimento descrito na seção 3.1 no *software* MAPLE[®] 13.

O *software* MAPLE[®] 13 começou a ser desenvolvido em 1980 pela SCG - *Symbolic Computation Group* sediada na Universidade de Waterloo no Canadá. A partir de 1988 passou a ser desenvolvido e comercializado pela *Maplesoft*, uma companhia também sediada em Waterloo no Canadá, que além de desenvolver *softwares* de computação matemática, disponibiliza também produtos de alto desempenho em modelagem de sistemas físicos, como por exemplo o MAPLE SIM[®] (MARIANI, 2005).

O ambiente oferecido pelo MAPLE[®] 13 permite a manipulação simbólica de equações matemáticas o que contribuiu para a implementação rápida e eficaz das operações matriciais da formulação Lagrangeana, contida no algoritmo.

Desta forma foi possível desenvolver um modelador automático simbólico para obtenção das equações dinâmicas de movimento para um manipulador robótico em cadeia aberta com 2 gdl, que pode ser estendido para n graus de liberdade.

As entradas necessárias para o modelador obter as equações dinâmicas de movimento são:

- Os Parâmetros DH do sistema;
- Os momentos de inércia para cada elo do sistema;
- Posição do centro de massa para cada elo.
- As Matrizes Auxiliares de derivação Q_i , conforme o tipo de cada junta do sistema.

Cada entrada do programa gera um conjunto de matrizes no modelador. A Tabela 7 apresenta a relação entre as entradas a serem fornecidas, as matrizes geradas e os passos do algoritmo, correspondentes.

Tabela 7 – Entradas do modelador automático

Entradas do Algoritmo	Matrizes	Passo do Algoritmo
Parâmetros DH ($a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i$)	Matrizes DH: ${}^{i-1}A_i$ e 0A_i	1
Momentos de Inércia ($I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}$)	Matriz de momentos de Inércia: J_i	2
Coordenadas do Centro de massa ($\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$)	Vetor de posição de centro de massa: ${}^i r_i$	3
Matrizes Auxiliares de Derivação	Q_i (<i>revolutas ou prismáticas</i>)	4

Os demais passos são calculados automaticamente a partir das entradas.

3.3 Modelo Dinâmico de Um Manipulador 2R Planar

Para validar o modelador automático para obtenção das equações dinâmicas de movimento considera-se o manipulador planar com 2 gdl discutido em Fu *et al.* (1987). A Figura 18 apresenta o manipulador 2R planar com sistemas de coordenadas para cada elo conforme a Notação DH. As entradas necessárias para o modelador automático podem ser facilmente obtidas ao analisar as formas geométricas dos elos do manipulador.

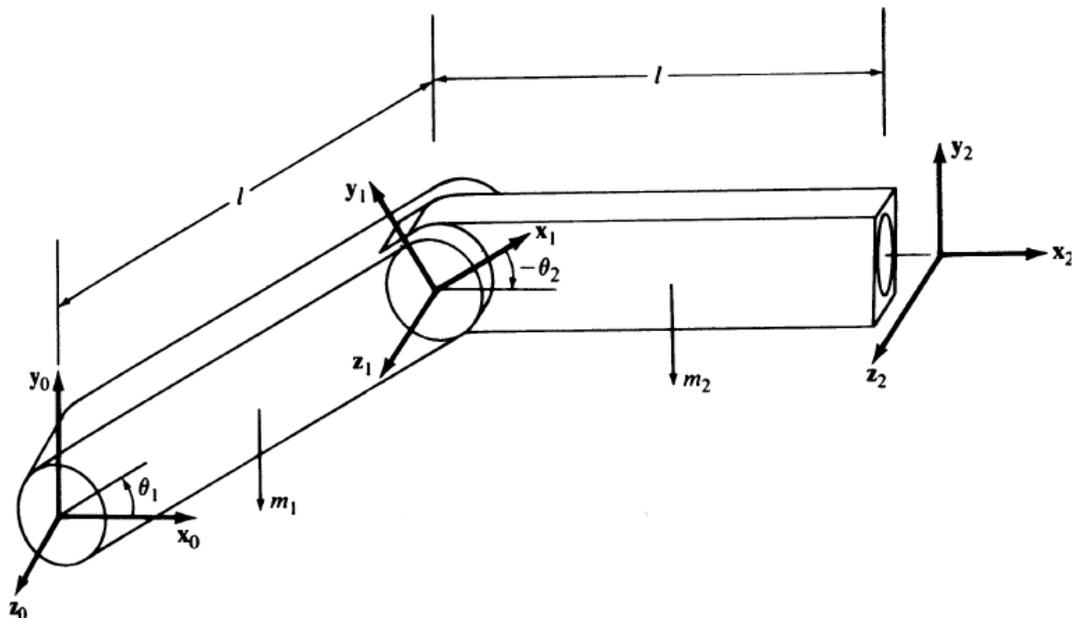


Figura 18 – Manipulador planar com 2 gdl

Fonte: Fu *et al.* (1987)

A Tabela 8 apresenta as entradas do modelador automático para o manipulador 2R planar obtidas a partir da Figura 18.

Tabela 8 – Entradas do modelador automático para o manipulador 2R planar

Entradas do Modelador	Manipulador 2R Planar	
	Elo 1	Elo2
Parâmetros DH ($a_i, \alpha_i, d_i, \theta_i$)	$a_1 = l, \alpha_1 = 0, d_1 = 0,$ θ_1 (variável da junta 1)	$a_2 = l, \alpha_2 = 0, d_2 = 0,$ θ_2 (variável da junta 2)
Momentos de Inércia ($I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}$)	$I_{xx} = 0, I_{yy} = m_1 l/3,$ $I_{yy} = m_1 l/3, I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0.$	$I_{xx} = 0, I_{yy} = m_2 l/3,$ $I_{yy} = m_2 l/3, I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0.$
Coordenadas do Centro de massa ($\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$)	$\bar{x} = -l/2, \bar{y} = 0, \bar{z} = 0.$	$\bar{x} = -l/2, \bar{y} = 0, \bar{z} = 0.$
Matrizes Auxiliares de Derivação	Q_i para junta rotativa	Q_i para junta rotativa

As matrizes DH do manipulador 2R planar são obtidas aplicando à Eq. (2) os parâmetros DH contidos na Tabela 8.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\text{sen } \theta_1 & 0 & l \cos \theta_1 \\ \text{sen } \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & l \text{sen } \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\text{sen } \theta_2 & 0 & l \cos \theta_2 \\ \text{sen } \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l \text{sen } \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$${}^0A_2 = {}^0A_1 {}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2) & -\sin(\theta_1+\theta_2) & 0 & l \cos(\theta_1+\theta_2) + \cos \theta_1 \\ \sin(\theta_1+\theta_2) & \cos(\theta_1+\theta_2) & 0 & l \sin(\theta_1+\theta_2) + \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Utilizando na Eq. 22 os momentos de inércia apresentados na Tabela 8 para o manipulador 2R planar, Fu *et al.* (1987) define as matrizes de momento de inércia J_i como:

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{m_1 l^2}{3} & 0 & 0 & -\frac{m_1 l}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{m_1 l}{2} & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} \frac{m_2 l^2}{3} & 0 & 0 & -\frac{m_2 l}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{m_2 l}{2} & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

A partir das coordenadas cartesianas do centro de massa para cada elo do manipulador 2R planar expressas na Tabela 8, o vetor posição de centro de massa para cada elo é, então,

$${}^1r_1 = {}^2r_2 = \left(-\frac{l}{2}, 0, 0, 1\right)^T \quad (36)$$

Como o manipulador é composto somente por juntas rotativas utilizaremos a matriz auxiliar de derivação Q_i para juntas rotativas expressa na Eq. (15).

Assim, usando a Eq. (18), as matrizes U_{ij} que expressam os efeitos de movimento da junta j sobre os pontos do elo i , são dadas por:

$$U_{11} = Q_1 {}^0A_1 = \begin{bmatrix} -\text{sen } \theta_1 & -\text{cos } \theta_1 & 0 & -l \text{sen } \theta_1 \\ \text{cos } \theta_1 & -\text{sen } \theta_1 & 0 & l \text{cos } \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$U_{12} = U_{21} = Q_1 {}^0A_2 = \begin{bmatrix} -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & -\text{cos}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & -l(\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + \text{sen } \theta_1) \\ \text{cos}(\theta_1 + \theta_2) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l(\text{cos}(\theta_1 + \theta_2) + \text{cos } \theta_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$U_{22} = {}^0A_1 Q_1 {}^1A_2 = \begin{bmatrix} -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & -\text{cos}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & -l \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) \\ \text{cos}(\theta_1 + \theta_2) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & l(\text{cos}(\theta_1 + \theta_2)) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

As matrizes U_{ijk} que expressam os efeitos de interação de movimento da junta j e k sobre os pontos do elo i são obtidas a partir da Eq. (20):

$$U_{111} = Q_1 Q_1 {}^0A_1 = \begin{bmatrix} -\text{cos } \theta_1 & \text{sen } \theta_1 & 0 & -l \text{cos } \theta_1 \\ -\text{sen } \theta_1 & -\text{cos } \theta_1 & 0 & -l \text{sen } \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$U_{211} = Q_1 Q_1 {}^0A_2 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1+\theta_2) & \sin(\theta_1+\theta_2) & 0 & -l(\cos(\theta_1+\theta_2) + \cos \theta_1) \\ \cos(\theta_1+\theta_2) & -\sin(\theta_1+\theta_2) & 0 & -l(\sin(\theta_1+\theta_2) + \sin \theta_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$U_{212} = U_{212} = Q_1 {}^0A_1 Q_2 {}^1A_2 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1+\theta_2) & \sin(\theta_1+\theta_2) & 0 & -l \cos(\theta_1+\theta_2) \\ -\sin(\theta_1+\theta_2) & -\cos(\theta_1+\theta_2) & 0 & -l \sin(\theta_1+\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$U_{222} = {}^0A_1 Q_2 Q_2 {}^1A_2 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1+\theta_2) & \sin(\theta_1+\theta_2) & 0 & -l \cos(\theta_1+\theta_2) \\ -\sin(\theta_1+\theta_2) & -\cos(\theta_1+\theta_2) & 0 & -l \sin(\theta_1+\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

Pelas Eq. (28), (29) e (30) são calculados os termos da equação dinâmica de movimento para o manipulador planar,

Termos da Matriz de Inércia D_{ik} :

$$D_{11} = Tr(U_{11} J_1 U_{11}^T) + Tr(U_{21} J_2 U_{21}^T) = \frac{1}{3} m_1 l^2 + \frac{4}{3} m_2 l^2 + m_2 l^2 \cos \theta_2 \quad (44)$$

$$D_{12} = D_{21} = Tr(U_{22} J_2 U_{21}^T) = \frac{1}{3} m_2 l^2 + \frac{1}{2} m_2 l^2 \cos \theta_2 \quad (45)$$

$$D_{22} = Tr(U_{22} J_2 U_{22}^T) = \frac{1}{3} m_2 l^2 \quad (46)$$

Termos do vetor que representa o efeito de Coriolis e a força centrífuga, H_{ikm} :

$$H_{111} = Tr(U_{111} J_1 U_{11}^T) + Tr(U_{211} J_2 U_{21}^T) = 0 \quad (47)$$

$$H_{112} = H_{121} = Tr(U_{212} J_2 U_{21}^T) = -\frac{1}{2} m_2 l^2 \text{sen } \theta_2 \quad (48)$$

$$H_{122} = Tr(U_{222} J_2 U_{21}^T) = -\frac{1}{2} m_2 l^2 \text{sen } \theta_2 \quad (49)$$

$$H_{211} = Tr(U_{211} J_2 U_{22}^T) = \frac{1}{2} m_2 l^2 \text{sen } \theta_2 \quad (50)$$

$$H_{212} = H_{221} = Tr(U_{212} J_2 U_{22}^T) = 0 \quad (51)$$

$$H_{222} = Tr(U_{222} J_2 U_{22}^T) = 0 \quad (52)$$

Termos do vetor que representa os efeitos da aceleração da gravidade C_i :

$$C_1 = -(m_1 g U_{11}^{-1} r_1 + m_2 g U_{21}^{-2} r_2) = \frac{1}{2} m_1 g l \cos \theta_1 + \frac{1}{2} m_2 g l \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_2 g l \cos \theta_1 \quad (53)$$

$$C_2 = -m_2 g U_{22}^{-2} r_2 = \frac{1}{2} m_2 g l \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (54)$$

Desenvolvendo a Equação 07 para um manipulador robótico com 2 gdl ($n = 2$), têm-se:

$$\tau_1 = D_{11} \ddot{\theta}_1 + D_{12} \ddot{\theta}_2 + H_{111} \dot{\theta}_1^2 + H_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + H_{121} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + H_{122} \dot{\theta}_2^2 + C_1 \quad (55)$$

$$\tau_2 = D_{21} \ddot{\theta}_1 + D_{22} \ddot{\theta}_2 + H_{211} \dot{\theta}_1^2 + H_{212} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + H_{221} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + H_{222} \dot{\theta}_2^2 + C_2 \quad (56)$$

Logo, a equação dinâmica de movimento do manipulador planar apresentado por FU *et al.* (1987) é descrita na forma matricial por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{3} m_1 l^2 + \frac{4}{3} m_2 l^2 + m_2 l^2 \cos \theta_2 & \frac{1}{3} m_2 l^2 + \frac{1}{2} m_2 l^2 \cos \theta_2 \\ \frac{1}{3} m_2 l^2 + \frac{1}{2} m_2 l^2 \cos \theta_2 & \frac{1}{3} m_2 l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} m_2 l^2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2^2 - m_2 l^2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \frac{1}{2} m_2 l^2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{2} m_1 g l \cos \theta_1 + \frac{1}{2} m_2 g l \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_2 g l \cos \theta_1 \\ \frac{1}{2} m_2 g l \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (57)$$

3.4 Modelo Dinâmico da Antena Receptora

Para se obter o modelo dinâmico da antena receptora foi considerada a modelagem cinemática realizada no capítulo 2, onde são apresentadas as matrizes DH do sistema através das Eq. (3), (4) e (6).

A matriz de momentos de inércia, J_i , e o vetor posição do centro de massa, ${}^i r_i$, para cada elo da antena receptora, foram calculados a partir dos parâmetros físicos contidos na Tabela 5 e são descrito por:

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0,945 & -6,872 & 0 & -0,145m_1 \\ -6,872 & 57,228 & 0 & -1,259m_1 \\ 0 & 0 & 1,149 & 0,074m_1 \\ -0,145m_1 & -1,259m_1 & 0,074m_1 & m_1 \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 58,420 & 0 & 0 & -0,757m_2 \\ 0 & 3,907 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,979 & 0 \\ -0,757m_2 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad (59)$$

$${}^1 r_1 = (-0,145, -1,259, 0,074, 1)^T \quad (60)$$

$${}^2 r_2 = (-0,757, 0, 0, 1)^T \quad (61)$$

De maneira análoga ao desenvolvimento matemático do manipulador 2R planar apresentado na seção anterior utilizou-se o modelador automático para obtenção das equações dinâmicas de movimento para a antena receptora.

A seguir serão apresentadas as equações para cada termo das matrizes e vetores que descrevem as equações dinâmicas de movimento da antena receptora. Os termos literais a_1, a_2, m_1 e m_2 , são respectivamente, parâmetro DH do elo 1, parâmetro DH do elo 2, massa do elo 1 e massa do elo 2. As variáveis das juntas são θ_1 e θ_2 (juntas rotativas).

Termos da Matriz de Inércia D_{ik} :

$$\begin{aligned}
 D_{11} = & 2a_1a_2m_2\cos(\theta_2) + a_1^2m_1 + a_1^2m_2 + \frac{1}{2}a_2^2m_2(1 + \cos(2\theta_2)) \\
 & - 0,29a_1m_1 - 1,514a_1m_2\cos(\theta_2) - 0,757a_2m_2(1 + \cos(2\theta_2)) \\
 & + 27,256\cos(2\theta_2) + 37,237
 \end{aligned} \tag{62}$$

$$D_{12} = 0 \tag{63}$$

$$D_{21} = 0 \tag{64}$$

$$D_{22} = a_2^2m_2 - 1,514a_2m_2 + 62,328 \tag{65}$$

Termos do vetor que representa o efeito de Coriolis e a força centrífuga, H_{ikm} :

$$H_{111} = 0 \quad (66)$$

$$H_{112} = -a_1 a_2 m_2 \text{sen}(\theta_2) - \frac{1}{2} a_2^2 m_2 \text{sen}(2\theta_2) + 0,757 m_2 (a_1 \text{sen}(\theta_2) + a_2 \text{sen}(2\theta_2) - 27,256 \text{sen}(2\theta_2)) \quad (67)$$

$$H_{121} = -a_1 a_2 m_2 \text{sen}(\theta_2) - \frac{1}{2} a_2^2 m_2 \text{sen}(2\theta_2) + 0,757 m_2 (a_1 \text{sen}(\theta_2) + a_2 \text{sen}(2\theta_2) - 27,256 \text{sen}(2\theta_2)) \quad (68)$$

$$H_{122} = 0 \quad (69)$$

$$H_{211} = a_1 a_2 m_2 \text{sen}(\theta_2) + \frac{1}{2} a_2^2 m_2 \text{sen}(2\theta_2) - 0,757 m_2 (a_1 \text{sen}(\theta_2) + a_2 \text{sen}(2\theta_2) + 27,256 \text{sen}(2\theta_2)) \quad (70)$$

$$H_{212} = 0 \quad (71)$$

$$H_{221} = 0 \quad (72)$$

$$H_{222} = 0 \quad (73)$$

Termos do vetor que representa os efeitos da aceleração da gravidade C_i :

$$C_1 = 0 \quad (74)$$

$$C_2 = \frac{1}{2}a_2m_2g(\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(\theta_1 - \theta_2)) - 0,378m_2g(\cos(\theta_1 + \theta_2) + \cos(\theta_1 - \theta_2)) \quad (75)$$

Portanto, com base na Eq. 7 o modelo dinâmico da antena receptora é dado pelas seguintes equações:

$$\tau_1 = D_{11}\ddot{\theta}_1 + 2H_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \quad (76)$$

$$\tau_2 = D_{22}\ddot{\theta}_2 + H_{211}\dot{\theta}_1^2 + C_2 \quad (77)$$

Na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2H_{112} & 0 \\ 0 & H_{211} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (78)$$

4 SISTEMA DE CONTROLE

Por definição, um sistema de controle é uma interconexão de componentes que formam uma nova configuração de sistema que irá comandar um conjunto de dispositivos a fim de realizarem alguma tarefa. Basicamente consiste em fornecer uma entrada a um processo (planta) para obter uma resposta desejada (BOLTON, 1995; DORF; BISHOP, 2004).

Um processo a ser controlado pode ser basicamente representado pela Figura 19.

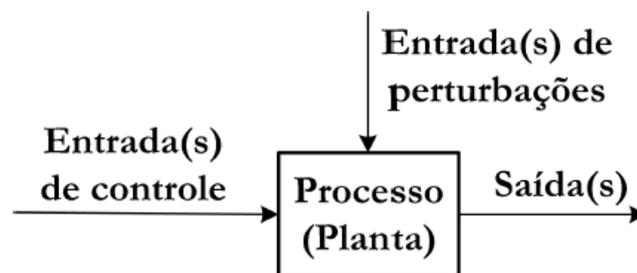


Figura 19 - Sistema de controle

Conforme Fernandes (2008) o sistema a ser controlado recebe o nome de processo ou planta. O sinal aplicado na(s) entrada(s) do processo é chamado *signal de controle* ou *variável manipulada*. O sinal de saída do processo é chamado de *variável do processo* ou *variável controlada* e corresponde à variável cujo comportamento se deseja controlar. Alguns sistemas de controle estão sujeitos a ação de sinais exógenos denominados de *perturbações* que correspondem a sinais de entrada que não podem ser manipulados.

Basicamente os sistemas de controle são classificados quanto a sua topologia em: *malha aberta* e *malha fechada* (NISE, 2009; DORF; BISHOP, 2004; OGATA, 2003; BOLTON, 1995; FERNANDES, 2008).

- *Sistemas de Controle em Malha Aberta* – São aqueles sistemas cuja saída não produz nenhum efeito sobre a ação de controle, em outras palavras a saída é medida e não é realimentada para comparação com a entrada. É aplicado um sinal pré-determinado na entrada com o intuito que se alcance a saída desejada

ao final de um determinado tempo. A Figura 20 apresenta um sistema de controle em malha aberta genérico.

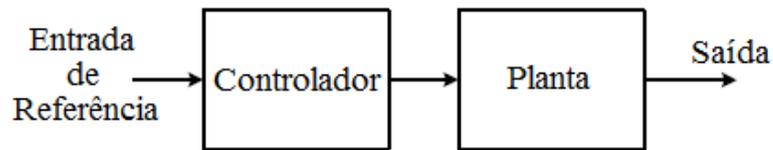


Figura 20 – Sistema de controle em malha aberta

- Sistema de Controle em Malha Fechada – Nesses sistemas o sinal de saída é monitorado através de um sensor e essa informação é realimentada ao processo de forma a influenciar a variável controlada. A diferença entre o sinal de entrada e o sinal realimentado é manipulada pelo controlador com a finalidade de reduzir o erro e levar a variável controlada a valores desejados. Esses sistemas são mais robustos à perturbações quando comparados com os sistemas em malha aberta e permitem um rastreamento mais satisfatório da trajetória tanto em regime permanente como no regime transitório. A Figura 21 apresenta um sistema de controle em malha fechada genérico.

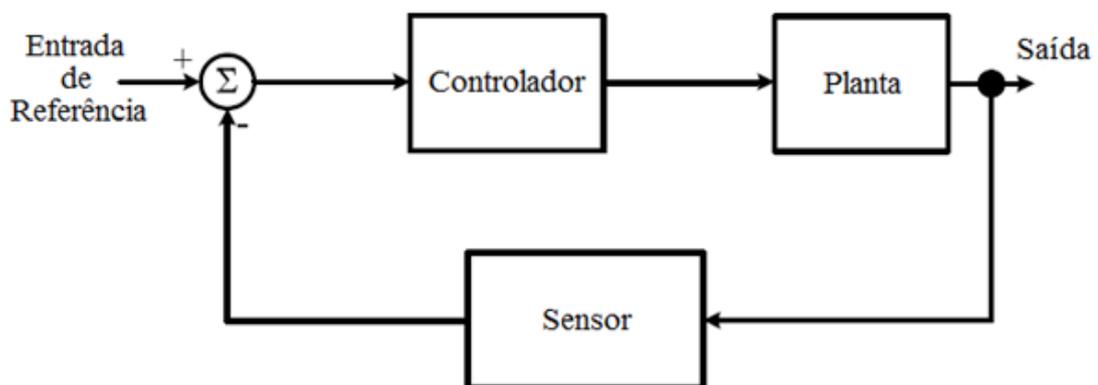


Figura 21 – Sistema de controle em malha fechada

Segundo Ogata (2003) os sistemas de controle em malha fechada são largamente empregados em processos industriais. Na grande maioria dessas aplicações os controladores utilizam técnicas de controle moderno, os quais se valem da combinação proporcional integral

e derivativa (PID), do posicionamento de pólos, de um compensador em atraso ou em avanço e da realimentação de estados.

Esses controladores são ajustados para um determinado ponto ou região de operação de um processo e, caso seja necessário, não modificam automaticamente essa sintonia, o que torna modelagem dinâmica do processo um fator determinante no desempenho satisfatório do sistema (FERNANDES, 2008).

Desta forma as técnicas de controle moderno não são eficientes para os casos em que ocorram variações consideráveis no comportamento do sistema ou elevadas perturbações, podendo fazer com que o sistema se torne instável (VANDOREN, 2002). Portanto, para esses casos se faz necessário a utilização de um sistema de controle capaz de se ajustar à medida que essas variações ocorram. Esse tipo de controle recebe o nome de *Controle Adaptativo* (ASTROM; WITTENMARK, 1995).

4.1 Controle Adaptativo

O principal objetivo de um sistema de controle em malha fechada é manter um nível de desempenho satisfatório mesmo quando submetido a perturbações e variações nas características do sistema de controle. Os controles clássicos e robustos estão baseados nesse conceito e apresentam um padrão de estabilidade relativo ao sistema de controle (DIAS, 2010).

No entanto, algumas plantas apresentam variações tão amplas e com efeitos significativos sobre o comportamento dinâmico que controladores clássicos com ganho de realimentação linear e coeficientes constantes são incapazes de fornecer a flexibilidade necessária ao sistema (TAMBARA *et al.*, 2010).

Controle Adaptativo é o nome dado a ação de controle de sistemas capazes de alterar seus próprios parâmetros em resposta a alterações em algum módulo que esteja sendo monitorado (SASTRY; BODSON, 1989). Em outras palavras o controle adaptativo consiste em um desdobramento do sistema de controle retroalimentado que aplica alguma técnica de

estimação para obter os parâmetros do modelo do processo e de seu meio a partir das medições dos sinais de entrada e saída (FERNANDES, 2008).

Intuitivamente um controlador adaptativo é aquele que se “adapta” e modifica seu comportamento frente às mudanças dinâmicas do processo e às perturbações. Segundo Astrom e Wittenmark (1995), um controlador adaptativo é um controlador com parâmetros ajustáveis e apresenta um mecanismo para ajuste dos parâmetros.

De maneira geral um sistema de controle adaptativo é composto por uma malha de realimentação, um estimador de parâmetros (ajustador) e um controlador variável, como representado na Figura 22.

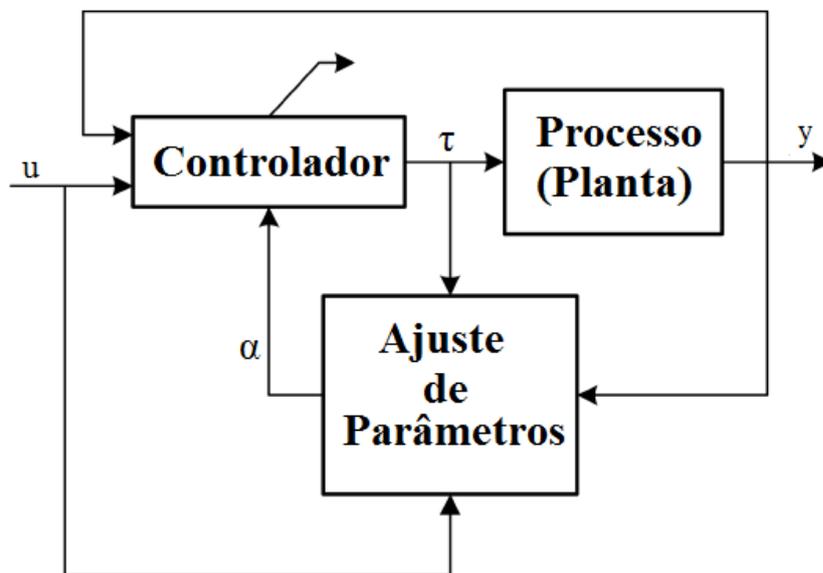


Figura 22 – Estrutura de um controlador adaptativo

Fonte: Fernandes (2008)

Segundo Slotine e Li (1991) a idéia básica de funcionamento do controle adaptativo é calcular o sinal de controle utilizando estimativas dos parâmetros incertos da planta ou, diretamente, dos parâmetros do controlador obtidos em tempo real através de informações provenientes dos sinais mensuráveis do sistema.

Conforme Santos, Ricardo (2009), os controles adaptativos são divididos em dois grupos quanto ao seu esquema construtivo: *Controle Adaptativo Baseado em Identificador* e *Controle Adaptativo Não Baseado em Identificador*.

- *Controle Adaptativo Baseado em Identificador* – Correspondem àqueles esquemas onde se encontra na sua estrutura um bloco com a função de estimar

em tempo real os parâmetros da planta desconhecidos, na etapa de definição dos parâmetros para ajuste do controlador.

Para as estruturas em que o estimador de parâmetros fornece diretamente os parâmetros ao controlador, para a lei de controle, sem que haja cálculos intermediários, dá-se o nome de *Controle Adaptativo Direto*. A Figura 23 apresenta a estrutura de um sistema de controle adaptativo direto.

Para as estruturas em que o estimador fornece parâmetros intermediários, que necessitam de uma etapa de cálculo para serem convertidos nas variáveis requeridas pelo controlador, dá-se o nome de *Controle Adaptativo Indireto*. A Figura 24 apresenta a estrutura de um sistema de controle adaptativo indireto (IOANNOU; SUN, 1995; ASTROM; WITTENMARK, 1995; NARENDRA; ANNASWAMY, 1989).

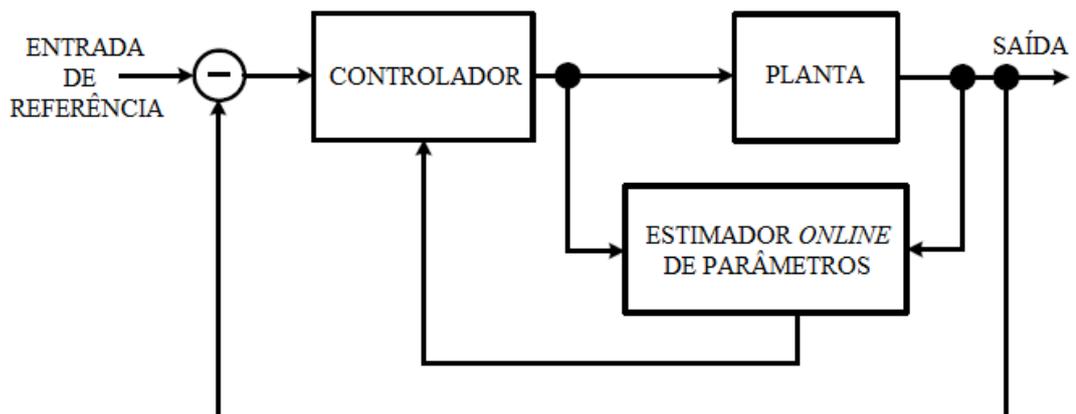


Figura 23 - Controle adaptativo direto

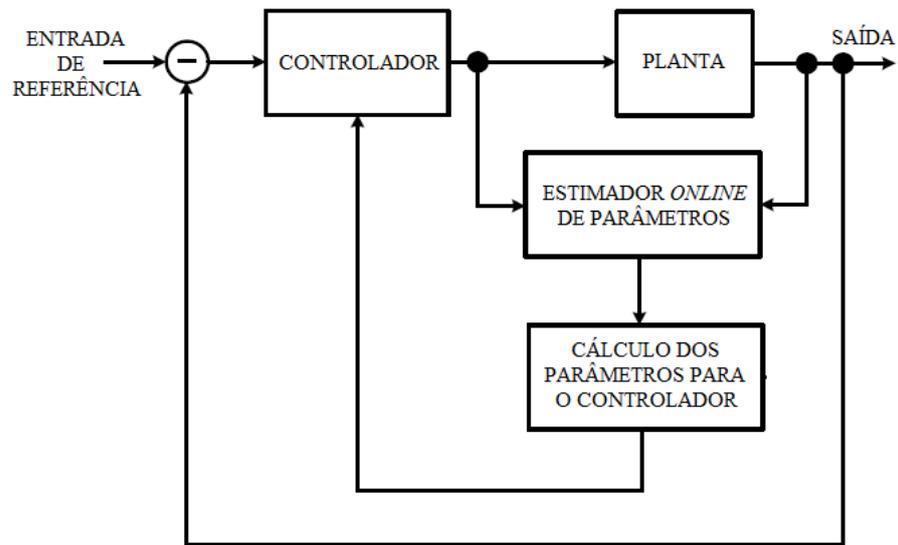


Figura 24 – Controle adaptativo indireto

- Controle Adaptativo Não Baseado em Identificador – São aqueles que no lugar de um estimador *on-line*, apresentam uma tabela de parâmetros ou controladores pré-ajustados para cada faixa de operação da planta e uma lógica para seleção dos parâmetros da tabela. É uma estratégia muito utilizada em controladores de voo (IOANNOU; FIDAN, 2006). De forma geral é indicado para sistemas com variações previsíveis em sua dinâmica (ASTROM; WITTENMARK, 1995). Seu esquema é mostrado na Figura 25.

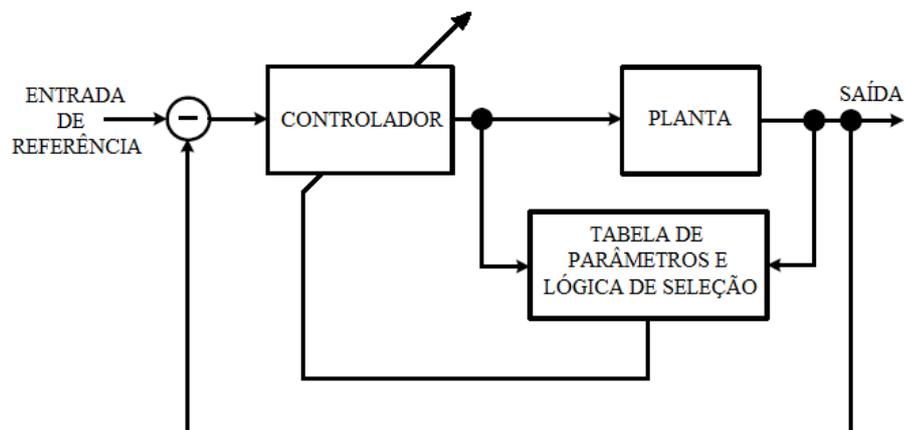


Figura 25 - Controle adaptativo não baseado em identificador

Atualmente, muitas técnicas estão presentes na literatura sobre controle adaptativo. As principais técnicas são: PID adaptativo, Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC – *Model Reference Adaptive Control*), Controlador Adaptativo por Posicionamento de Pólos (APPC – *Adaptive Pole Position Controller*), Controlador Adaptativo Auto Oscilatório e Controlador com Ganho Ajustável (*Gain Scheduling*) (NARENDRA; ANNASWAMY, 1989; IOANNOU; SUN, 1995; ASTROM; WITTENMARK, 1995; CALLAI *et al.*, 2007; FERNANDES, 2008).

4.1.1 Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC)

A estratégia denominada *Controle Adaptativo por Modelo de Referência* (MRAC) é considerada uma das principais abordagens na literatura referente a controle adaptativo (MAREELS; POLDERMAN, 1996). Consiste, no entanto, em um desdobramento de outra técnica bastante utilizada em controle de aeronaves denominada *Controle por Modelo de Referência* (MRC).

No MRC um bom conhecimento da planta e do desempenho esperado para o sistema permite que o projetista escolha um modelo de referência ideal para o sistema em malha fechada. O objetivo do MRC é obter uma lei de controle que mude a dinâmica da planta de forma que a entrada e saída da planta tenham as mesmas propriedades da entrada e saída do modelo de referência (RECH, 2001; FERNANDES, 2008).

No entanto, em algumas aplicações, os parâmetros da planta não são completamente conhecidos. Uma alternativa para solução de controle nesses casos é a utilização do MRAC, onde, além das características do MRC, insere no sistema um algoritmo de adaptação paramétrica o qual estima os parâmetros incertos do modelo (TAMBARA, 2010).

O MRAC é projetado para atender as especificações de desempenho definidas pelo modelo de referência. Usualmente, o MRAC vem sendo desenvolvido em uma abordagem direta, e este é constituído por uma estrutura de controle parametrizada com mecanismo de

adaptação *on-line* que utiliza somente as leituras da entrada e saída da planta. (IONNOU; SUN, 1995; NATAL, 2008).

Dessa forma, o erro entre a saída da planta e a saída do modelo de referência é utilizado pelo algoritmo de adaptação para ajustar os parâmetros do controlador, de tal forma que este erro tenda a zero, permitindo assim, o rastreamento assintótico do modelo (DIAS, 2010).

A Figura 26 apresenta o esquemático de um controlador MRAC direto generalizado.

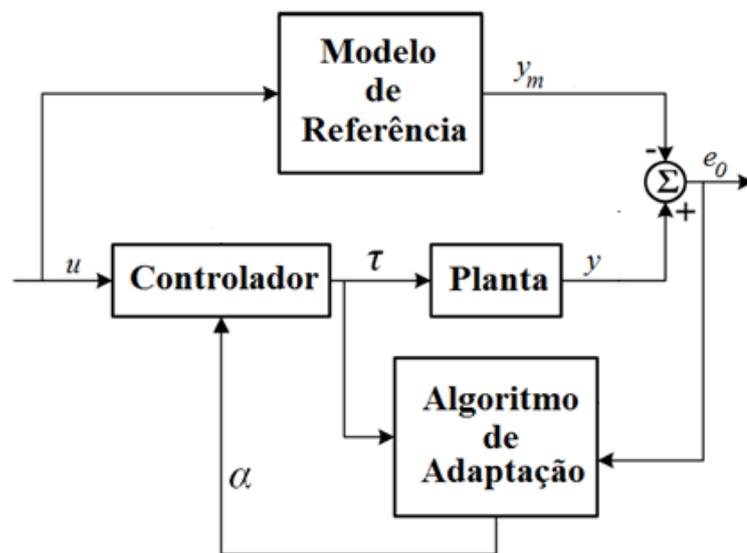


Figura 26 – Esquemático do controlador MRAC direto

Fonte: Fernandes (2008)

Segundo Rech (2001) e Teixeira (2008) o MRAC tem sido utilizado em grande escala nos processos industriais sobretudo naqueles em que existem grandes incertezas no modelo e perturbações significativas.

Vários métodos de estimação de parâmetros têm sido utilizados pelos algoritmos de adaptação do MRAC. Uma abordagem mais detalhada sobre esses métodos, bem como seus equacionamentos podem ser encontrados em Slotine e Li (1991), Ioannou e Sun (1995), Astrom e Wittenmark (1995) e Narendra e Annaswamy (1989). Nesse trabalho foi utilizado um método que avalia a sensibilidade derivativa do erro em relação ao parâmetro do controlador, denominada *Regra MIT* (GOMES *et al.*, 2006).

4.1.2 Regra MIT

O problema essencial do MRAC é determinar o mecanismo de ajuste de forma que se obtenha um sistema estável em que o sinal de erro entre a saída da planta e a saída do modelo de referência seja eliminado. O mecanismo de ajuste denominado *Regra MIT* é a abordagem original utilizada no MRAC (BUENO, 2006).

Esta regra define que para um dado sinal de erro e_0 , uma função custo $K(\alpha)$ é calculada, onde α é o parâmetro do controlador a ser ajustado. Segundo Guerra Vale (2008) e Gomes (2006), a função custo é definida por:

$$K(\alpha) = \frac{1}{2} e_0^2 \quad (79)$$

Com o objetivo de minimizar o custo relacionado ao erro, o parâmetro α pode ser mudado de acordo com o gradiente negativo de K , assim (GONÇALVES, 2008):

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\gamma \frac{\partial K}{\partial \alpha} = -\gamma e_0 \frac{\partial y}{\partial \alpha} \quad (80)$$

A Eq. (80) expressa a Regra MIT. A derivada parcial $\partial y / \partial \alpha$ é chamada de derivada de sensibilidade do sistema e revela o quanto a variável controlada (y) é influenciada pelo parâmetro ajustável (α). Já o parâmetro γ determina a taxa de adaptação (ganho adaptativo) do sistema.

O mecanismo de ajuste de parâmetros através da Regra MIT é não-linear devido a multiplicação do erro com a derivada parcial. A aplicação desse mecanismo pode resultar em sistemas instáveis, particularmente se o ganho adaptativo γ é alto (SASTRY; BODSON, 1989; RESENDE, 1995; ALMEIDA, 1993).

A Regra MIT tem sido largamente utilizada em controladores MRAC. Rehm e Schmidt (1995) apresentaram um controlador MRAC com ganhos *feedforward* e *feedback* em sistemas de controle de movimento em aplicações industriais e Mareels e Ydstie (1989) analisou a estabilidade da Regra MIT em sistemas lineares invariantes no tempo face à presença de dinâmicas não modeladas e às perturbações.

4.2 Projeto do Sistema de Controle da Antena Receptora

O projeto de um sistema de controle pretende desenvolver um controlador que atenda aos requisitos de desempenho exigidos pela planta. Se o modelo obtido para a planta for o mais fiel possível é de se esperar que o controlador desenvolvido sobre o modelo tenha o mesmo desempenho quando aplicado à planta (IOANNOU, 1995; NATAL, 2008).

Se a discrepância entre a planta e o modelo for acentuada o efeito do sistema de controle sobre a planta não será satisfatório. Isso pode ser observado pela presença de incertezas no modelo dinâmico que são oriundas do desconhecimento de partes do modelo. Segundo Slotine e Li (1991) as incertezas podem ser inseridas no modelo matemático e serem supridas por uma técnica de controle que estime os parâmetros incertos da planta ou, diretamente, os parâmetros do controlador em tempo real.

A técnica MRAC (*Model Reference Adaptive Control*) foi utilizada no projeto de controle da antena receptora. Essa estratégia baseia-se na abordagem de controle adaptativo direto onde os parâmetros desconhecidos da planta são identificados de forma *on-line*. A Figura 27 apresenta o diagrama de blocos da técnica de controle empregado no apontamento automático da antena receptora.

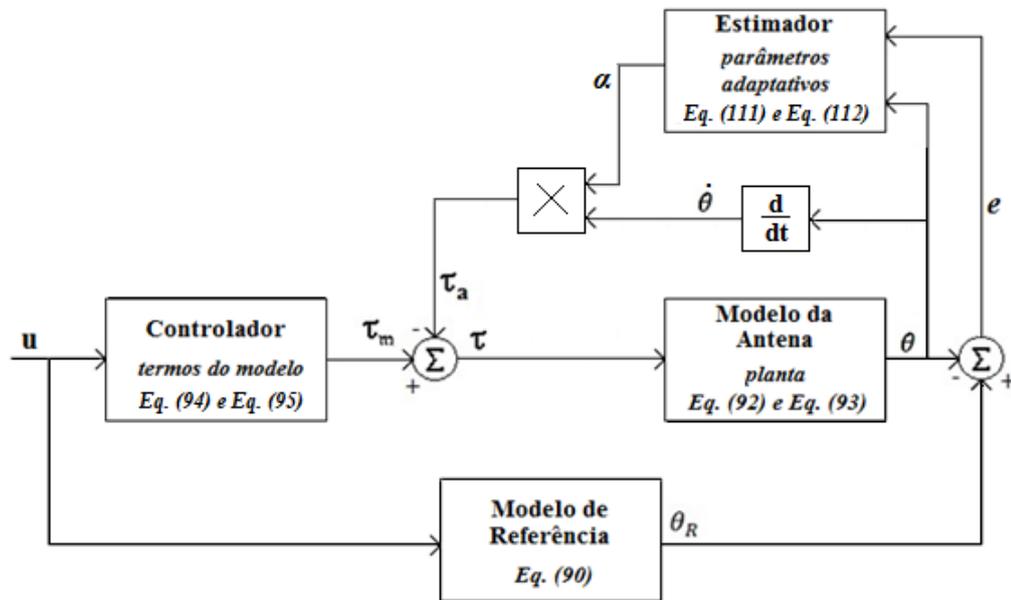


Figura 27 – Controle adaptativo da antena receptora

4.2.1 Incertezas do Modelo

As incertezas de um modelo dinâmico, em sua grande maioria, são decorrência do desconhecimento de partes do sistema físico, da impossibilidade da escolha antecipada do material a ser utilizado em alguns componentes do sistema e, até mesmo, da influência de condições severas do ambiente em que se encontra o sistema.

Para que o projeto do sistema de controle da antena receptora seja eficiente é preciso que o modelo dinâmico seja o mais próximo possível do sistema físico real. O modelo dinâmico obtido no capítulo 3 e descrito na Eq. 78, não fornece as características de dissipação de energia.

Dessa forma o termo referente a dissipação de energia não é contemplado nas Eq. 76 e 77 que definem o modelo dinâmico da antena receptora. A técnica de controle MRAC permite a obtenção desse parâmetro desconhecido da planta uma vez que insere na malha de controle um ajuste adaptativo (ASTROM; WITTENMARK, 1995).

Portanto o modelo dinâmico da antena receptora deve ser reescrito com a inserção do termo desconhecido da energia dissipativa.

Seja \hat{B} o vetor que representa as forças dissipativas desconhecidas do modelo, admitindo-se amortecimento viscoso, dado por:

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \end{bmatrix} \quad (81)$$

As Eq. (76) e (77) podem ser reescritas como:

$$\tau_1 = D_{11}\ddot{\theta}_1 + 2H_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \hat{b}_1\dot{\theta}_1 \quad (82)$$

$$\tau_2 = D_{22}\ddot{\theta}_2 + H_{211}\dot{\theta}_1^2 + C_2 + \hat{b}_2\dot{\theta}_2 \quad (83)$$

Na forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2H_{112} & 0 \\ 0 & H_{211} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{b}_1 & 0 \\ 0 & \hat{b}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (84)$$

4.2.2 Modelo de Referência

O objetivo do MRAC é fazer com que o modelo da planta e o sistema de controle consigam rastrear um modelo de referência previamente selecionado. Os índices de desempenho desse modelo de referência determinam, portanto, os índices de desempenho do mecanismo (NATAL, 2008; SANTOS, Ricardo, 2009).

Para o projeto do sistema de controle da antena receptora foi adotado um modelo de referência conforme um sistema de 2ª ordem amplamente discutido em Nise (2009), Ogata (2003) e Woods e Kent (1997). Tais sistemas apresentam os índices de desempenho bem definidos o que permite com facilidade estabelecer condições desejáveis para a saída da planta, seja no transitório quanto no regime permanente.

A Eq. (85) apresenta um sistema de segunda ordem padrão expresso no domínio do tempo em função da *freqüência natural* ω_n , e a *razão de amortecimento* ζ (NISE, 2009).

$$\ddot{\theta}_{Ri} = \omega_{ni}^2 u_i - 2\zeta\omega_{ni}\dot{\theta}_{Ri} - \omega_{ni}^2 \theta_{Ri} \quad (85)$$

Na forma matricial para dois graus de liberdade,

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{R1} \\ \ddot{\theta}_{R2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{n1}^2 & 0 \\ 0 & \omega_{n2}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2\zeta_1\omega_{n1} & 0 \\ 0 & 2\zeta_2\omega_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{R1} \\ \dot{\theta}_{R2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \omega_{n1}^2 & 0 \\ 0 & \omega_{n2}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{R1} \\ \theta_{R2} \end{bmatrix} \quad (86)$$

De forma compacta,

$$\ddot{\theta}_R = \Omega u - Z\dot{\theta}_R - \Omega\theta_R \quad (87)$$

Tomando como base as características de velocidade requeridas no apontamento de uma antena parabólica receptora, considera-se, para um apontamento automático satisfatório, uma ultrapassagem percentual $\%UP = 15\%$, e um tempo de pico do transitório $T_p = 1,8$ s.

Segundo Nise (2009) a relação entre a ultrapassagem percentual $\%UP$ e o tempo de pico do transitório T_p , com a frequência natural ω_n , e a razão de amortecimento ζ são dados por:

$$\%UP = e^{-(\zeta\pi / \sqrt{1-\zeta^2})} \quad (88)$$

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (89)$$

Utilizando os requisitos de desempenho impostos e as Eqs.(88) e (89), pode-se determinar: $\omega_n = 2$ rad/s e $\zeta = 0,5$. A função de transferência, portanto, para o modelo de referência a ser utilizado no controlador adaptativo da antena receptora é expresso por:

$$MR(s) = \frac{4}{s^2 + 2s + 4} \quad (90)$$

Admite-se os mesmos índices de desempenho para os 2 gdl.

4.2.3 Lei de Controle Adaptativa

Por definição uma lei de controle é um conjunto de regras que são utilizadas para determinar os comandos a serem enviados a um sistema baseado no estado desejado deste sistema. Leis de Controle são utilizadas para ditar como um manipulador robótico se move dentro de seu ambiente, enviando comandos para um atuador. O objetivo geralmente é seguir um percurso pré-definido, como a posição do manipulador ou perfil de velocidade como uma função do tempo (FRANKILN *et al.*, 2006; SIEGWART *et al.*, 2004).

Analisando o esquema de controle apresentado na Figura 22, a lei de controle adaptativa utilizada no apontamento da antena receptora é dada por:

$$\tau_i = \tau_{m_i} + \tau_{a_i} \quad (91)$$

De forma que τ_{m_i} é composto por termos do modelo e expresso em função dos valores nominais obtidos no modelo dinâmico. Já τ_{a_i} é o termo adaptativo e é expresso em função do parâmetro adaptativo a ser estimado.

Isolando os termos de aceleração das Eq. (82) e (83), têm-se:

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\tau_1 - 2H_{112} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - \hat{b}_1 \dot{\theta}_1}{D_{11}} \quad (92)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{\tau_2 - H_{211}\dot{\theta}_1^2 - C_2 - \hat{b}_2\dot{\theta}_2}{D_{22}} \quad (93)$$

Com base nas Eq. (92) e (93) e com o objetivo de eliminar a não-linearidade da planta e, considerando os termos incertos do modelo $\hat{b}_1\dot{\theta}_1$ e $\hat{b}_2\dot{\theta}_2$, τ_{m_1} e τ_{m_2} podem ser escritos como:

$$\tau_{m_1} = D_{11}(\Omega u_1 - Z\dot{\theta}_1 - \Omega\theta_1) + 2H_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \quad (94)$$

$$\tau_{m_2} = D_{22}(\Omega u_2 - Z\dot{\theta}_2 - \Omega\theta_2) + H_{211}\dot{\theta}_1^2 + C_2 \quad (95)$$

Os termos adaptativos da lei de controle são:

$$\tau_{a_1} = \alpha_1\dot{\theta}_1 \quad (96)$$

$$\tau_{a_2} = \alpha_2\dot{\theta}_2 \quad (97)$$

Onde, α_1 e α_2 são os parâmetros do controle adaptativo a serem ajustados pelo estimador.

Assim, a lei de controle adaptativa, Eq. (91), para cada grau de liberdade pode ser reescrita como:

$$\tau_1 = D_{11}(\Omega u_1 - Z\dot{\theta}_1 - \Omega\theta_1) + 2H_{112}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + \alpha_1\dot{\theta}_1 \quad (98)$$

$$\tau_2 = D_{22}(\Omega u_2 - Z\dot{\theta}_2 - \Omega\theta_2) + H_{211}\dot{\theta}_1^2 + C_2 + \alpha_2\dot{\theta}_2 \quad (99)$$

Substituindo a Eq. (98) na Eq. (92), têm-se:

$$\ddot{\theta}_1 = \Omega u_1 - Z\dot{\theta}_1 - \Omega\theta_1 + \left(\alpha_1 - \frac{\hat{b}_1}{D_{11}}\right)\dot{\theta}_1 \quad (100)$$

Para estimar os parâmetros do controlador adaptativo foi utilizada a Regra MIT. Nesta regra deseja-se que o parâmetro estimado α convirja para seu α^* (valor ótimo), isto implica que $\lim_{t \rightarrow \infty} e_0(t) = 0$, onde e_0 é o sinal de erro (GUERRA VALE *et al.*, 2008; IOANNOU; SUN, 1995).

Pela Eq. (80) o parâmetro adaptativo do controlador é função da derivada parcial da saída da planta θ_i em relação ao próprio parâmetro α_i multiplicado pelo sinal de erro.

Derivando a Eq. (100) em relação ao parâmetro α ,

$$\frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} = \Omega \frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} - Z \frac{d}{dt} \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} - \Omega \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} - \frac{\hat{b}_1}{D_{11}} \frac{d}{dt} \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \alpha_1} \frac{d \theta_1}{dt} + \alpha_1 \frac{d}{dt} \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} \quad (101)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} = -Z \frac{d}{dt} \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} - \Omega \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} - \frac{\hat{b}_1}{D_{11}} \frac{d}{dt} \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \alpha_1} \frac{d}{dt} \theta_1 + \alpha_1 \frac{d}{dt} \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} \quad (102)$$

Aplicando o operador derivativo s , têm-se:

$$s^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} = -Zs \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} - \Omega \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} - \frac{\hat{b}_1}{D_{11}} s \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} + \alpha_1 s \frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} + s \theta_1 \quad (103)$$

Agrupando os termos,

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} = \frac{s}{s^2 + (Z + \frac{\hat{b}_1}{D_{11}} - \alpha_1)s + \Omega} \theta_1 \quad (104)$$

Porém $\frac{\hat{b}_1}{D_{11}}$ é desconhecido, admitindo-se conhecer seu valor nominal $\frac{\bar{b}_1}{D_{11}}$, pode-se escrever:

$$\frac{\hat{b}_1}{D_{11}} = \alpha_1 + \frac{\bar{b}_1}{D_{11}} \quad (105)$$

Onde $\frac{\bar{b}_1}{D_{11}}$ é o valor nominal assumido na planta e α_1 é a parcela desconhecida.

Substituindo a Eq. (105) na Eq. (104) têm-se:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} = \frac{s}{s^2 + (Z + \frac{\bar{b}_1}{D_{11}})s + \Omega} \theta_1 \quad (106)$$

Para que seja atribuída ao parâmetro do controlador adaptativo α_1 toda a responsabilidade de corrigir a incerteza do modelo considera-se:

$$\bar{b}_1 = 0 \quad (107)$$

Logo,

$$\frac{\bar{b}_1}{D_{11}} = 0 \quad (108)$$

O que implica em dizer que a dissipação de energia no sistema é completamente desconhecida. Dessa forma, substituindo a Eq. (108) na Eq. (106), o filtro de sensibilidade pode ser escrito como:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \alpha_1} = \frac{s}{s^2 + Zs + \Omega} \theta_1 \quad (109)$$

Substituindo a Eq. (109) na Eq. (80), têm-se:

$$\dot{\alpha}_1 = -\gamma \left(\frac{s}{s^2 + Zs + \Omega} \theta_1 \right) e_1 \quad (110)$$

Assim, o parâmetro do controlador adaptativo α_1 pode ser determinado integrando os dois lados da Eq. (110):

$$\alpha_1 = -\gamma \left(\frac{1}{s^2 + Zs + \Omega} \theta_1 \right) e_1 \quad (111)$$

De maneira análoga para $i = 2$, o parâmetro do controlador adaptativo α_2 é dado por:

$$\alpha_2 = -\gamma \left(\frac{1}{s^2 + Zs + \Omega} \theta_2 \right) e_2 \quad (112)$$

A partir da Eq. (105), considerando que o valor nominal do termo da matriz de inércia D_{11} está inserido no parâmetro do controlador adaptativo α_1 , determina-se que:

$$\alpha_1 = \frac{b_{a_1}}{D_{11}} \quad (113)$$

Onde b_{a_1} corresponde ao coeficiente de amortecimento viscoso a ser estimado pelo controlador adaptativo.

Substituindo a Eq. (113) na Eq. (105), o coeficiente de amortecimento viscoso do termo desconhecido da energia dissipativa (\hat{b}_1) é dado por:

$$\hat{b}_1 = b_{a_1} + \bar{b}_1 \quad (114)$$

De maneira análoga para $i = 2$:

$$\hat{b}_2 = b_{a_2} + \bar{b}_2 \quad (115)$$

5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

O objetivo deste capítulo é implementar e avaliar o sistema de controle da antena receptora discutido no capítulo anterior. A implementação foi realizada no *software* MATLAB[®], através do *toolbox* SIMULINK[®], que apresenta uma linguagem gráfica e intuitiva de programação oferecendo assim uma alternativa à simulação numérica clássica na abordagem de problemas de engenharia (MATSUMOTO, 2004).

Salviano Filho (2009) afirma que o SIMULINK[®] permite facilmente a modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos (mecânicos, elétricos, etc.), contínuos e/ou discretos no tempo. A principal vantagem desse *toolbox* está na forma em que se programam os modelos matemáticos, pois o SIMULINK[®] lança mão de diagramas muito parecidos com os utilizados para as estruturas dos algoritmos de programação.

Assim, tomando como base o diagrama de blocos da Figura 27, e utilizando-se as Eqs. (90), (92), (93), (94), (95), (111) e (112), a implementação do sistema de controle da antena receptora no SIMULINK[®] assume a seguinte forma:

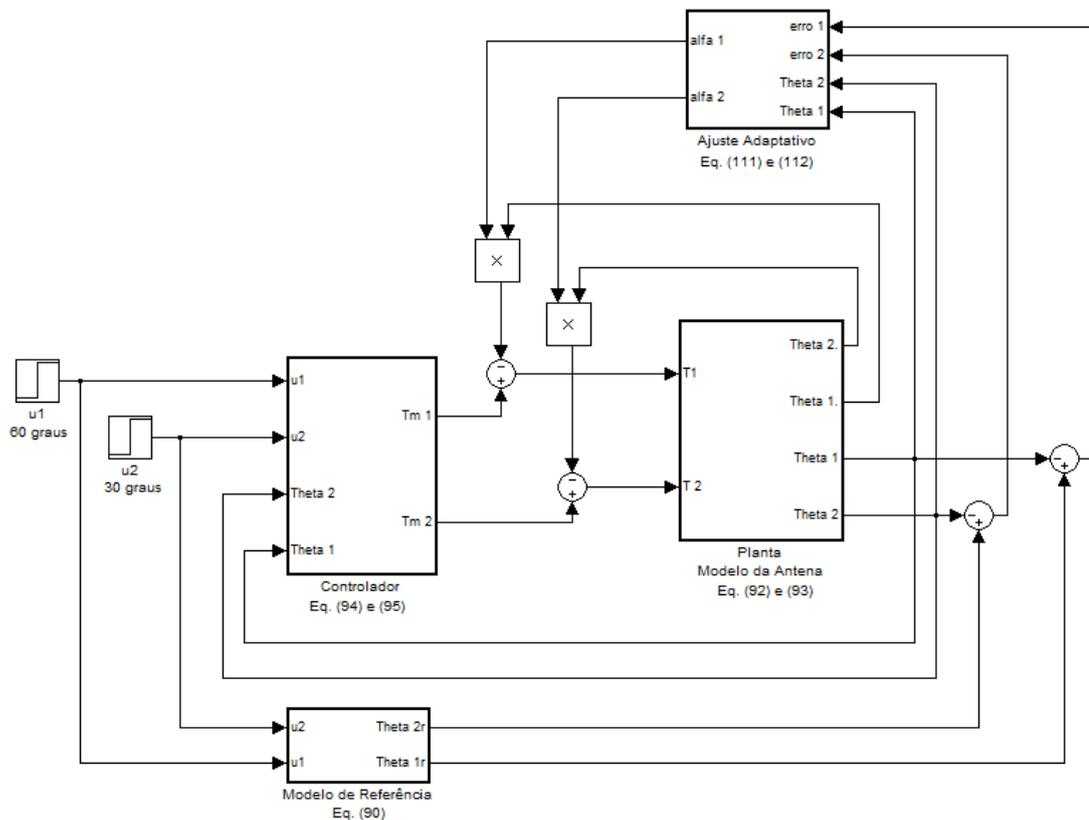


Figura 28 - Implementação do sistema de controle da antena receptora no simulink

Para as simulações do sistema de controle da antena receptora foram utilizadas funções degrau como entradas do sistema. Cada entrada representa o deslocamento angular desejado para cada junta do sistema, tal que: $u_1 = 60^\circ$, $u_2 = 30^\circ$.

A Figura 29 e a Figura 30 mostram as saídas do sistema para a junta 1 e junta 2, respectivamente, para um ganho adaptativo (γ_i) dado por: $\gamma_1 = 1850$, $\gamma_2 = 3550$.

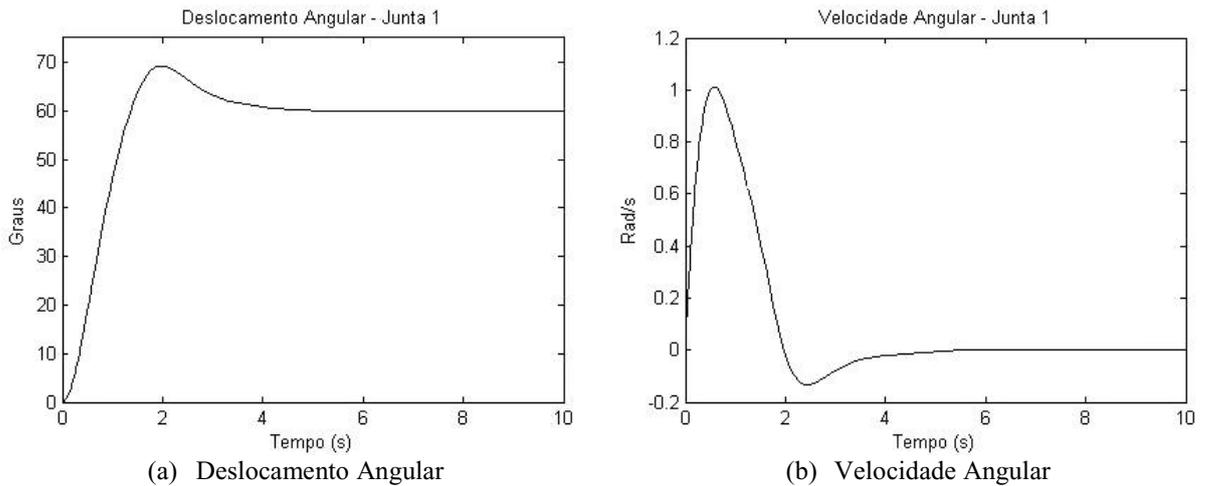


Figura 29 – Ação de controle – junta 1

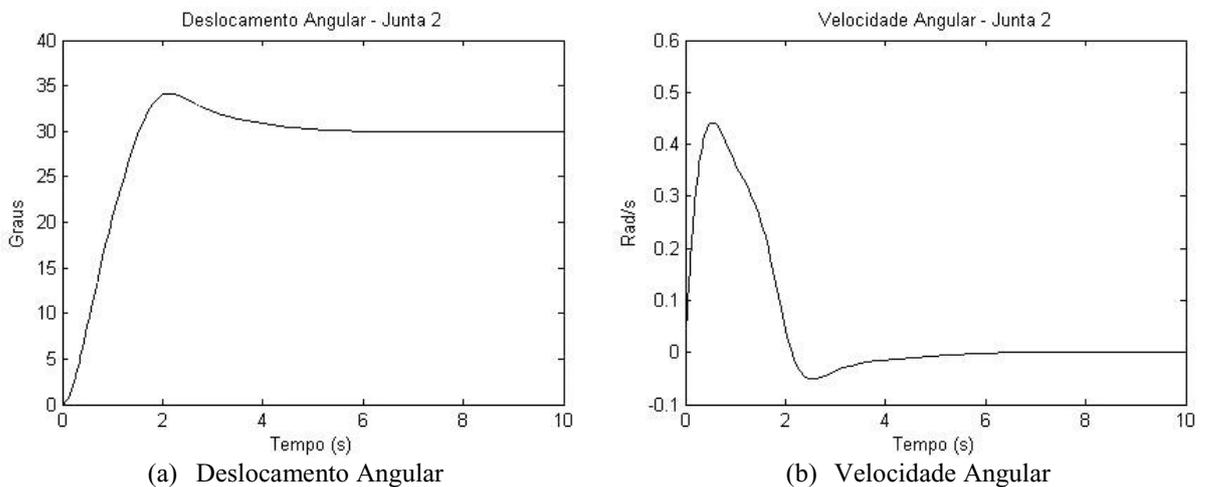


Figura 30 – Ação de controle – junta 2

A principal característica a ser observada em um MRAC é o comportamento da variável controlada em relação ao modelo de referência. Esse último é escolhido de forma a impor ao sistema os índices de desempenho desejados. A Figura 31 e a Figura 32 apresenta o sinal de saída (variável controlada) frente ao modelo de referência adotado ainda para $u_1 = 60^\circ$, $u_2 = 30^\circ$, para a junta 1 e a junta 2 respectivamente.

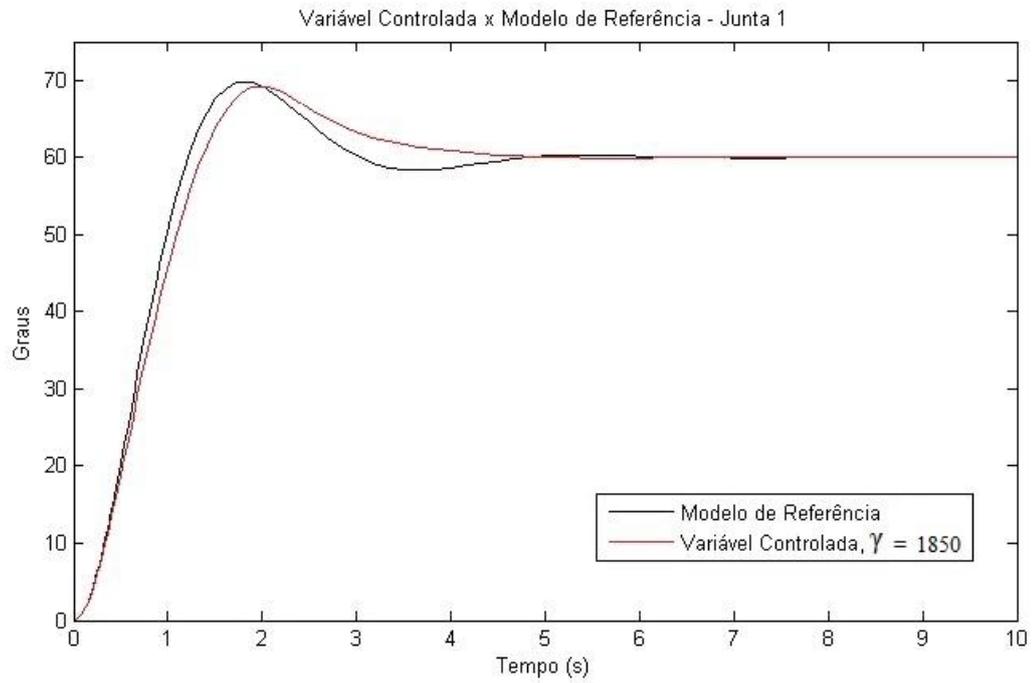


Figura 31 – Análise do sinal de saída (variável controlada) – junta 1

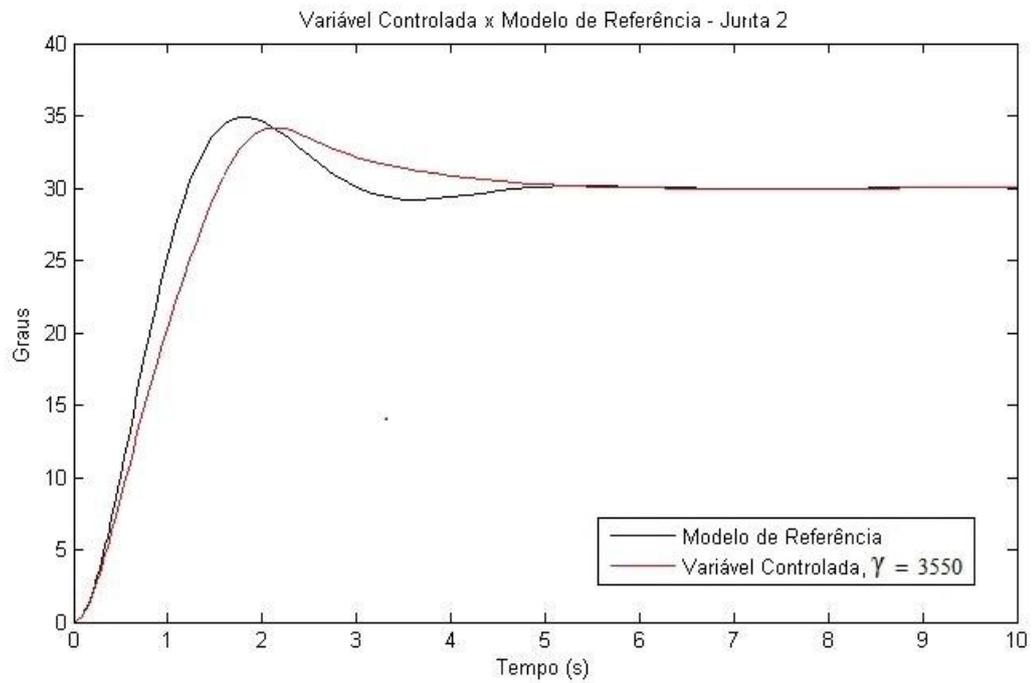


Figura 32 - Análise do sinal de saída (variável controlada) – junta 2

O sinal de erro é obtido através da diferença entre o modelo de referência e o sinal de saída do sistema. A Figura 33 apresenta o sinal de erro para as juntas 1 e 2 da antena receptora.

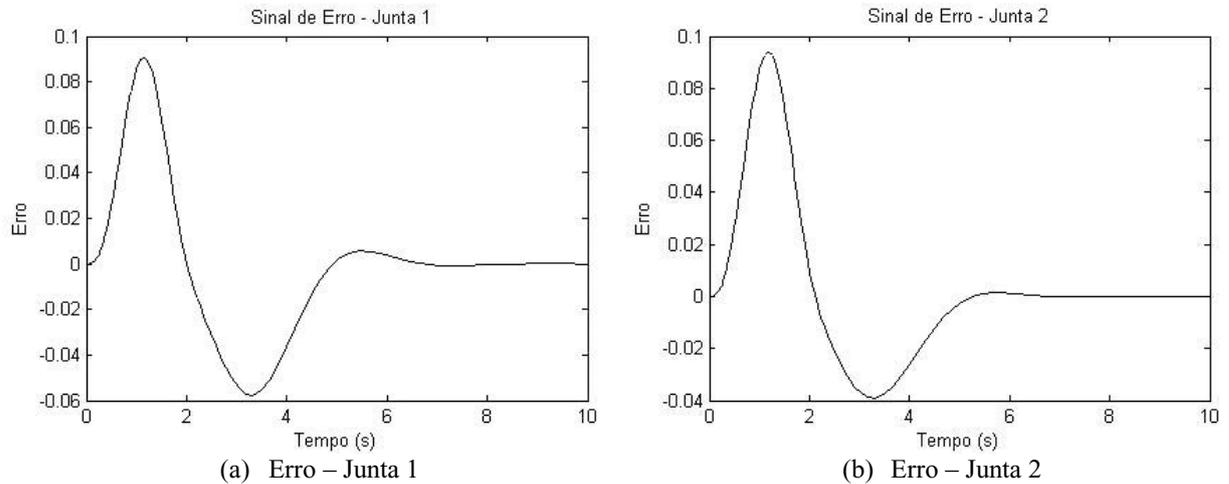


Figura 33 – Erro das juntas 1 e 2

Observa-se que os sinais de erro da Figura 33 apresentam valores pequenos o que demonstra a efetiva ação de controle para ambas juntas do sistema da antena receptora.

O erro médio quadrático para a junta 1 (E_{MQ_1}) e para a junta 2 (E_{MQ_2}) é apresentado, respectivamente, na Eq. (116) e Eq. (117).

$$E_{MQ_1} = \sqrt{\frac{e_1^T e_1}{N-1}} = 0,0034 \quad (116)$$

$$E_{MQ_2} = \sqrt{\frac{e_2^T e_2}{N-1}} = 0,0031 \quad (117)$$

As incertezas do modelo são compensadas pelo parâmetro de controle adaptativo. Nesse trabalho a modelagem tridimensional realizada não contemplou as energias dissipativas no sistema. Para efeito de simulação foi inserido no modelo um termo dissipativo com o objetivo de avaliar o comportamento do parâmetro de controle adaptativo.

A Figura 34 apresenta, para a junta 1, o comportamento entre o termo dissipativo $\hat{b}_1 \dot{\theta}_1$, e o termo estimado $b_{a_1} \dot{\theta}_1$, a Figura 35 apresenta, para a junta 2, o comportamento entre o termo dissipativo $\hat{b}_2 \dot{\theta}_2$, e o termo estimado $b_{a_2} \dot{\theta}_2$. Os valores dos ganhos adaptativos utilizados foram: $\gamma_1 = 1850$, $\gamma_2 = 3550$.

Na simulação foram assumidos os seguintes valores:

$$b_1 = 12 \text{ [Ns/m]}$$

$$b_2 = 12 \text{ [Ns/m]}$$

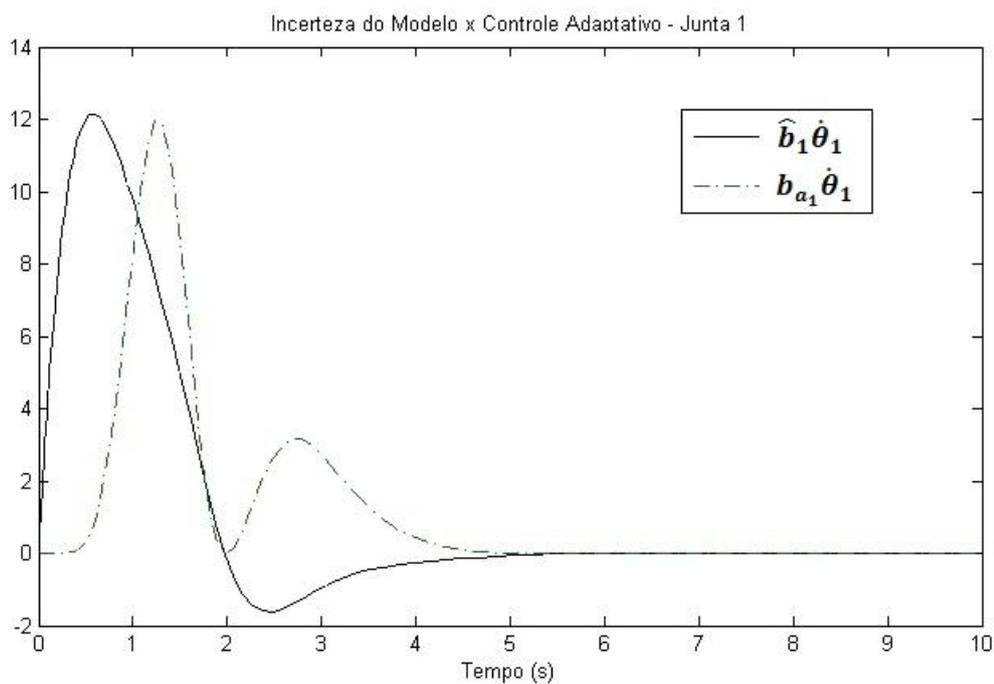


Figura 34 - Análise do parâmetro de controle adaptativo – junta 1

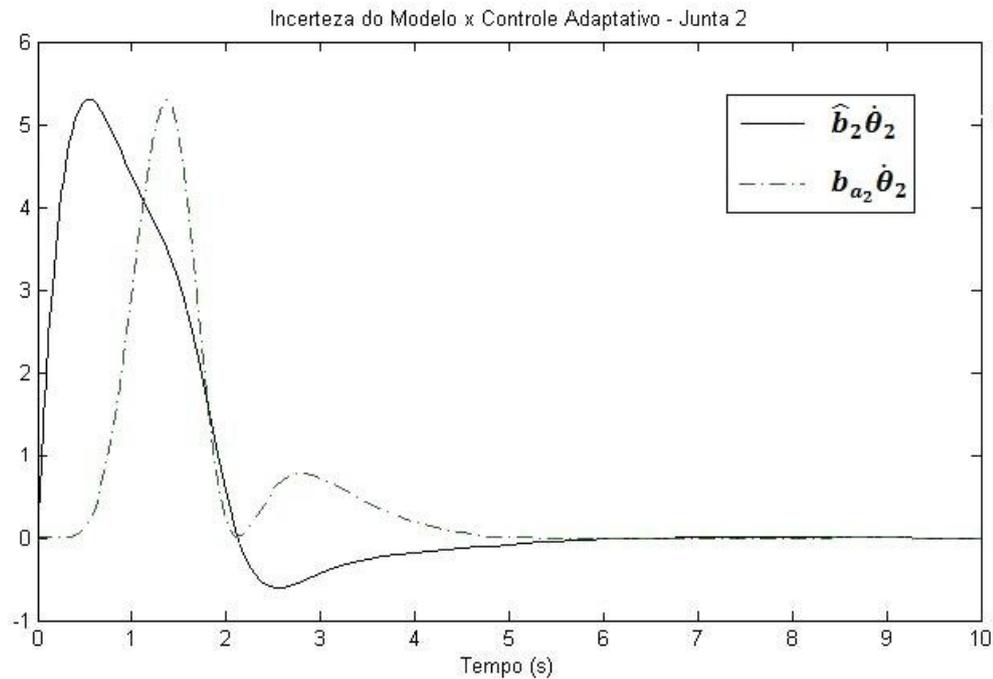
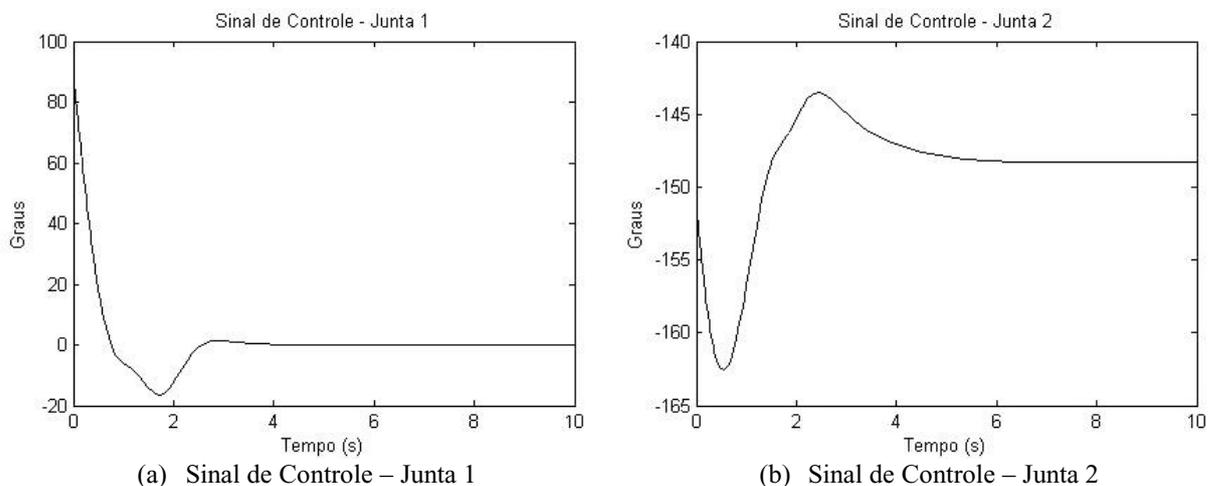


Figura 35 - Análise do parâmetro de controle adaptativo – junta 2

Analisando a Figura 34 e a Figura 35 observa-se que a contribuição do termo dissipativo inserido no modelo rapidamente tende a zero (por volta de 5s). Isso se deve ao fato que a velocidade também tende a zero nesse curto intervalo de tempo. De forma satisfatória a contribuição do parâmetro de controle adaptativo influencia a saída do sistema no mesmo intervalo de tempo e com a mesma intensidade que o termo dissipativo atua. Nota-se também que o parâmetro de controle adaptativo tende a zero no mesmo instante em que o termo dissipativo deixa de ser significativo no sistema.

A ação de controle é suave e bem comportada conforme ilustra a Figura 36.



(a) Sinal de Controle – Junta 1

(b) Sinal de Controle – Junta 2

Figura 36 - Ação de controle - juntas 1 e 2

A variação do ganho adaptativo γ tem influência direta no comportamento do MRAC. Como o sistema da antena receptora apresenta um ganho fixo em sua planta o ajuste de γ ocorreu de forma empírica, ou seja, a medida que se variava o γ analisava-se o comportamento da saída.

A Figura 37 e a Figura 38 ilustram a influência de γ na saída do sistema para junta 1 e junta 2 respectivamente.

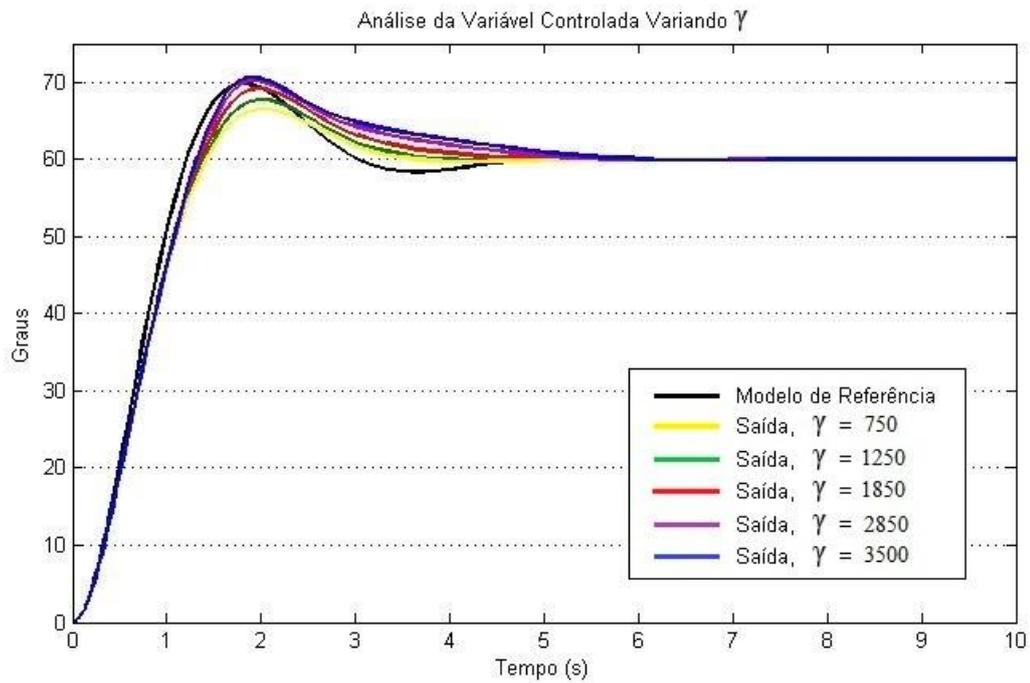


Figura 37 - Análise da influência de γ na saída - junta 1

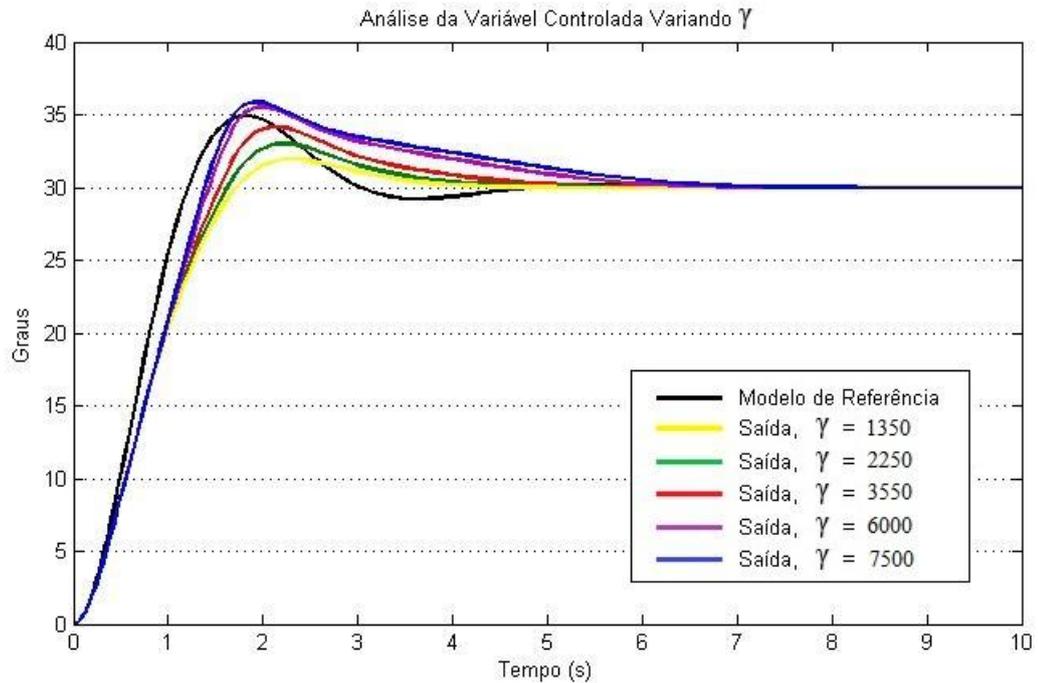


Figura 38 - Análise da influência de γ na saída - junta 2

Observa-se que a contribuição dos termos incertos ($\hat{b}_1\hat{\theta}_1$ e $\hat{b}_2\hat{\theta}_2$) inseridos no sistema ocorre de forma muito rápida. Isso se deve ao fato que a característica do amortecimento viscoso depende da velocidade ($\hat{\theta}_1$ e $\hat{\theta}_2$), logo sua atuação é pouco significativa pois tende a zero rapidamente. Com isso o erro (e_1 e e_2) assume valores muito pequenos como mostra a Figura 33. A partir das Eqs. (111) e (112) sabe-se que o parâmetro do controlador adaptativo (α) é diretamente proporcional ao erro.

Assim, para que a contribuição do controlador adaptativo seja eficiente nesse curto intervalo de tempo, o ganho adaptativo (γ) precisa assumir valores elevados.

A Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam, para a junta 1 e junta 2 respectivamente, a razão de amortecimento ζ e a frequência natural ω_n calculados para as saídas do sistema obtidas ao variar o ganho adaptativo (γ).

Tabela 9 – Índices de desempenho calculados para as saídas da junta 1

Ganho Adaptativo (γ)	Valores Medidos		Valores Calculados			
	%UP (%)	T_p (s)	ζ	Erro*	ω_n (rad/s)	Erro*
750	10,78	2,03	0,58	16,0%	1,92	4,0%
1250	12,92	1,99	0,55	10,0%	1,89	5,5%
1850	15,13	1,94	0,51	2,0%	1,88	6,0%
2850	17,43	1,92	0,48	4,0%	1,86	7,0%
3500	18,29	1,90	0,47	6,0%	1,87	6,5%

* Erro percentual calculado em relação ao modelo de referência ($\zeta = 0,5$ e $\omega_n = 2,0$ rad/s).

Tabela 10 - Índices de desempenho calculados para as saídas da junta 2

Ganho Adaptativo (γ)	Valores Medidos		Valores Calculados			
	%UP (%)	T_p (s)	ζ	Erro*	ω_n (rad/s)	Erro*
1350	6,47	2,30	0,65	30,0%	1,79	10,5%
2250	10,00	2,23	0,59	18,0%	1,74	13,0%
3550	14,50	2,02	0,52	4,0%	1,82	9,0%
6000	19,27	1,98	0,46	8,0%	1,78	11,0%
7500	19,90	1,95	0,45	10,0%	1,80	10,0%

* Erro percentual calculado em relação ao modelo de referência ($\zeta = 0,5$ e $\omega_n = 2,0$ rad/s).

Com base na Tabela 9 e na Tabela 10, para realizar o apontamento da antena receptora com índices de desempenho satisfatórios considera-se um ganho adaptativo para a junta 1 tal que: $\gamma_1 \in [1780, 1980]$ e para a junta 2: $\gamma_2 \in [3460, 3650]$.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um sistema de controle adaptativo para o apontamento automático de uma antena parabólica receptora. Para base de estudos foi adotada as características físicas e construtivas de uma antena parabólica amplamente utilizada em sistemas profissionais de comunicação via satélite.

A modelagem tridimensional do sistema físico constituído para a antena receptora possibilitou a obtenção dos parâmetros físicos do sistema (massa, volume, momentos de inércia, etc...). Tal modelagem foi realizada no CATIA[®] V5 R19, *software* de plataforma CAD que possui ferramentas eficazes na construção de sólidos e no aperfeiçoamento de projetos mecânicos. Os recursos oferecidos pelo CATIA[®] V5 R19 permitiram que o modelo físico obtido contemplasse todas as partes constituintes do esquemático construtivo elaborado para o mecanismo da antena receptora, tornando possível a identificação dos elos presentes no sistema.

Dessa forma o sistema físico da antena receptora foi modelado como um sistema de elos rígidos articulados através de juntas no espaço tridimensional. Tal similaridade com um modelo de um manipulador em cadeia aberta de dois graus de liberdade permitiu que os conceitos de modelagem cinemática e dinâmica de manipuladores robóticos fossem aplicados ao sistema físico em estudo.

Através dos cálculos matriciais envolvendo matrizes de transformação homogênea contidos na notação DH a cinemática direta para o mecanismo da antena receptora foi obtida com sucesso.

O formalismo de *Euler-Lagrange* foi utilizado na modelagem dinâmica da antena receptora. Para tanto foi desenvolvido um algoritmo que descreve os passos necessários para a obtenção das equações dinâmicas de movimento para um manipulador robótico em cadeia aberta. A implementação desse algoritmo foi feita no MAPLE[®] 13, *software* que realiza a manipulação simbólica de equações matemáticas. Como resultado dessa implementação foi desenvolvido um modelador automático capaz de obter as equações de movimento para esses manipuladores.

O uso de esforço computacional para a solução das operações matriciais contidos no procedimento de obtenção das equações dinâmicas de movimento é fundamental para que o resultado seja satisfatório.

A análise do comportamento dinâmico do modelo obtido, bem como o sistema de controle adotado para comandar os movimentos da antena receptora, se deu a partir de sua implementação no MATLAB[®] através do *toolbox* SIMULINK[®]. Esse *software* apresenta uma interface amigável com o usuário na qual se encontram blocos funcionais que representam os elementos constituintes dos sistemas dinâmicos. Dessa forma a implementação dos modelos matemáticos são simplificadas consideravelmente, permitindo que os diagramas resultantes se assemelhem em muito com as estruturas dos algoritmos desenvolvidos.

O sistema de controle foi projetado para reagir às incertezas do modelo, uma vez que na modelagem tridimensional não foram obtidas informações sobre partes da planta ou se admitiu que os parâmetros físicos fornecidos estivessem incertos. Para a solução desse problema foi projetado um sistema de controle adaptativo onde os parâmetros desconhecidos da planta pudessem ser estimados de forma *on-line*.

Uma vez que o modelo dinâmico obtido foi um modelo não-linear uma técnica de linearização por retroalimentação foi aplicada com o intuito de eliminar os termos não-lineares do modelo. A ação de controle adaptativa por modelo de referência foi adotada para comandar a planta. O modelo de referência escolhido foi um sistema padrão de 2^a ordem, o qual além da simplicidade na implementação permite que os índices de desempenho desejado para o sistema sejam facilmente estabelecidos.

Os parâmetros do controlador adaptativo foram estimados pela Regra MIT que avalia a sensibilidade derivativa do erro em relação ao parâmetro do controlador. O ganho adaptativo γ , que determina a taxa de adaptação do sistema, precisa ser ajustado de forma a garantir que o parâmetro do controlador estimado consiga corrigir o máximo possível as incertezas do modelo. Nesse estudo o ajuste do ganho adaptativo ocorreu de forma empírica, valendo-se da experiência do projetista.

As simulações do sistema de controle projetado foram satisfatórias e os índices de desempenho do sistema foram alcançados. Também foram realizadas simulações variando o ganho adaptativo.

6.1 Trabalhos Futuros

Acredita-se que este trabalho possa ser estendido quanto à análise do desempenho do sistema de controle adaptativo, em dois aspectos. Primeiramente deseja-se verificar o comportamento do parâmetro do controlador adaptativo quando inserido perturbações ao sistema, como por exemplo, a ação do vento contrário aos movimentos da antena. Num segundo momento se torna interessante desenvolver uma técnica para ajuste do ganho adaptativo de forma *on-line*. Uma boa solução seria a utilização de uma abordagem que envolva os conceitos de lógica Fuzzy ao sistema de controle.

O modelo tridimensional pode ser aperfeiçoado conforme as características dos motores elétricos adotados para comando do mecanismo. Também pode ser revisto devido às características de instalação da antena receptora.

Também se espera realizar a implementação física do sistema. Para tanto as características construtivas do mecanismo deverão ser revisadas. Inicialmente pretende-se conceber um protótipo em menor escala para análise de performance do sistema de controle adaptativo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADADE FILHO, Alberto, *Fundamentos de Robótica: Cinemática, Dinâmica e Controle de Manipuladores Robóticos*. Ed. CTA-ITA-IEMP, 353 p., São José dos Campos, Brasil, 1999.

ARMELLINI, Fabiano, **Controle Robusto da Antena de um Radar Meteorológico**. In: XVIII CBA – Congresso Brasileiro de Automática, 2220-2227 p., Bonito, Brasil, 2010.

ARMELLINI, Fabiano, *Projeto e Implementação do Controle de Posição de Uma Antena de Radar Meteorológico Através de Servomecanismos*. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo /USP, 123 p., São Paulo, Brasil, 2006.

ASTROM, Karl J.; WITTENMARK, Bjorn, *Adaptive Control*. Ed. Addison-Wesley Publishing Company, 2ª Edição, 574 p., Boston, Estados Unidos, 1995.

ALMEIDA, Fernando G., *Model Reference Adaptive Control of a Two Axes Hydraulic Manipulator*. Tese de Ph.D. – University of Bath, Bath, Reino Unido, 1993.

BARCELLOS NETO, João, *Mecânica Newtoniana, Lagrangiana & Hamiltoniana*. Ed. Livraria da Física, 432 p., São Paulo, Brasil, 2004.

BOLTON, W., *Engenharia de Controle*. Ed. Makron Books, 1ª Edição, 496 p., São Paulo, Brasil, 1995.

BUENO, Luciana P. P., *Dinâmicas Emergentes na Família de Memórias Associativas Bidirecionais Caóticas e sua Habilidade para Saltar Passos*. Tese de Doutorado – USP São Carlos / Universidade de São Paulo, 179 p., São Carlos, Brasil, 2006.

CALLAI, Tomas C.; COELHO, Leandro S.; COELHO, Antonio A. S., **Controle Nebuloso Adaptativo por Modelo de Referência: Projeto e Aplicações em Modelos Não-Lineares**. Revista Controle e Automação / SBA – Sociedade Brasileira de Automática, Vol. 18, n° 4, pp 479-489, Campinas, Brasil, 2007.

CAMPOS, Cássio F. S., *Dinâmica e Controle de Movimento de Corpo Rígido de um Manipulador Robótico Rígido Flexível*. Dissertação de Mestrado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / INPE, 107 p., São José dos Campos, Brasil, 2005.

CRAIG, John J., *Introduction to Robotics: Mechanical and Control*. Ed. Addison-Wesley Publishing Company, 3ª Edição, 408 p., Boston, Estados Unidos, 2004.

CÚNICO, Mauricio, *Posicionamento Automático de Antenas Parabólicas*. Monografia – UnicemP / Centro Universitário Positivo, 30 p., Curitiba, Brasil, 2006.

DIAS, Samaherni M., *Controle Adaptativo Robusto Para um Modelo Desacoplado de um Robô Móvel*. Tese de Doutorado – UFRN / Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 121 p., Natal, Brasil, 2010.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H., *Sistemas de Controle Modernos*. Ed. LTC, 11ª Edição, 748 p., São Paulo, Brasil, 2009.

ELBERT, Bruce R., *The Satellite Communication Applications Handbook*. Ed. Artech House, 2ª Edição, 552 p., Boston, Estados Unidos, 2004.

FERNANDES, Marcus V. A., *Controlador Adaptativo por Modelo de Referência e Estrutura Variável Aplicado ao Controle de Ângulo de Carga e Fluxo de Campo de um Gerador Síncrono*. Dissertação de Mestrado – UFRN / Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 94 p., Natal, Brasil, 2008.

FRANKLIN, Gene F.; POWEL, J. David; EMAMI-NAEINI, Abbas, *Feedback Control of Dynamics Systems*. Ed. Prentice Hall, 900 p., New Jersey, Estados Unidos, 2006.

FU, King-Sun.; GONZALEZ, Ralph C.; LEE C. S. G., *Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence*. Ed. McGraw-Hill Book Company, 580 p., New York, Estados Unidos, 1987.

GOMES, Yuri C.; ARAÚJO, Tomás V. G. P.; LIMA, Antônio M. N., **Abordagem Didática com Controle Adaptativo**. Anais do XXXIV COBENGE, pp 1864-1876, Passo Fundo, Brasil, 2006.

GONÇALVES, Rui M. F., *Self Tuning e Controlo de Máquinas RIM*. Dissertação de Mestrado – FEUP / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 137 p., Porto, Portugal, 2008.

GROOVER, Mikell P.; ODREY, Nicholas G.; WEISS, Mitchel; NAGEL, Roger N., *Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications*. Ed. McGraw-Hill Book Company, New York, Estados Unidos, 1986.

GUERRA VALE, Marcelo R. B.; FONSECA, Daniel G. V.; MAITELLI, André L.; ARAÚJO, Fábio M. U, **Controle Adaptativo por Modelo de Referência Aplicado em Uma Planta de Neutralização de PH**. INDUSCON – VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas, Brasil, 2008.

HA, Tri T., *Digital Satellite Communications*. Ed. Macmillan USA, 1ª Edição, 656 p., New York, Estados Unidos, 1986.

IOANNOU, Petros A.; SUN, Jing, *Robust Adaptive Control*. Ed. Prentice Hall, 821 p., New Jersey, Estados Unidos, 1995.

IOANNOU, Petros A.; FIDAN, Baris, *Adaptive Control Tutorial*. Ed. Society for Industrial & Mathematics, 389 p., Philadelphia, Estados Unidos, 2006.

JUNEK FILHO, Paulo C., *Otimização de Trajetórias de Robôs de Soldagem Aplicados a Células de Manufatura*. Dissertação de Mestrado – UTPR / Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 82 p., Curitiba, Brasil, 2008.

LATRE, Luis G., **Modelagem e Controle de Posição de Robôs**. Revista Controle e Automação / SBA – Sociedade Brasileira de Automática, Vol. 2, nº 1, pp 3-15, Campinas, Brasil, 1988.

LEE, C. S. G., **Robot Arm Dynamics**. In: IEEE Tutorial on Robotics, IEEE Computer Society Press, 1983.

LEMOS, Nivaldo A., *Mecânica Analítica*. Ed. Livraria da Física, 388 p., São Paulo, Brasil, 2007.

LOPES, António M., *Modelação Cinemática e Dinâmica de Manipuladores de Estrutura em Séria*. Dissertação de Mestrado – FEUP / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 101 p., Porto, Portugal, 2002.

MALAQUIAS, Igor M., *Projeto e Caracterização de um Sistema de Telemetria para Ensaios em Voo de Aeronaves Leves*. Dissertação de Mestrado – UFMG / Universidade Federal de Minas Gerais, 173 p., Belo Horizonte, Brasil, 2009.

MAREELS, Iven M. Y.; POLDERMAN, Jan W., *Adaptive Systems: An Introduction*. Ed. Birkhauser, 339 p., Boston, Estados Unidos, 1996.

MAREELS, Iven M. Y.; YDSTIE, B. Erick, **Global Stability for an MIT Rule based adaptive Control**. *Decision and Control, 1989, Proceedings of the 28th IEEE Conference*, Volume 2, pp 1585-1590, Orlando, Estados Unidos, 1989.

MARIANI, Viviane C., *Maple – Fundamentos e Aplicações*. Ed. LTC, 548 p., São Paulo, Brasil, 2005.

MARINS, Carlos N. M., *Estudo Analítico e Numérico de um Enlace Digital de Comunicação via Satélite em condição orbital Geoestacionária*. Dissertação de Mestrado – Inatel / Instituto Nacional de Telecomunicações, 185 p., Santa Rita do Sapucaí, Brasil, 2004.

MATSUMOTO, Élia Y., *Simulink 5: Fundamentos*. Ed. Érica, 2ª Edição, 208 p., São Paulo, Brasil, 2004.

MEIROVITCH, Leonard, *Methods of Analytical Dynamics*. Ed. McGraw-Hill Book Company, 544 p., New York, Estados Unidos, 1970.

NARENDRA, Kumpati S.; ANNASWAMY, Anuradha M., *Stable Adaptive Systems*. Ed. Prentice Hall, 512 p., New Jersey, Estados Unidos, 1989.

NATAL, Guilherme S., *Nanoposicionamento de Precisão por Controle Adaptativo Binário de Atuadores Piezoelétricos*. Dissertação de Mestrado – UFRJ / Universidade Federal do Rio de Janeiro, 129 p., Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

NISE, Norman S., *Engenharia de Sistemas de Controle*. Ed. LTC, 5ª Edição, 706 p., Rio de Janeiro, Brasil, 2009.

OGATA, Katsuhiko, *Engenharia de Controle Moderno*. Ed. Prentice Hall do Brasil, 4ª Edição, 800p., Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

PAUL, Richard P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*. MIT Press series in artificial intelligence, 1ª Edição, Cambridge, Estados Unidos, 1982.

PAZOS, Fernando, *Automação de Sistemas e Robótica*. Ed. Axcel Books, 1ª Edição, 392 p., Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

PRATT, Timothy; BOSTIAN, Charles W.; ALLNUT, Jeremy E., *Satellite Communications*. Ed. John Wiley & Sons, 2ª Edição, 528 p., New Jersey, Estados Unidos, 2002.

QUEIROZ, Kurios I. P. M., *Sistema de Controle de Apontamento para Antena da Estação TT&C de Natal*. Relatório Final de Iniciação Científica CRN/INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 39 p., Natal, Brasil, 2006.

RECH, Cassiano, *Análise e Implementação de Técnicas de Controle Digital Aplicadas a Fontes Ininterruptas de Energia*. Dissertação de Mestrado – UFSM / Universidade Federal de Santa Maria, 153 p., Santa Maria, Brasil, 2001.

REHM, T.; SCHMIDT, P., **Intelligent Model Reference Adaptive Control Applied to Motion Control**. *Industry Applications Conference. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95, Conference Record of the 1995 IEEE*, Volume 2, pp 1605-1611, Orlando, Estados Unidos, 1995.

RESENDE, João M. O. S. A., *Estudo do Controlo Adaptativo Como Metodologia Emergente das Técnicas de Controlo de Sistemas Dinâmicos*. Dissertação de Mestrado – FEUP / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 335 p., Porto, Portugal, 1995.

ROMANO, Vitor F., *Robótica Industrial - Aplicação na Indústria de Manufatura e de Processos*. Ed. Edgard Blucher Ltda., 280 p., São Paulo, Brasil, 2002.

ROODY, Dennis, *Satellite Communications*. Ed. McGraw-Hill Professional, 3ª Edição, 569 p., New York, Estados Unidos, 2001.

ROSÁRIO, João M., *Princípios de Mecatrônica*. Ed. Prentice Hall do Brasil, 368 p., Rio de Janeiro, Brasil, 2005.

SALVIANO FILHO, Paulo T., *Ferramenta Didática para o Ensino de Vibrações e de Dinâmica em Engenharia*. Dissertação de Mestrado – UNB / Universidade de Brasília, 99 p., Brasília, Brasil, 2009.

SANTOS, Alfranci F.; JUNIOR, Munif G.; LOPES, Heitor S., **Cinemática Inversa de Trajetórias de Manipuladores Robóticos Redundantes Utilizando Algoritmos Genéticos com Redução Progressiva do Espaço de Busca**. VII SBAI / II IEEE LARS, São Luís, Brasil, 2005.

SANTOS, Ricardo F., *Controle Neural Adaptativo Híbrido Indireto: Aplicação a um Sistema Industrial*. Dissertação de Mestrado – UnilesteMG / Centro Universitário do Leste de Minas Gerais, 90 p., Coronel Fabriciano, Brasil, 2009.

SANTOS, Rogério R.; SARAMAGO, Sezimária F. P.; STEFFEN, Valder, **Otimização do Torque Aplicado Pelos Atuadores de Robôs Usando Técnicas de Controle Ótimo**. 15º POSMEC – Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – FEME/UFU, Uberlândia, Brasil, 2005.

SASTRY, Shankar; BODSON, Marc, *Adaptive Control: Stability Convergence and Robustness*. Ed. Prentice Hall, 377 p., New Jersey, Estados Unidos, 1989.

SCHILLING, Robert J., *Fundamentals of Robotics: Analysis & Control*. Ed. Prentice Hall, 425 p., New Jersey, Estados Unidos, 1990.

SCOFANO, Felipe, S., **Obtenção da Cinemática Inversa de Robôs 2D Binários Hiper-Redundantes por Algoritmos Genéticos**. RICA – Revista Inteligência Computacional Aplicada, Vol. 9, Rio de Janeiro, Brasil, 2010.

SIEGWART, Roland; NOURBAKHS, Illah R.; SCARAMUZZA, Davide, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press, 2ª Edição, 335 p., Cambridge, Estados Unidos, 2004.

SILVA, J. C. S.; LINDER, M.; IRMÃO, M. A. S.; SILVA, R. P., **Modelagem Cinemática de Um Robô Manipulador**. Anais do XXXIV COBENGE, pp 1111-1119, Passo Fundo, Brasil, 2006.

SLOTINE, Jean J.; LI, Weiping, *Applied Nonlinear Control*. Ed. Prentice Hall, 461 p., New Jersey, Estados Unidos, 1991.

SOUTO, Moisés C. B., *Desenvolvimento de uma Interface Gráfica para o Sistema de Controle da Antena da Estação Multimissão de Natal – EMMN*. Relatório Final de Iniciação Científica CRN/INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 64 p., Natal, Brasil, 2009.

TAKEUTI, Reinaldo, *CATIA V5 R18 Para Iniciantes e Especialistas*. Ed. Alta Books, 1ª Edição, 208 p., Rio de Janeiro, 2009.

TAMBARA, Rodrigo V.; GRÜNDLING, Hilton A.; DELLA FLORA, Leandro, **Projeto de um Controlador Adaptativo Robusto por Modelo de Referência Aplicado a uma Fonte de Potência CA**. XVIII CBA – Congresso Brasileiro de Automática, 3537-3544 p., Bonito, Brasil, 2010.

TEIXEIRA, Vinícius A.; TAKAHIRA, Brunner T.; IAGALO, Daniel P.; COLÓN, Diego, **Controle Não-Linear de Sistemas Instáveis**. Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2008.

TICKOO, Sham, **Catia V5 R19 for Designers**. Ed. CAD/CIM Technologies, 1ª Edição, 720 p., Estados Unidos, 2009.

VANDOREN, Vance J., **Techniques for Adaptive Control**. Ed. Elsevier / Butterworth-Heinemann, 275 p., Maryland Heights, Estados Unidos, 2002.

WOODS, Robert L.; KENT, L. Lawrence, **Modeling and Simulation of Dynamics Systems**. Ed. Prentice Hall, New Jersey, Estados Unidos, 1997.