

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**FABIANO ARMELLINI**

**Projeto e implementação do controle de posição de uma antena de radar  
meteorológico através de servomecanismos**

**São Paulo  
2006**

**FABIANO ARMELLINI**

**Projeto e implementação do controle de posição de uma antena de radar  
meteorológico através de servomecanismos**

**Dissertação apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia.**

**Área de concentração: Engenharia de Controle e  
Automação Mecânica**

**Orientador: Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury**

**São Paulo  
2006**

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Armellini, Fabiano**

**Projeto e implementação do controle de posição de uma antena de radar meteorológico através de servomecanismos / F. Armellini - São Paulo, 2006.**

**123 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.**

**1. Sistemas de Controle 2. Servomecanismos 3. Antenas  
4. Estruturas Flexíveis (Controle) 5. Radares I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.**

*Ad Deum, qui lætíficat juventútem meam (Ps XLII, 4)*

## AGRADECIMENTOS

Há tantas pessoas dignas de menção, que temo ser injusto nesta hora, pelos nomes que forçosamente terei que omitir em função do curto espaço que tenho para tal.

Primeiramente eu gostaria de agradecer e prestar homenagem aos meus pais, Laerte e Neusa, a quem Deus confiou minha educação e formação, que sempre procuraram corresponder a esta responsabilidade com muito zelo, dedicação e sacrifício.

Gostaria também de agradecer ao Prof. Dr. Orlando Fedeli, à sua esposa, a Prof<sup>a</sup>. MSc. Maria Ivone Pereira de Miranda Fedeli e a todos da Associação Cultural Montfort que, pelo conhecimento, convívio e bom exemplo, muito contribuem para a minha formação cultural e religiosa.

No que tange a minha formação acadêmica e profissional, agradeço primeiramente a todos os professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, nominal e especialmente ao meu orientador de mestrado, o Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury (2003-2006), ao orientador de minha dissertação de graduação, o Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho (2002) e ao meu orientador de Iniciação Científica, o Prof. Dr. Paulo Carlos Kaminski (1998-2000).

Devo uma menção especial aos meus grandes amigos e sócios da Allagi Engenharia, Eng. MSc. Bruno Rondani, Eng. Rafael Rocha Levy, Eng. Henri Shinichi de Souza Okajima e Eng. MSc. Gustavo Ribeiro Alves, pelo contínuo apoio e incentivo.

Agradeço também à Omnisys Engenharia, nas pessoas de seus sócios-diretores: Eng. MSc. Luiz Manoel Dias Henriques, Eng. Edgard Lima de Meneses e Eng. Jorge Hidemi Ohashi, não só pela bolsa de estudos oferecida para realização do presente trabalho, mas principalmente pela confiança e pela oportunidade.

Finalmente, agradeço à Fapesp, na pessoa de seu Presidente, o Prof. Dr. Carlos Vogt, pelo financiamento do projeto através do Programa de Inovação Tecnológica em Pequena Empresas (PIPE), fases II e III.

Ó tu, quem quer que sejas, que te sentes longe da terra firme, arrastado pelas ondas deste mundo, no meio das borrascas e tempestades, se não queres soçobrar, não tires os olhos da luz desta estrela. Se o vento das tentações se levanta, se o escolho das tribulações se interpõe em teu caminho, olha a estrela, invoca Maria. Se és balouçado pelas vagas do orgulho, da ambição, da maledicência, da inveja, olha a estrela, invoca Maria. Se a cólera, a avareza, os desejos impuros sacodem a frágil embarcação de tua alma, levanta os olhos para Maria. Se, perturbado pela lembrança da enormidade de teus crimes, confuso à vista das torpezas de tua consciência, aterrorizado pelo medo do Juízo, comesas a te deixar arrastar pelo turbilhão da tristeza, a despenhar no abismo do desespero, pensa em Maria.

Nos perigos, nas angústias, nas dúvidas, pensa em Maria, invoca Maria. Que seu nome nunca se afaste de teus lábios, jamais abandone teu coração; e para alcançar o socorro da intercessão dela, não negligencies os exemplos de sua vida. Seguindo-a, não te transviarás; rezando a ela, não desesperarás; pensando nela, evitarás todo erro. Se ela te sustenta, não cairás; se ela te protege, nada terás a temer; se ela te conduz, não te cansarás; se ela te é favorável, alcançarás o fim. E assim verificarás, por tua própria experiência, com quanta razão foi dito: *E o nome da Virgem era Maria.*"

São Bernardo de Claraval

## RESUMO

Uma antena-radar clássica é composta basicamente de uma fonte primária justaposta a um foco refletor parabólico. A lei de iluminação é estabelecida de maneira a satisfazer, tão precisamente quanto possível, a forma do feixe desejado. É a movimentação do conjunto que garante a cobertura de exploração desejada.

O presente texto estuda o projeto e desenvolvimento de um servomecanismo capaz de suportar e posicionar uma antena de radar, dentro de parâmetros e restrições definidas. Os objetivos do trabalho são: levantar e estudar os fatores relevantes para especificação de um projeto de controle de posição de uma antena-radar através de servomecanismos; apresentar uma proposta de projeto de controle de posição através de servomecanismo; propor um modelo estrutural teórico consistente do conjunto antena-radar para fins de simulação dinâmica e análise modal da estrutura, e apresentar a implantação do sistema de controle proposto num projeto real de Engenharia, para o servomecanismo de uma antena de radar meteorológico.

A proposta de controle foi aplicada com êxito no Modelo de Engenharia do Radar Meteorológico Doppler RMD700S-1M, desenvolvido pelo consórcio Omnisys/Atech, que foi instalado e opera em Mogi das Cruzes/SP. O texto apresenta, de forma estruturada, os fatores relevantes que devem ser levados em consideração para o desenvolvimento de um projeto deste tipo.

Como conclusões do texto, são apresentadas considerações com relação ao projeto, apontando pontos positivos e negativos do desenvolvimento.

Palavras-chave: Sistemas de Controle; Servomecanismos; Antenas; Controle de Estruturas Flexíveis; Radares

## ABSTRACT

A classical radar antenna is basically composed of a primary source mounted at the focal point of a parabolic reflector. The illumination rule is established so that the desired beam-shape is attained, as precisely as possible. The physical motion of the set guarantees the coverage of the desired volume of exploitation.

The actual text studies the design and development of a servomechanism capable of supporting and positioning a radar antenna, within well-defined parameters and restrictions. The aims of the dissertation are: determination and study of relevant factors for the specification of a control system design for the positioning of a servo-driven radar antenna; presentation of a servo-driven positioning control system design proposal; proposal of a consistent theoretical structural model of the radar antenna set for the purpose of dynamic simulation and modal analysis of the structure and; presentation of the implementation of the proposed control system in a real Engineering design project: a servo-driven weather radar antenna.

The control propose was successfully employed at the Engineering Model of the Doppler weather radar RMD700S-1M, developed by the trust Omnisys/Atech, installed and operant at Mogi das Cruzes/SP. The text presents, in a structured form, all relevant factor that must be taken into account in the development of such design.

The conclusions drawn at the end of the dissertation are considerations regarding the design, which point out faults and weak points of the development.

Keywords: Control Systems; Servomechanisms; Antennas; Flexible Structure Control; Radars



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sistema esférico de coordenadas utilizado em radares .....	18
Figura 2 Diagrama em blocos fundamental de um sistema radar .....	19
Figura 3 Volume meteorológico produzido pelo radar RMD700S-1M .....	21
Figura 4 Radar móvel de aquisição de alta potência (HIPAR) da Nike Air Defence .....	23
Figura 5 Tela de monitoramento de tráfego aéreo .....	23
Figura 6 Tipos de posicionador .....	25
Figura 7 Posicionadores do tipo Elevação sobre Azimute (EL/AZ) .....	26
Figura 8 Mecanismo do tipo Azimute sobre Elevação (AZ/EL) .....	26
Figura 9 Mecanismo "hexapod" .....	27
Figura 10 Antena <i>hexapod</i> Banda X da Zodiac/In-Snec .....	28
Figura 11 Radar <i>phased-array</i> THAAD ( <i>Theater High Altitude Area Defense</i> ) .....	29
Figura 12 Radar GBR-P da Raytheon com tecnologia <i>phased-array</i> híbrida .....	30
Figura 13 Servomecanismo de acionamento manual .....	35
Figura 14 Malha de controle básica para servomecanismos .....	35
Figura 15 Malha de rastreamento automático .....	36
Figura 16 Radome .....	43
Figura 17 Redundância da representação angular em radares de trajetografia .....	46
Figura 18 Funcionamento básico de um motor <i>brushless</i> .....	49
Figura 19 Construção de um motor <i>brushless</i> de 3 fases .....	50
Figura 20 Modulação PWM das fases U, V e W de um motor <i>brushless</i> de 3 fases .....	51
Figura 21 Retificador de entrada do servoconversor .....	51
Figura 22 Modulação na saída do servoconversor por IGBT's .....	52
Figura 23 Princípio de funcionamento do <i>encoder</i> óptico absoluto .....	54
Figura 24 Protocolo de comunicação serial padrão SSI .....	58
Figura 25 Camadas de proteção contra fim-de-curso .....	62
Figura 26 Rampa de atenuação do batente eletrônico superior .....	63
Figura 27 Principais dimensões da antena com radome. ....	64
Figura 28 Gráfico do torque de vento de acordo com a posição da antena .....	68

Figura 29 Cálculo do torque de vento por meio de análise FEM .....	68
Figura 30 Diagrama da malha de controle .....	70
Figura 31 Acoplamento dos eixos em trajetografia .....	70
Figura 32 Modelo mecânico da planta .....	71
Figura 33 Modelo elétrico do servomotor .....	73
Figura 34 Diagrama em blocos de controle do sistema .....	74
Figura 35 Lugar das raízes para a malha aberta de controle de posição .....	76
Figura 36 Função de transferência.....	79
Figura 37 Representação dos bastidores do Modelo de Engenharia .....	83
Figura 38 Modelo de Engenharia do Radar RMD700S-1M em Mogi das Cruzes/SP .....	86
Figura 39 Diagrama em blocos geral do sistema de controle .....	87
Figura 40 Contexto de <i>software</i> .....	89
Figura 41 Arquitetura de <i>software</i> .....	89
Figura 42 Modos de operação do <i>software</i> de controle .....	91
Figura 43 Função de filtragem proporcional do erro (com saturação) .....	92
Figura 44 Tela principal do <i>software</i> IHM.....	94
Figura 45 Sub-tela de operação em modo fixo .....	95
Figura 46 Sub-tela de operação em modo varredura .....	95
Figura 47 Sub-tela de operação em modo manual .....	95
Figura 48 Sub-tela de configuração do controlador .....	96
Figura 49 Modelo sólido CAD do Conjunto Antena-Posicionador AN700S.....	98
Figura 50 Dimensões gerais Conjunto Antena-Posicionador AN700S.....	99
Figura 51 Redução do mecanismo de azimute.....	102
Figura 52 Redução do mecanismo de elevação .....	103
Figura 53 Diagrama em blocos da interface entre <i>encoders</i> e controlador. ....	105
Figura 54 Efeito da variação de $K_p$ nos pólos de malha aberta de azimute .....	107
Figura 55 Lugar das raízes de malha (de posição) aberta para azimute - baixo $K_p$ .....	108
Figura 56 Lugar das raízes de malha (de posição) aberta para azimute - alto $K_p$ .....	109
Figura 57 Efeito da variação de $K_p$ nos pólos de malha aberta de elevação .....	109
Figura 58 Lugar das raízes de malha (de posição) aberta para elevação - baixo $K_p$ .....	110
Figura 59 Lugar das raízes de malha (de posição) aberta para elevação - alto $K_p$ .....	110

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

