

4 Simulações

4.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentadas diversas simulações com o modelo do sistema de acompanhamento de alvos desenvolvido nos capítulos anteriores. A modelagem foi feita considerando o sistema composto por corpos rígidos, porém com flexibilidade nos redutores. Isto permite simular mecanismos do tipo “pan-tilt” de diversos tamanhos, pesos e torques de atrito entre os corpos, bastando alterar parâmetros no programa de simulação (massas dos corpos, tensores de inércia, coeficientes de atrito, etc).

No entanto, serão utilizados nas simulações os parâmetros apresentados na seção 4.2, que são similares aos da bancada de testes do Laboratório de Dinâmica e Vibrações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, descrita em detalhes no próximo capítulo. Os parâmetros do sistema que não constam na seção 4.2 são aqueles que irão variar entre uma simulação e outra.

4.2. Parâmetros utilizados nas simulações

4.2.1. Sistema de alimentação dos motores elétricos

Há um sistema independente para cada motor. Os limites para as tensões e correntes fornecidas pelo sistema de alimentação utilizado no Laboratório (circuito amplificador de potência com limitador de corrente elétrica alimentado por fontes de corrente contínua) são:

$$U_{L,R1} = U_{L,R2} = 12 \text{ V} \quad (4.1)$$

$$i_{L,R1} = i_{L,R2} = 4,6 \text{ A} \quad (4.2)$$

4.2.2. Corpo 1

O motor 2 é fixo neste corpo e será considerado que o centro de massa de seu rotor permanece fixo com relação ao corpo 1 e sob seu eixo axial, coincidente por sua vez com o eixo de elevação. Assim, os valores apresentados nas equações 4.4, 4.5 e 4.6 referem-se ao conjunto formado pelo corpo 1 e pelo motor 2 com seu redutor. O tensor de inércia da Eq. (4.5) foi calculado considerando-se o conjunto formado pelo motor 2 e seu redutor como uma massa pontual, localizada no centro de massa do próprio conjunto.

$$m_1 = 0,47 \text{ kg} \quad (4.4)$$

$${}^1I_1 = \begin{bmatrix} 2148 & 0 & -368 \\ 0 & 40567 & 0 \\ -368 & 0 & 38421 \end{bmatrix} \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.5)$$

$${}^1\mathbf{d}_c = [0 \quad 0 \quad -0.00225]^T \text{ m} \quad (4.6)$$

$$c_1 = 0.0000125 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad} / \text{s}} \quad (4.7)$$

4.2.3. Corpo 2

$$m_2 = 0,07 \text{ kg} \quad (4.8)$$

$${}^2I_2 = \begin{bmatrix} 449 & 0 & 0 \\ 0 & 1191 & 0 \\ 0 & 0 & 766 \end{bmatrix} \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.9)$$

$${}^2\mathbf{d}_d = [0 \quad 0 \quad -0.0173]^T \text{ m} \quad (4.10)$$

$$c_2 = 0.0000125 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad} / \text{s}} \quad (4.11)$$

4.2.4. Motor 1

Como o motor 1 é fixo no corpo 0 (que tem movimentos prescritos) e considerando que o centro de massa de seu rotor localiza-se no seu eixo axial, torna-se irrelevante para a simulação o valor de m_{R1} . Pode-se considerar, então, nas equações 2.18 e 2.48 que m_{R1} é igual à zero.

O momento de inércia axial do rotor é de $0,0000052 \text{ kg m}^2$. Considerando que o rotor é um cilindro de diâmetro igual ao seu comprimento obtém-se a seguinte aproximação para o seu tensor de inércia [36]:

$${}^{R1}I_{R1} = \begin{bmatrix} 60.7 & 0 & 0 \\ 0 & 60.7 & 0 \\ 0 & 0 & 52 \end{bmatrix} \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.12)$$

Os demais parâmetros são:

$$R_{R1} = 1,34 \ \Omega \quad (4.13)$$

$$L_{R1} = 0,000220 \text{ H} \quad (4.14)$$

$$k_{fcm,R1} = 0,02 \frac{V}{\text{rad} / s} \quad (4.15)$$

$$k_{torque,R1} = 0,02 \text{ N} \cdot \text{m} / A \quad (4.16)$$

$$c_{R1} = 0,000002 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad} / s} \quad (4.17)$$

$$T_{max,R1} = 0,00126 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.18)$$

$$T_{din,R1} = 0,00108 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.19)$$

4.2.5. Motor 2

O motor 2 é fixo no corpo 1 e assume-se que o centro de massa de seu rotor localiza-se no seu eixo axial. Além disso, a massa do rotor já foi incluída em m_1 conforme mencionado na seção 4.2.5, por isso deve-se considerar nas equações 2.27 e 2.49 que m_{R2} é igual a zero para não se duplicar o cálculo de sua energia cinética de translação bem como de sua energia potencial

Os parâmetros deste motor são:

$${}^{R2}I_{R2} = \begin{bmatrix} 30 & 0 & 0 \\ 0 & 35 & 0 \\ 0 & 0 & 35 \end{bmatrix} \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (4.20)$$

Os demais parâmetros são:

$$R_{R2} = 2,84 \ \Omega \quad (4.21)$$

$$L_{R2} = 0,001 \text{ H} \quad (4.22)$$

$$K_{fcm,R2} = 0,006 \frac{V}{\text{rad} / s} \quad (4.23)$$

$$K_{torque,R2} = 0,006 \text{ N} \cdot \text{m} / A \quad (4.24)$$

$$c_{R2} = 0,00000014 \frac{N \cdot m}{rad / s} \quad (4.25)$$

$$T_{max,R2} = 0,00204 \ N \cdot m \quad (4.26)$$

$$T_{din,R2} = 0,00163 \ N \cdot m \quad (4.27)$$

4.2.6. Redutor entre o rotor 1 e o corpo 1

Este redutor de velocidades apresenta uma redução de 43:1, assim:

$$N_1 = 43 \quad (4.28)$$

Uma vez que os coeficientes de rigidez e amortecimento estrutural resultantes do redutor não são fornecidos pelo fabricante, optou-se em empregar valores similares aos utilizados na literatura [17] e [71].

$$K_{s1} = 3000 \ N \cdot m / rad \quad (4.29)$$

$$c_{s1} = 1 \frac{N \cdot m}{rad / s} \quad (4.30)$$

4.2.7. Redutor entre o rotor 2 e o corpo 2

Este redutor de velocidades apresenta uma redução de 127:1, assim:

$$N_2 = 127 \quad (4.31)$$

Pelos mesmos motivos apresentados na seção 4.2.6., utiliza-se:

$$K_{s2} = 3000 \ N \cdot m / rad \quad (4.32)$$

$$c_{s2} = 1 \frac{N \cdot m}{rad / s} \quad (4.33)$$

4.2.8. Sensores de posição angular relativa e sensor de visão

São utilizados encoders digitais com disco ótico de 1024 fendas. Assim, as precisões dos referidos sensores utilizados para medir os ângulos α e β serão dadas por:

$$P_\alpha = P_\beta = \frac{2 \cdot \pi}{1024} = 0,0061 \ rad \quad (4.34)$$

O sensor de visão possui os seguintes ângulos de abertura:

$$\hat{\rho}_{az} = 0.57 \text{ rad} \quad (4.35)$$

$$\hat{\rho}_{el} = 0.43 \text{ rad} \quad (4.36)$$

4.2.9. Outras informações

Será considerada uma aceleração da gravidade (g) de $9,81 \text{ m/s}^2$ e as seguintes condições iniciais:

$$\alpha(t_0) = \beta(t_0) = \alpha_m(t_0) = \beta_m(t_0) = i_{R1}(t_0) = i_{R2}(t_0) = \theta_{b1}(t_0) = \theta_{b2}(t_0) = 0$$

$$\dot{\alpha}(t_0) = \dot{\beta}(t_0) = \dot{\alpha}_m(t_0) = \dot{\beta}_m(t_0) = 0$$

4.3. Simulações

Nas simulações apresentadas na próxima seção o sistema é submetido a quatro situações diferentes:

- i) Situação 1: Corpo 0 e alvos fixos;
- ii) Situação 2: Corpo 0 fixo e alvo movendo-se;
- iii) Situação 3: Corpo 0 movendo-se e alvo fixo; e
- iv) Situação 4: Corpo 0 e alvo movendo-se.

Para se verificar o desempenho do sistema em cada uma destas situações são variados alguns parâmetros como as folgas nos redutores e os atrasos de tempo das malhas utilizadas nos controladores. A seguir estão descritas em maiores detalhes cada uma das quatro situações escolhidas para as simulações.

4.3.1. Situação 1: Corpo 0 e alvo fixos

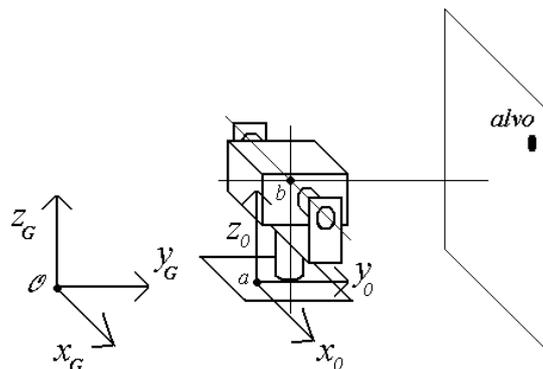


Figura 4.1 - Alvo e corpo 0 fixos.

Considera-se que o corpo 0 e o alvo permanecem fixos, com os eixos x_0, y_0 e z_0 paralelos respectivamente à x_G, y_G e z_G , Fig. 4.1, e:

$${}^0\mathbf{d}_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.09 \\ 0.09 \end{bmatrix} m \quad (4.37)$$

$${}^G_{\emptyset}\mathbf{d}_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} m \quad (4.38)$$

$${}^G_{\emptyset}\mathbf{d}_{\text{alvo}} = \begin{bmatrix} 0.06 \\ 0.34 \\ 0.15 \end{bmatrix} m \quad (4.39)$$

4.3.2. Situação 2: Corpo 0 fixo e alvo movendo-se

Considera-se que o corpo 0 permanece fixo, com os eixos x_0, y_0 e z_0 paralelos respectivamente à x_G, y_G e z_G , e, o alvo realiza um movimento circular com velocidade angular Ω em um plano paralelo à x_G - z_G , Fig. 4.2, dado por:

$${}^G_{\emptyset}\mathbf{d}_{\text{alvo}} = \begin{bmatrix} 0.06 \cdot \sin(\Omega \cdot t) \\ 0.34 \\ 0.09 + 0.06 \cdot \cos(\Omega \cdot t) \end{bmatrix} m \quad (4.40)$$

Os vetores ${}^0\mathbf{d}_b$ e ${}^G_{\emptyset}\mathbf{d}_a$ são os mesmos da situação 1.

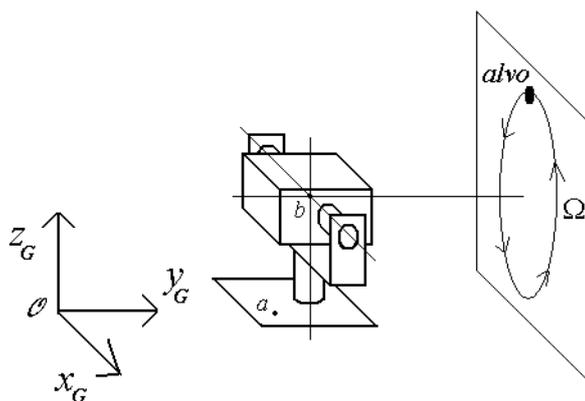


Figura 4.2 - Movimento do alvo.

4.3.3. Situação 3: Corpo 0 movendo-se e alvo fixo

Considera-se o corpo 0 com movimentos de translação e rotação e um alvo fixo, conforme a Fig. 4.3, onde o veículo representa o corpo 0.

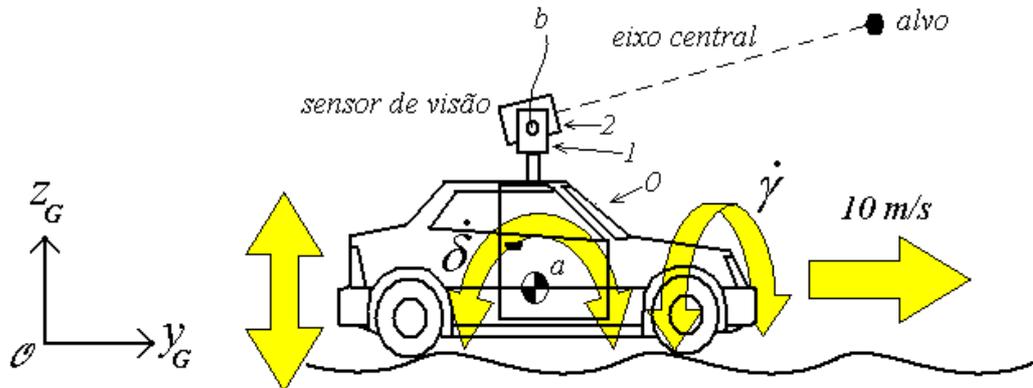


Figura 4.3 – Alvo fixo, corpo 0 em movimento.

O ponto a representa o centro de massa do veículo. O movimento prescrito deste corpo é dado por:

$${}^c \mathbf{d}_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \cdot t \\ 0.5 + 0.1 \cdot \sin(2\pi t) \end{bmatrix} m \quad (4.41)$$

$$\delta = 0.25 \cdot \sin(2\pi t) \quad (4.42)$$

$$\psi = 0 \quad (4.43)$$

$$\gamma = 0.1 \cdot \sin(4\pi t) \quad (4.44)$$

O vetor posição do ponto b com respeito ao ponto a é dado por:

$${}^a \mathbf{d}_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} m \quad (4.45)$$

O vetor posição do alvo com respeito à origem do sistema de coordenadas solidário ao referencial inercial é dado por:

$${}^c \mathbf{d}_{\text{alvo}} = \begin{bmatrix} 10 \\ 20 \\ 10 \end{bmatrix} m \quad (4.46)$$

4.3.4. Situação 4: Corpo 0 e alvo movendo-se

Nesta situação o corpo 0 representa um míssil, Fig. 4.4, cujo movimento prescrito é dado por:

$${}^G_c \mathbf{d}_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 250 \cdot t \\ 1000 \end{bmatrix} m \quad (4.47)$$

$$\delta = 0.1 \cdot \cos(4\pi t) \quad (4.48)$$

$$\psi = 0.1 \cdot \sin(4\pi t) \quad (4.49)$$

$$\gamma = 4\pi t \quad (4.50)$$

O alvo representa um avião cujo movimento prescrito é dado por:

$${}^G_c \mathbf{d}_{\text{alvo}} = \begin{bmatrix} 150 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}t\right) \\ 1000 + 150 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}t\right) \\ 1000 \end{bmatrix} m \quad (4.51)$$

A figura abaixo representa o movimento do míssil (corpo 0) e do alvo. O sistema de acompanhamento de alvos encontra-se no nariz do míssil.

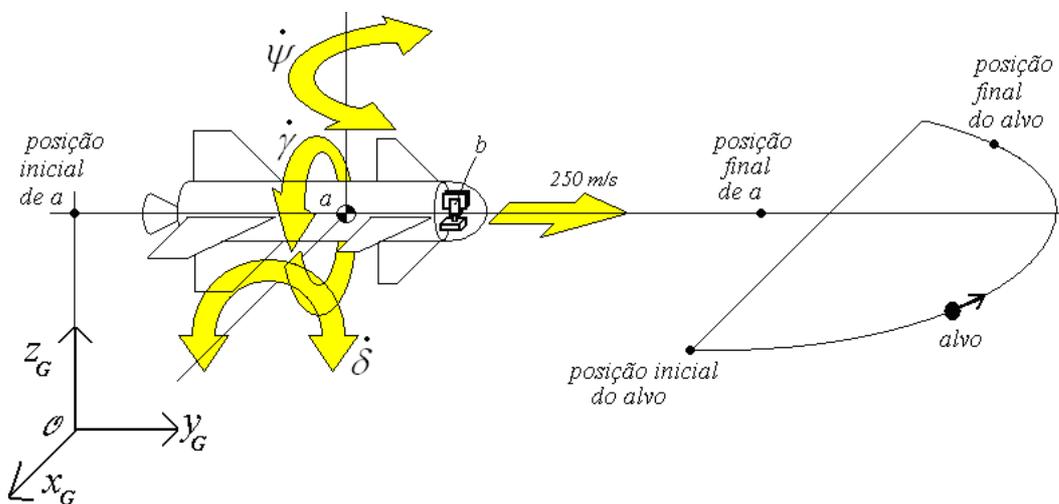


Figura 4.4 – Alvo e corpo 0 em movimento.

O vetor posição do ponto b (interseção dos eixos de elevação, rotação e central do sistema) com respeito ao ponto a é:

$${}^0\mathbf{d}_b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0.1 \end{bmatrix} m \quad (4.52)$$

4.4 Resultados das simulações

4.4.1. Arquitetura de controle do tipo 1

4.4.1.1. Situação 1

a) Simulação 1

Considera-se um sistema com folgas muito pequenas nos redutores ($\eta_1 = \eta_2 = 0,001 \text{ rad}$) e tempo de atualização do sinal de controle (Δt) de 0.02 segundos.

Utilizando os seguintes ganhos dos controladores, obtidos previamente pelo método de Ziegler-Nichols através de simulações:

$$k_{p,R1} = 21; k_{i,R1} = 210; k_{d,R1} = 0,53 \quad (4.53)$$

$$k_{p,R2} = 28,8; k_{i,R2} = 140,5; k_{d,R2} = 1,5 \quad (4.54)$$

obtêm-se os resultados apresentados na Fig. 4.5.

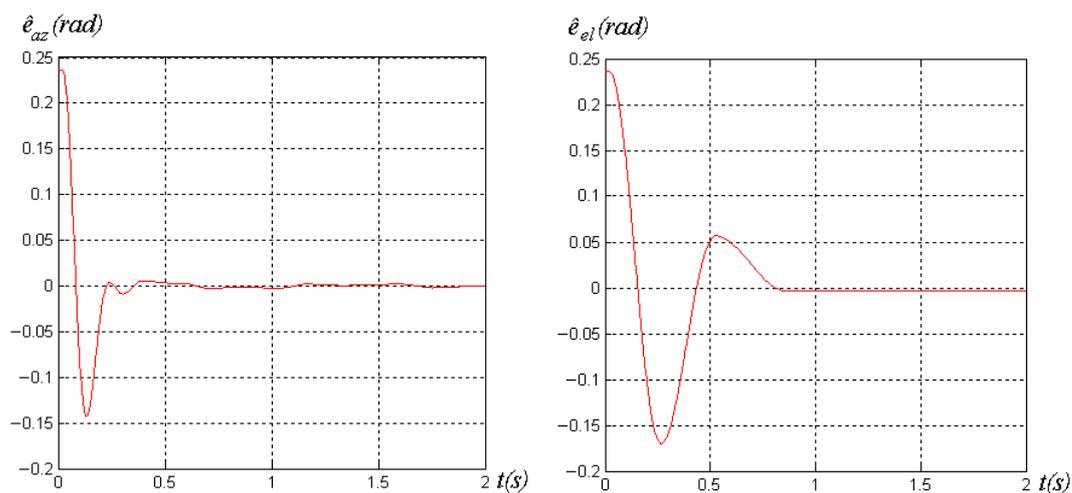


Figura 4.5 – Simulação 1: Erros angulares de azimuth e elevação em função do tempo.

Observa-se que o alvo é levado para próximo do centro da imagem (quando o eixo central aponta exatamente para o alvo os erros angulares são iguais a zero)

em cerca de 0,8 segundos. Apesar de haver um “overshoot” significativo o sistema mantém o alvo longe dos limites do campo de visão do sensor.

O alvo encontra-se dentro do campo de visão quando:

$$-\hat{\rho}_{az} < \hat{e}_{az} < \hat{\rho}_{az} \quad \text{e} \quad -\hat{\rho}_{el} < \hat{e}_{el} < \hat{\rho}_{el} \quad (4.55)$$

b) Simulação 2

Considerando os mesmos parâmetros da Simulação 1, porém com um tempo de atualização do sinal de controle (Δt) de 0,06 segundos, obtêm-se os resultados apresentados na Fig. 4.6:

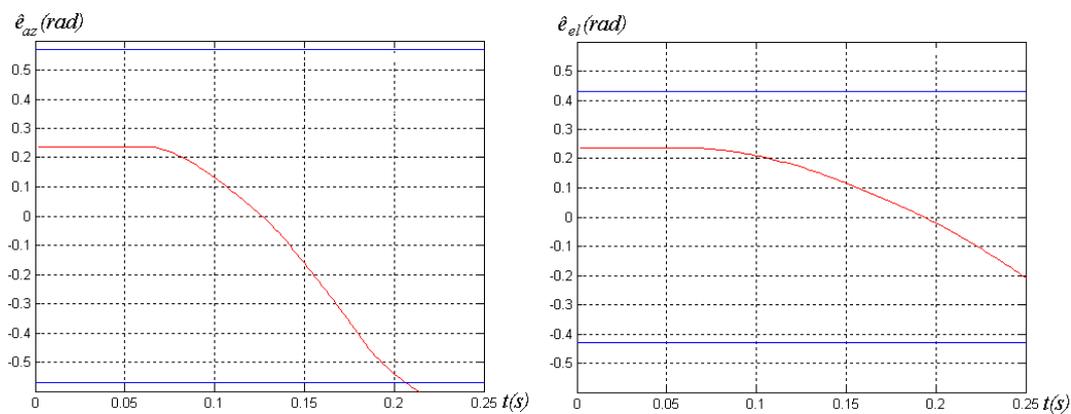


Figura 4.6 – Simulação 2: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se que os controladores não conseguem mais manter o alvo dentro do campo de visão do sensor. Ocorre a perda do alvo após cerca de 0,19 segundos.

As linhas azuis representam $\hat{\rho}_{az}$ e $\hat{\rho}_{el}$.

c) Simulação 3

Utilizando novos ganhos para os controladores que foram reajustados pelo método de Ziegler-Nichols (devido à alteração de Δt é recomendável o reajuste):

$$k_{p,R1}=8,34; \quad k_{i,R1}=37,9; \quad k_{d,R1}=0,46 \quad (4.56)$$

$$k_{p,R2}=13,8; \quad k_{i,R2}=39,4; \quad k_{d,R2}=1,21 \quad (4.57)$$

obtêm-se os resultados apresentados na Fig. 4.7.

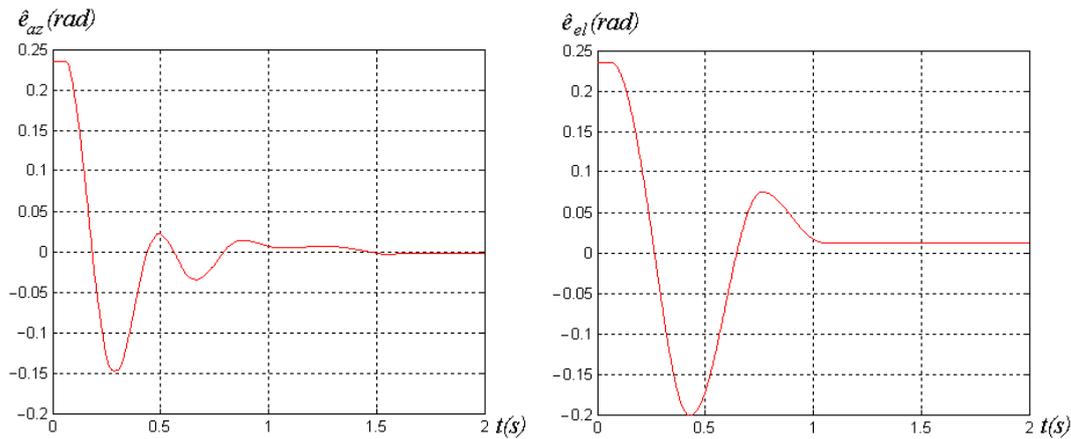


Figura 4.7 – Simulação 3: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Com o reajuste dos ganhos o sistema volta a ter um desempenho adequado (Fig. 4.7) mantendo o alvo dentro do campo de visão do sensor. Apesar disso, pode-se constatar uma piora no desempenho em relação ao resultado da simulação 1 (maior “overshoot”, pior precisão final, etc) onde Δt era menor (0,02 segundos).

d) Simulações 4, 5, 6 e 7

Agora serão apresentadas quatro simulações utilizando diferentes Δt e maiores folgas nos redutores (η_1 e η_2), conforme a Tab. 4.1. Os ganhos dos controladores foram todos obtidos previamente em simulações pelo método de Ziegler–Nichols.

Tabela 4.1 Ganhos do controlador PID (ou PI ou P)

Simulação	Δt (s)	η_1 (rad)	η_2 (rad)	Ganhos
4	0,02	0,0044	0,026	$k_{p,R1}=19,8$; $k_{i,R1}=198$; $k_{d,R1}=0,50$ $k_{p,R2}=27$; $k_{p,R2}=128,5$; $k_{p,R2}=1,42$
5		0,05	0,05	$k_{p,R1}=10,8$; $k_{i,R1}=77,1$; $k_{d,R1}=0,38$ $k_{p,R2}=26,4$; $k_{p,R2}=122,8$; $k_{p,R2}=1,41$
6	0,06	0,0044	0,026	$k_{p,R1}=7,8$; $k_{i,R1}=33,2$; $k_{d,R1}=0,46$ $k_{p,R2}=13,2$; $k_{p,R2}=37,2$; $k_{p,R2}=1,17$
7		0,05	0,05	$k_{p,R1}=4,8$; $k_{i,R1}=15,2$; $k_{d,R1}=0,38$ $k_{p,R2}=12,6$; $k_{p,R2}=34,5$; $k_{p,R2}=1,15$

As folgas das simulações 4 e 6 correspondem aos valores medidos dos redutores utilizados na bancada de testes. Nas simulações 5 e 7 utilizou-se valores exageradamente grandes para as folgas. Nas figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 encontram-se, respectivamente, os resultados obtidos nas simulações 4, 5, 6 e 7.

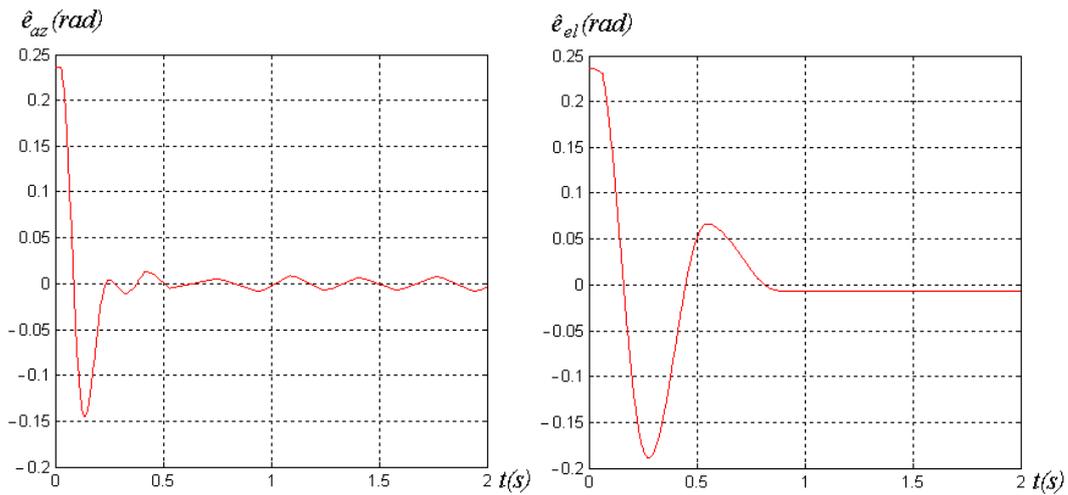


Figura 4.8 - Simulação 4: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

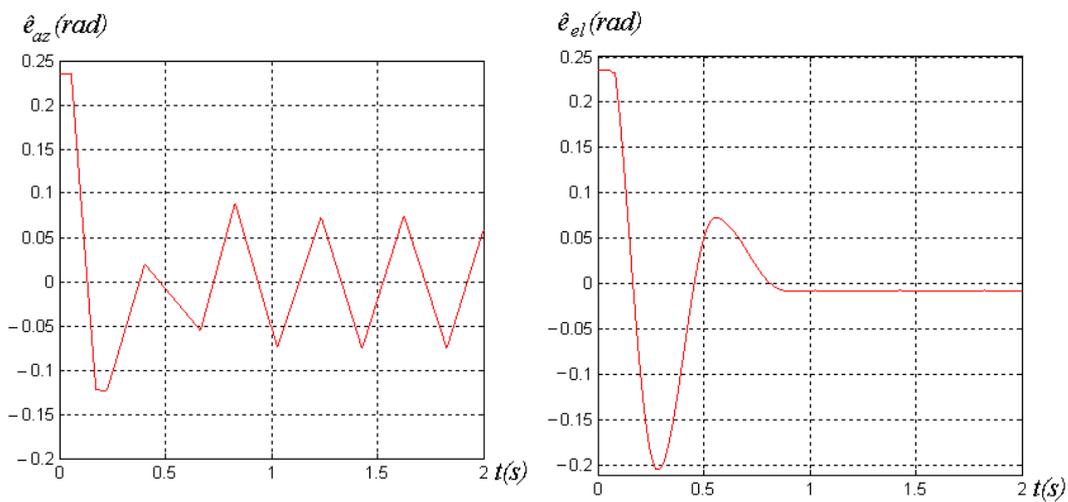


Figura 4.9 - Simulação 5: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

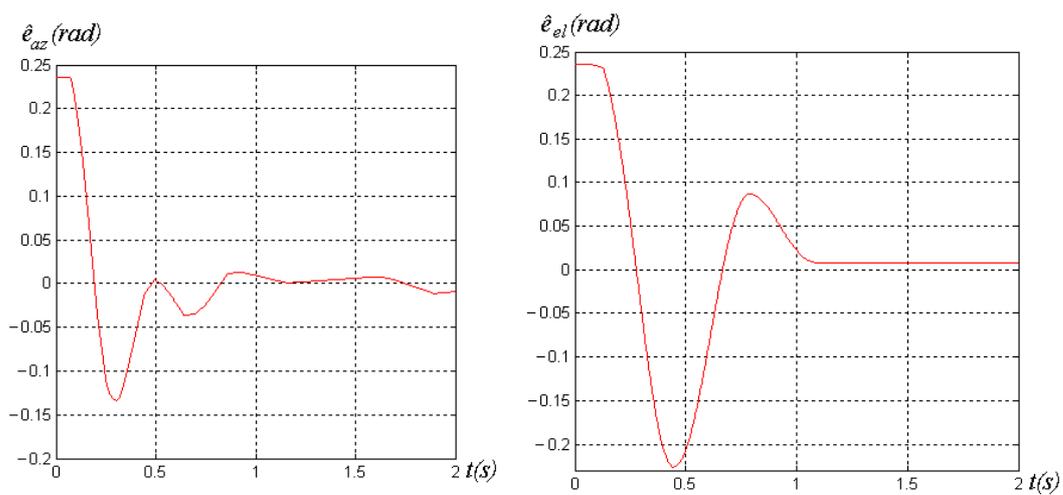


Figura 4.10 - Simulação 6: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

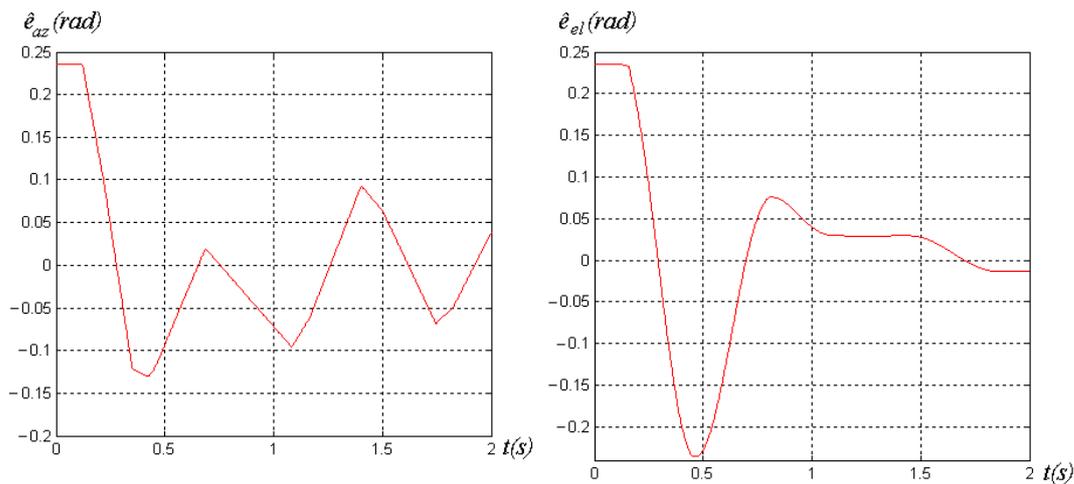


Figura 4.11 - Simulação 7: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se que com folgas muito grandes, figuras 4.9 e 4.11, o desempenho do sistema fica bastante comprometido, principalmente o controle do eixo de rotação que tem inércia maior, mesmo se os ganhos dos controladores forem obtidos pelo método de Ziegler-Nichols.

4.4.1.2. Situação 2

a) Simulação 8

Resultados de simulações com alvo movendo-se no plano indicado na Fig. 4.2 com $\Omega=0.5\pi$ rad/s (curvas em vermelho), 2π rad/s (curvas em preto) e 4π rad/s (curvas em verde) e sistema com $\eta_1=\eta_2=0.001$ rad, Δt de 0,02 segundos e os ganhos da simulação 1, encontram-se na Fig. 4.12.

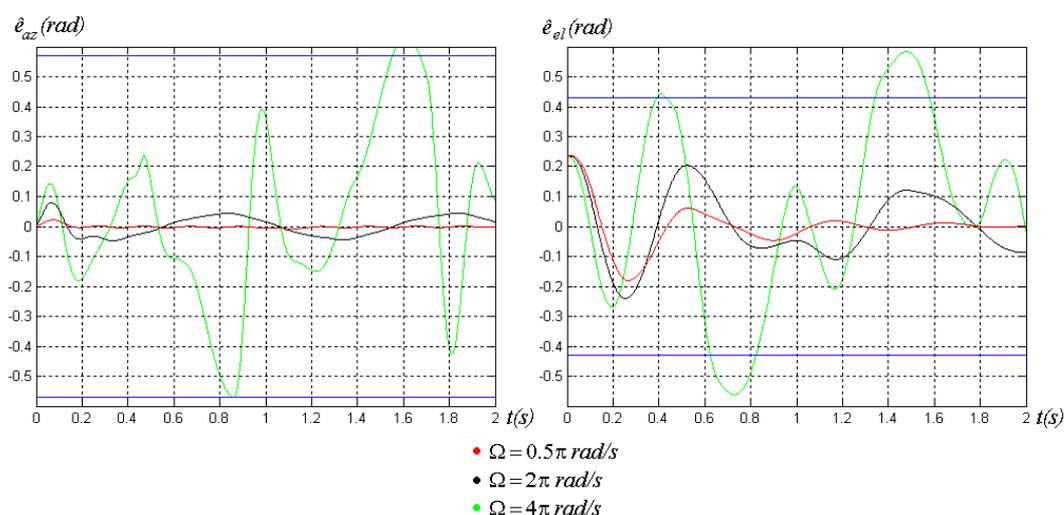


Figura 4.12 - Simulação 8: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se uma piora no desempenho do sistema com o aumento da velocidade do alvo. Quando $\Omega=4\pi$ rad/s o sistema não consegue mais manter o alvo dentro do campo de visão do sensor.

b) Simulação 9

Resultados de simulações com alvo movendo-se no plano indicado na Fig. 4.2 com $\Omega=0.5\pi$ rad/s (curvas em vermelho) e 2π rad/s (curvas em preto) e sistema com $\eta_1=0.0044$ rad, $\eta_2=0.026$ rad, Δt de 0,06 segundos e os ganhos da simulação 6, encontram-se na Fig. 4.13.

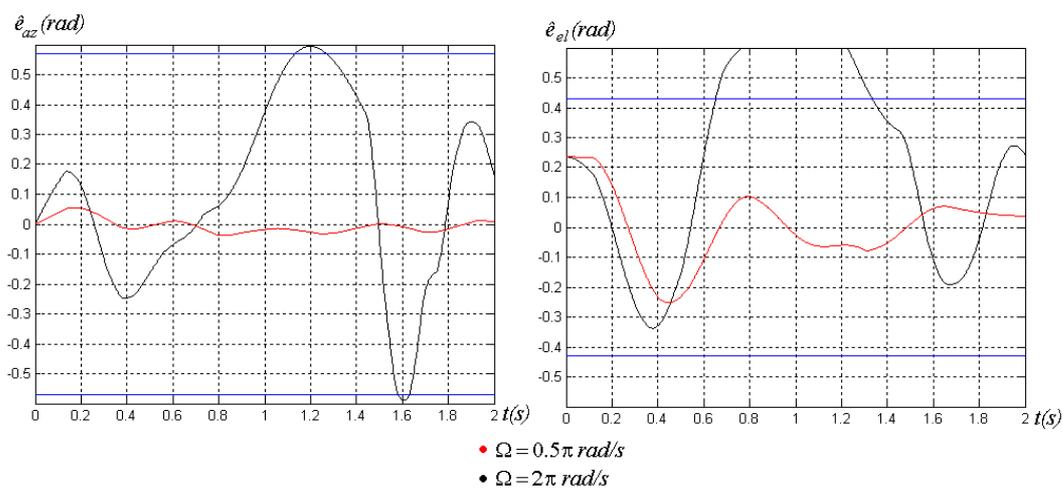


Figura 4.13 - Simulação 9: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se que com apenas $\Omega=2\pi$ rad/s o alvo sai do campo de visão do sensor, evidenciando que o aumento das folgas nos redutores e tempo de atualização da tensão de controle acarretam uma piora no desempenho do sistema.

4.4.1.3. Situação 3

a) Simulação 10

Na Fig. 4.14 encontram-se os resultados de simulações feitas em um sistema com $\eta_1=\eta_2=0.001$ rad, Δt de 0.02 segundos e ganhos dos controladores da simulação 1.

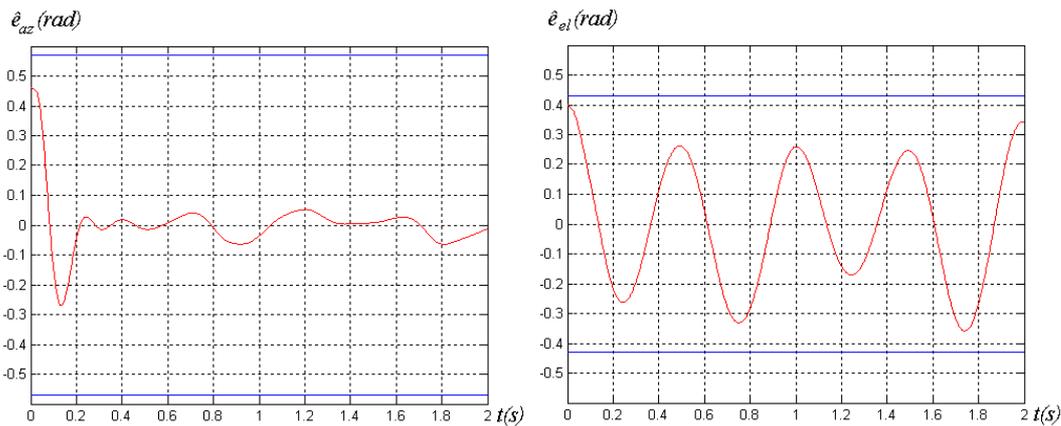


Figura 4.14 - Simulação 10: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

O sistema consegue manter o alvo dentro do campo de visão do sensor, porém ao longo da simulação observa-se a ocorrência de grandes erros angulares de elevação.

b) Simulação 11

A seguir encontram-se os resultados de simulações feitas em um sistema com $\eta_1=0.0044$ rad, $\eta_2=0.026$ rad, Δt de 0.06 segundos e ganhos dos controladores da simulação 6.

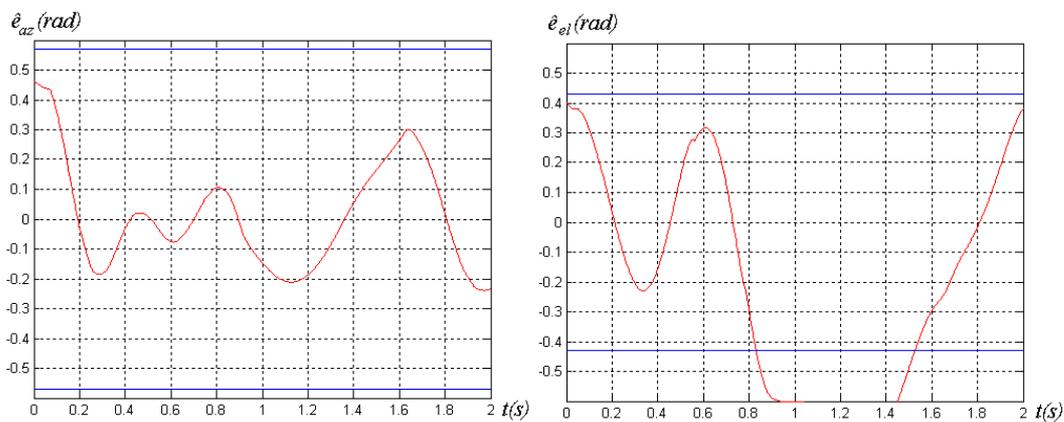


Figura 4.15 - Simulação 11: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se na Fig. 4.15 que o sistema não consegue manter o alvo dentro do campo de visão do sensor ao longo de toda simulação, evidenciando que o aumento das folgas nos redutores e aumento no tempo de atualização da tensão de controle acarretam uma piora no desempenho do sistema. O sistema com estes parâmetros não é, portanto, adequado para uso nesta situação.

4.4.1.4. Situação 4

a) Simulação 12

Na Fig. 4.16 encontram-se os resultados de simulações feitas em um sistema com $\eta_1 = \eta_2 = 0.001$ rad, Δt de 0.02 segundos e ganhos dos controladores da simulação 1.

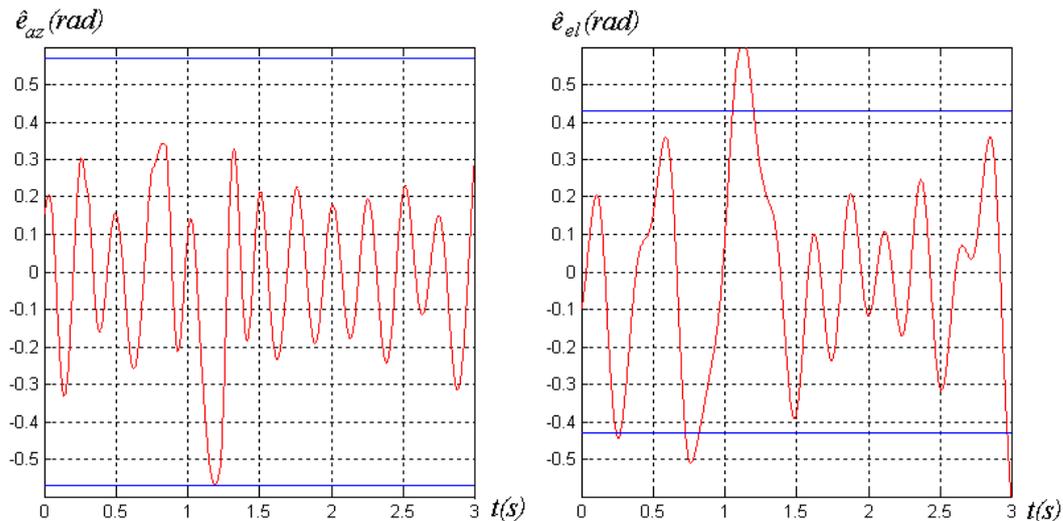


Figura 4.16 - Simulação 12: Erros angulares de azimuth e elevação em função do tempo.

Observa-se que o sistema não consegue manter o alvo dentro do campo de visão do sensor ao longo da simulação, mesmo quando as folgas nos redutores e o atraso para atualização das tensões de controle são pequenos. Conclui-se, assim, que esta arquitetura de controle não é adequada para esta situação.

4.4.2. Arquitetura de controle do tipo 2

4.4.2.1. Situação 1

a) Simulações 13, 14 e 15

Considerando um sistema com $\eta_1 = \eta_2 = 0.001$ rad e os atrasos nas malhas externas (Δt_1) e internas (Δt_2) da Tab. 4.2, obtêm-se os resultados apresentados nas figuras 4.17 e 4.18. Os ganhos dos controladores obtidos pelo método de Ziegler-Nichols para cada caso encontram-se na Tab. 4.2.

Tabela 4.2 Ganhos do controlador PID (ou PI ou P)

Simulação	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)	Ganhos
13	0.06	0.02	$k_{p,R1}=20,7; k_{i,R1}=207; k_{d,R1}=0,52$ $k_{p,R2}=28,8; k_{p,R2}=137,2; k_{p,R2}=1,5$
14	0.06	0.002	$k_{p,R1}=163,8; k_{i,R1}=5850; k_{d,R1}=1,15$
15	0.02	0.002	$k_{p,R2}=174; k_{p,R2}=2217; k_{p,R2}=3,41$

Os ganhos dos controladores das simulações 14 e 15 são os mesmos, pois o ajuste pelo método de Ziegler-Nichols é feito apenas na malha interna, independentemente, portanto, de Δt_1 conforme se viu no capítulo 3.

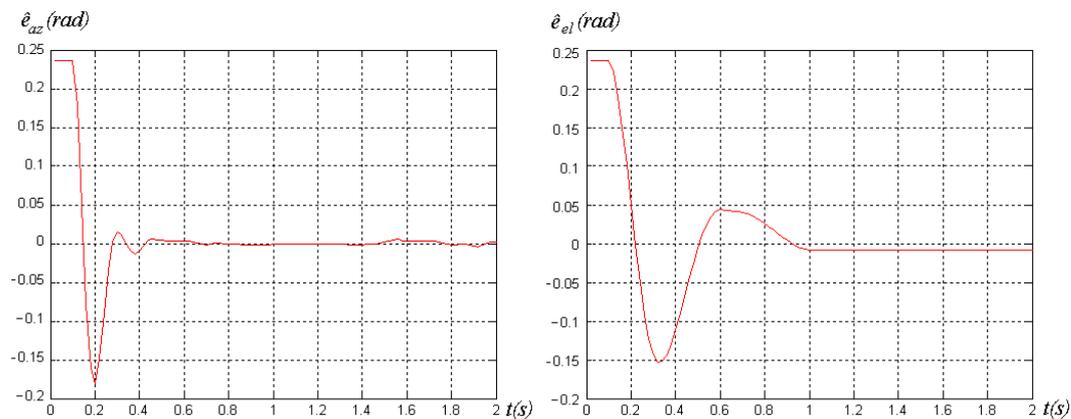


Figura 4.17 - Simulação 13: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se na Fig. 4.17 que apesar da informação sobre os erros angulares serem atualizadas a cada 0,06 segundos o desempenho do sistema é superior ao do sistema com arquitetura de controle do tipo 1 com $\Delta t = 0,06$ s (Fig. 4.5) e parecido com o do tipo 1 com $\Delta t = 0,02$ s (Fig. 4.7), uma vez que se tem os mesmos tempos para a atualização dos sinais de controle.

Na Fig. 4.18 encontram-se os resultados das simulações 14 (curvas vermelhas) e 15 (curvas pretas), onde a atualização das tensões de controle ocorrem a cada 0,002 segundos.

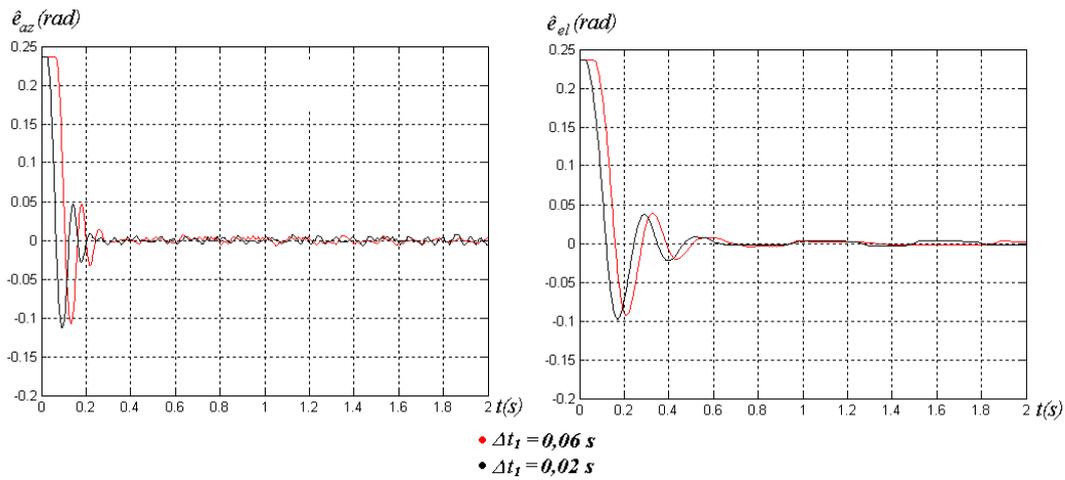


Figura 4.18 - Simulações 14 e 15: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Quando se reduz o tempo de atualização da tensão de controle (Δt_2) observa-se uma redução importante do “overshoot”. No entanto, mais oscilações de pequena amplitude ocorrem em torno de zero devido à combinação dos erros de medição dos encoders, torques de atrito seco e folgas com os maiores ganhos integrais. O comportamento do sistema pouco se altera com $\Delta t_1=0,06\text{s}$ (curva vermelha). A única diferença importante é que o movimento demora mais a se iniciar, pois a primeira informação sobre os erros angulares virá após 0,06 segundos ao invés de 0,02 segundos.

a) Simulações 16, 17, 18 e 19

Agora será considerado $\Delta t_1=0,06\text{s}$, porém diferentes Δt_2 e folgas maiores nos redutores, conforme a Tab. 4.3. Os ganhos dos controladores obtidos pelo método de Ziegler-Nichols para cada caso encontram-se na Tab. 4.3. Os resultados das simulações encontram-se nas figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22.

Tabela 4.3 Ganhos do controlador PID (ou PI ou P)

Simulação	Δt_1 (s)	Δt_2 (s)	η_1 (rad)	η_2 (rad)	Ganhos
16	0.06	0.002	0.0044	0.026	$k_{p,R1}=153; k_{i,R1}=5368; k_{d,R1}=1,09$ $k_{p,R2}=54; k_{p,R2}=388,5; k_{p,R2}=1,88$
17	0.06	0.002	0.05	0.05	$k_{p,R1}=48; k_{i,R1}=923; k_{d,R1}=0,63$ $k_{p,R2}=48,3; k_{p,R2}=322; k_{p,R2}=1,8$
18	0.06	0.02	0.0044	0.026	$k_{p,R1}=19,8; k_{i,R1}=198; k_{d,R1}=0,5$ $k_{p,R2}=27; k_{p,R2}=128,5; k_{p,R2}=1,42$
19	0.06	0.02	0.05	0.05	$k_{p,R1}=10,8; k_{i,R1}=77,1; k_{d,R1}=0,38$ $k_{p,R2}=26,4; k_{p,R2}=122 \quad k_{p,R2}=1,41$

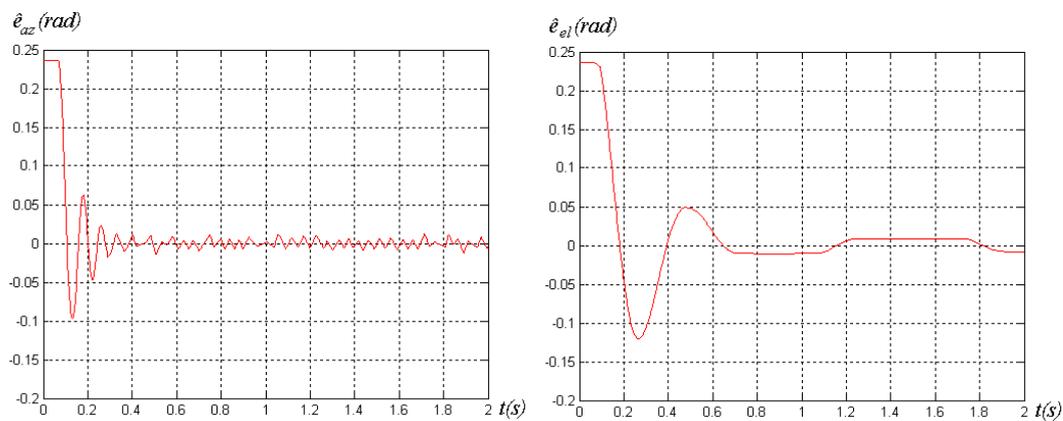


Figura 4.19 - Simulação 16: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

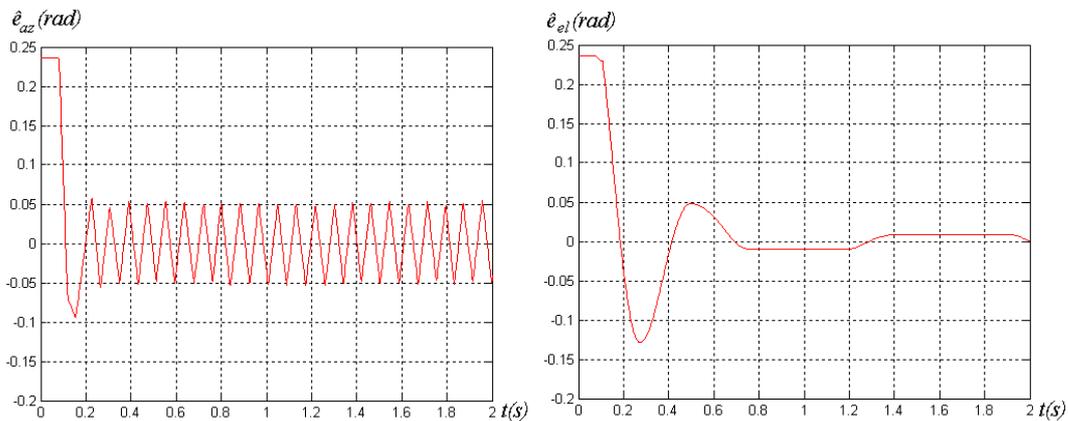


Figura 4.20 - Simulação 17: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

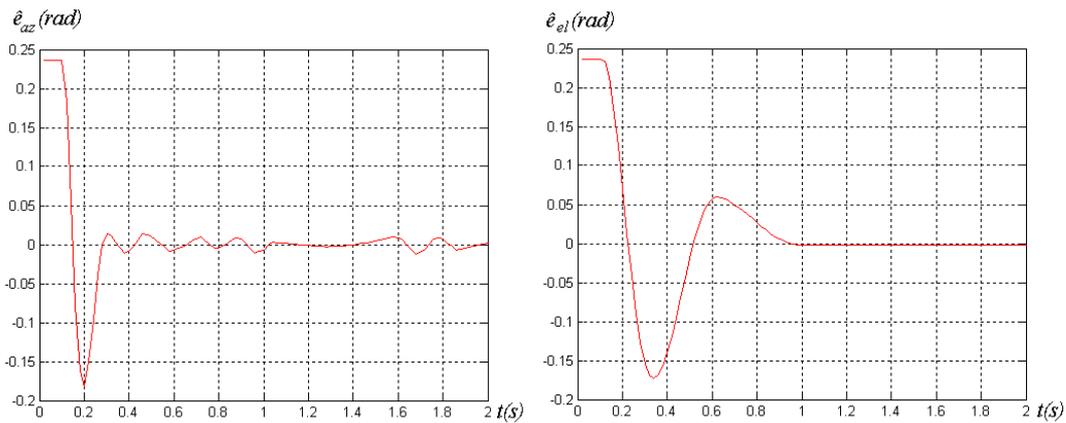


Figura 4.21 - Simulação 18: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

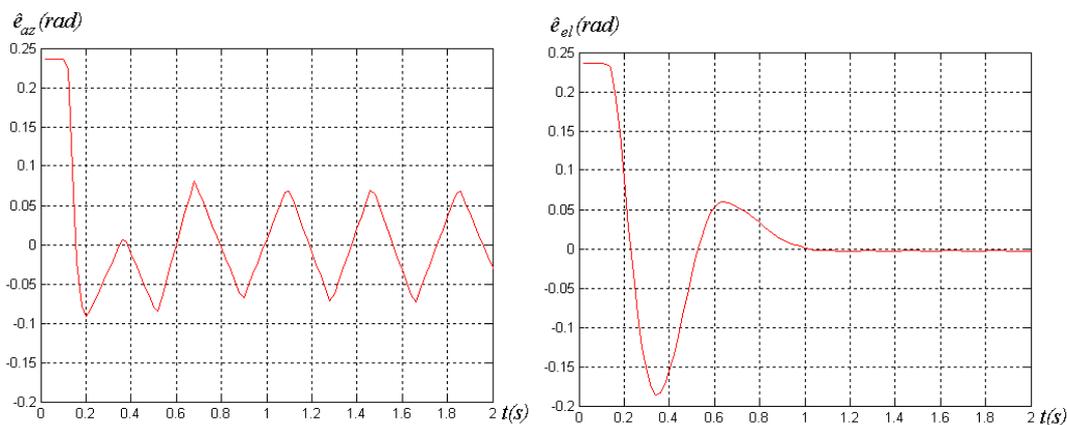


Figura 4.22 - Simulação 19: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se que com folgas muito grandes (figuras 4.20 e 4.22) o desempenho do sistema fica bastante comprometido, principalmente o controle do eixo de rotação, que tem inércia maior do que o de elevação, mesmo se os ganhos dos controladores forem obtidos pelo método de Ziegler-Nichols.

4.4.2.2. Situação 2

a) Simulações 20 e 21

Será considerado apenas um alvo movimentando-se com $\Omega=0.5\pi \text{ rad/s}$, $\eta_1=0.0044 \text{ rad}$, $\eta_2=0.026 \text{ rad}$ e $\Delta t_1=0.06 \text{ s}$. Na Fig. 4.23 as curvas vermelhas (simulação 20) correspondem à simulação feita com $\Delta t_2=0.02 \text{ s}$ e com os ganhos correspondentes à simulação 18. As curvas pretas (simulação 21) correspondem à

simulação feita com $\Delta t_2=0.002$ s e com os ganhos correspondentes à simulação 16.

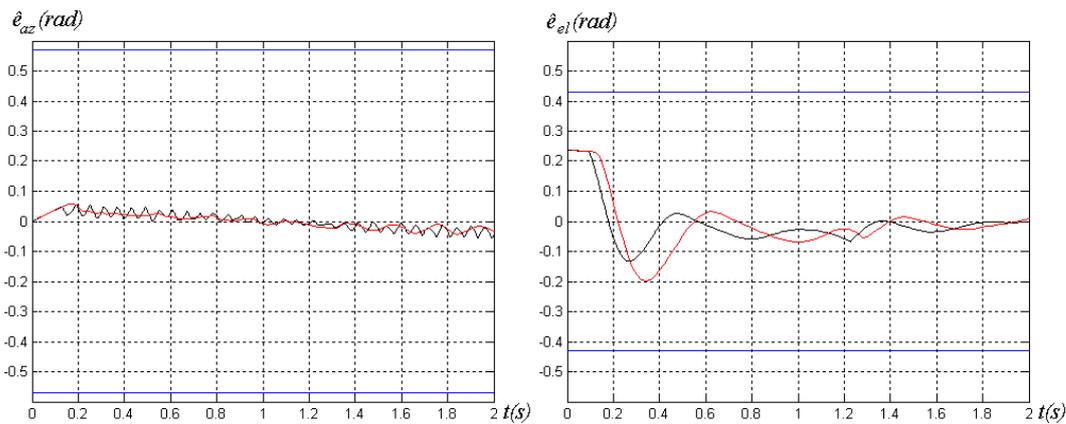


Figura 4.23 – Simulações 20 e 21: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se que este tipo de controle garante um desempenho melhor do que o do sistema com arquitetura de controle do tipo 1 quando $\Omega=0.5\pi$ rad/s (Fig. 4.13).

b) Simulações 22 e 23

Se as folgas nos redutores forem menores ($\eta_1=\eta_2=0.001$ rad) o desempenho do sistema será ainda mais satisfatório, conforme se observa na Fig. 4.24, onde as curvas vermelhas correspondem à simulação 22, que é feita com $\Delta t_2=0.02$ s e com os ganhos correspondentes à simulação 13. As curvas pretas correspondem à simulação 23, que é feita com $\Delta t_2=0.002$ s e com os ganhos correspondentes à simulação 14.

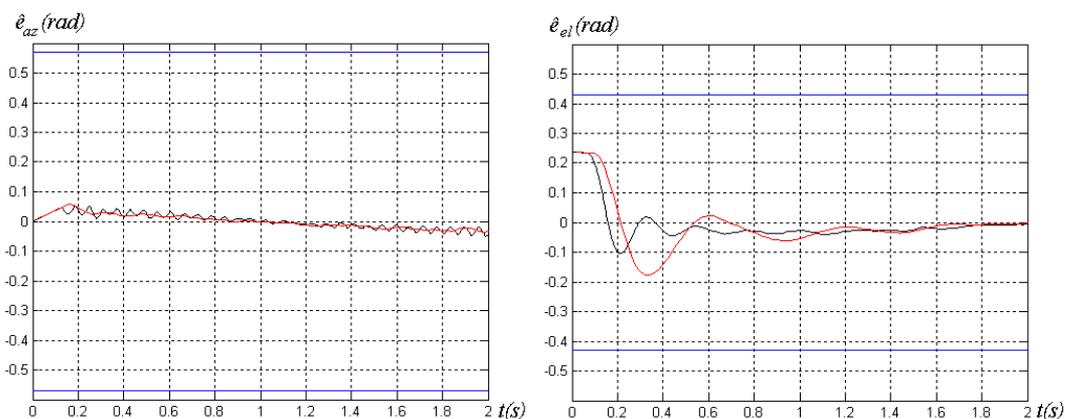


Figura 4.24 – Simulações 22 e 23: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

4.4.2.3. Situação 3

a) Simulação 24

Considerando $\eta_1 = \eta_2 = 0.001$ rad, $\Delta t_1 = 0.02s$, $\Delta t_2 = 0.002s$ e os ganhos dos controladores utilizados na simulação 15, obtêm-se os resultados da Fig. 4.25.

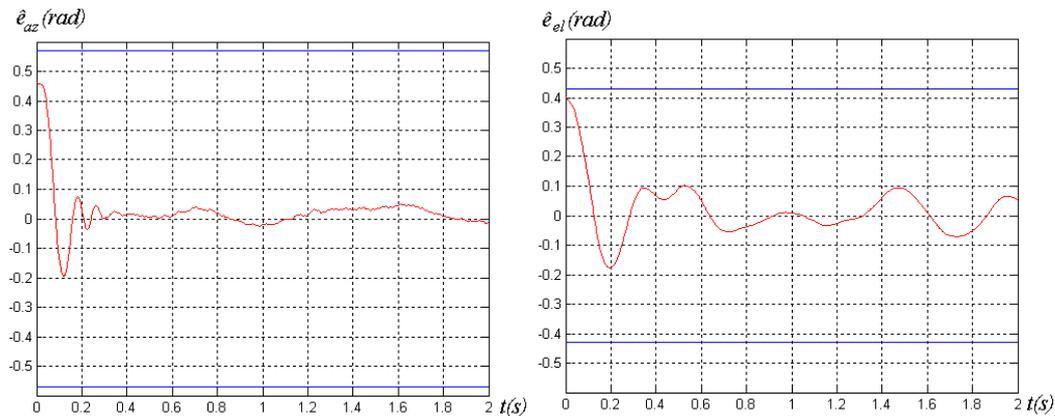


Figura 4.25 - Simulação 24: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se uma melhora significativa no desempenho do sistema quando comparado com a simulação feita com a arquitetura de controle do tipo 1 (simulação 10, Fig. 4.14).

4.4.2.4. Situação 4

a) Simulação 25

Considerando $\eta_1 = \eta_2 = 0.001$ rad, $\Delta t_1 = 0.02s$, $\Delta t_2 = 0.002s$ e os ganhos dos controladores utilizados na simulação 15, obtêm-se os resultados da Fig. 4.26.

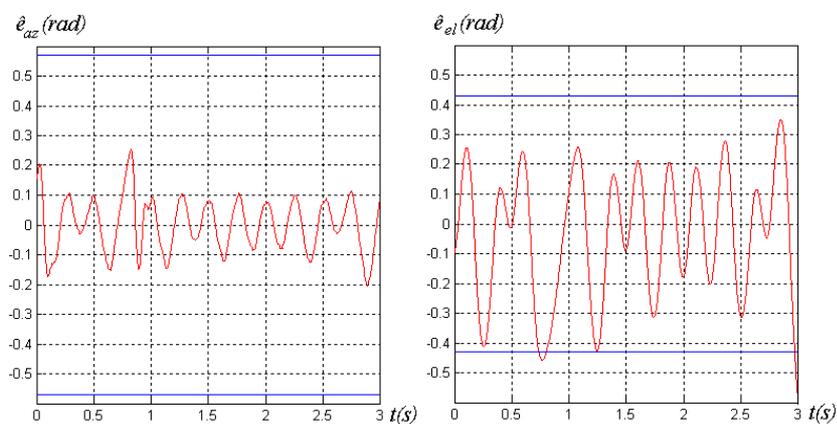


Figura 4.26 - Simulação 25: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

O sistema não consegue manter o alvo dentro do campo de visão do sensor ao longo da simulação, mesmo quando as folgas nos redutores são muito pequenas. Apesar do desempenho do sistema ser superior do que quando se utiliza a arquitetura de controle do tipo 1, o alvo sai do campo de visão do sensor após 3 segundos. Assim, esta arquitetura de controle não é satisfatória para esta situação.

4.4.3. Arquitetura de controle do tipo 3

Nas simulações desta seção será considerado que $\Delta t_1=0.02s$ e $\Delta t_2=0.002s$, o que resulta nos seguintes ganhos $M1$, $M2$ e $M3$ para os controladores, calculados conforme proposto na seção 3.4.3.1.

$$M1_{R1}=1,75 \quad (4.58)$$

$$M1_{R2}=2,32 \quad (4.59)$$

$$M2_{R1}=0,14 \quad (4.60)$$

$$M2_{R2}=0.19 \quad (4.61)$$

$$M3_{R1}=3,56 \quad (4.62)$$

$$M3_{R2}=2.69 \quad (4.63)$$

Os ganhos dos controladores da malha interna, obtidos pelo método de Ziegler-Nichols para $\eta_1=\eta_2=0.001$ rad, $\Delta t_1=0.02s$ e $\Delta t_2=0.002s$ são:

$$k_{p,R1}=1.8; k_{i,R1}=200; k_{d,R1}=0.004 \quad (4.64)$$

$$k_{p,R2}=24.6; k_{i,R2}=2236; k_{d,R2}=0.07 \quad (4.65)$$

Não se considerou sistemas com folgas maiores nos redutores ($\eta_1=0.0044$ rad e $\eta_2=0.026$ rad, por exemplo) nem maiores períodos de atualização da tensão de controle ($\Delta t_2=0.02s$, por exemplo), pois não foi possível aplicar o método de Ziegler-Nichols de modo satisfatório, uma vez que as curvas de resposta ficaram muito irregulares, impedindo a medição adequada do período de oscilação.

4.4.3.1. Situação 1

a) Simulação 26

Com os parâmetros citados na seção 4.4.3, foram obtidos os resultados apresentados na Fig. 4.27.

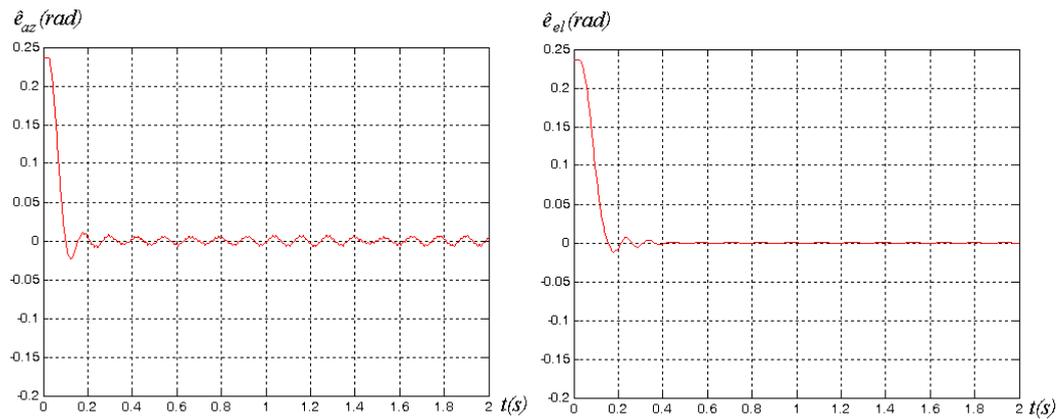


Figura 4.27 - Simulação 26: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Comparando-se os resultados da figura acima com os resultados apresentados na Fig. 4.18 (controle tipo 2) e Fig. 4.5 (controle do tipo 1), observa-se que, apesar da ocorrência de um ciclo limite no movimento do corpo 1, que se constata pela oscilação do erro angular de azimute, esta arquitetura de controle é bastante eficiente quando se deseja levar o alvo rapidamente para as proximidades do centro da imagem capturada pelo sensor de visão. Pode-se também observar que o “overshoot” é muito pequeno.

4.4.3.2. Situação 2

a) Simulação 27

Com os parâmetros citados na seção 4.4.3 e o alvo movendo-se no plano (Fig. 4.2) com $\Omega=0,5\pi$ rad/s (curvas vermelhas), $\Omega=2\pi$ rad/s (curvas pretas) e $\Omega=4\pi$ rad/s (curvas verdes) foram obtidos os resultados apresentados na Fig. 4.28.

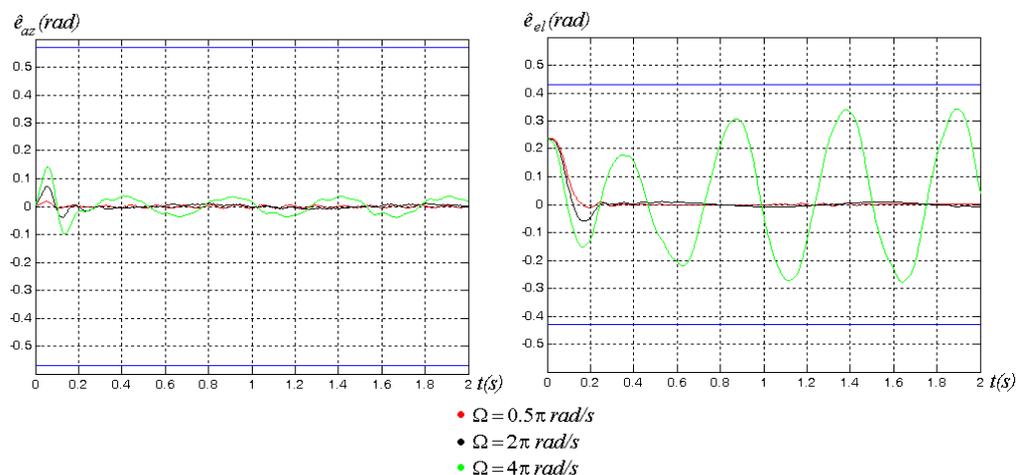


Figura 4.28 - Simulação 27: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Comparando-se os resultados da figura acima com os resultados obtidos com a arquitetura de controle do tipo 2 (simulação 23, Fig 4.24) e tipo 1 (simulação 8, Fig. 4.12), observa-se uma melhora significativa no desempenho do sistema.

4.4.3.3. Situação 3

a) Simulação 28

Com os parâmetros citados na seção 4.4.3, foram obtidos os resultados apresentados na Fig. 4.29.

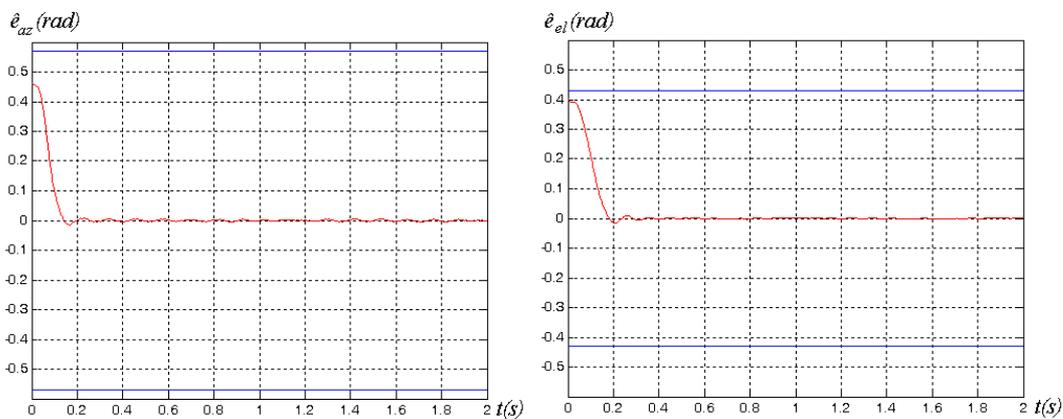


Figura 4.29 - Simulação 28: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Comparando-se os resultados da figura acima com os resultados obtidos com a arquitetura de controle do tipo 2 (simulação 24, Fig 4.25) e tipo 1 (simulação 10, Fig. 4.14), observa-se uma melhora significativa no desempenho do sistema.

4.4.3.4. Situação 4

a) Simulação 29

Com os parâmetros citados na seção 4.4.3, foram obtidos os resultados apresentados na Fig. 4.30.

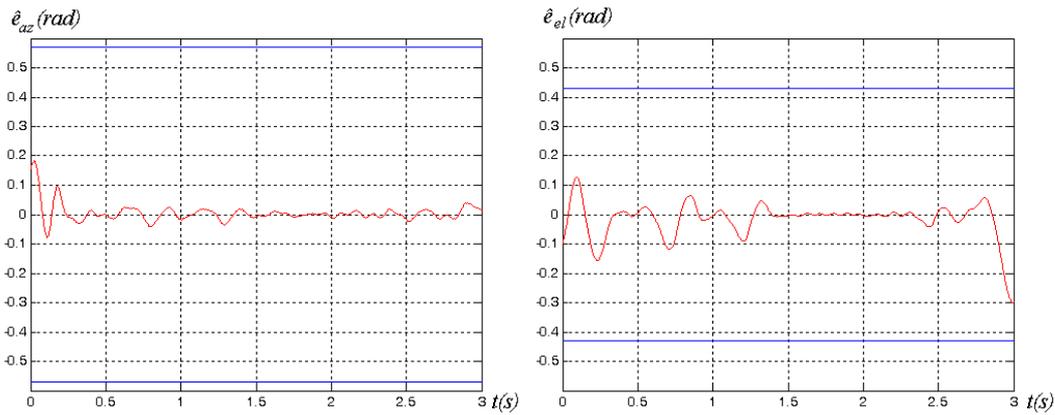


Figura 4.30 - Simulação 29: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Comparando-se os resultados da figura acima com os resultados obtidos com a arquitetura de controle do tipo 2 (simulação 25, Fig 4.26) e tipo 1 (simulação 12, Fig. 4.16), observa-se uma melhora significativa no desempenho do sistema, cujo controlador consegue manter o alvo dentro do campo de visão ao longo de toda simulação, evidenciando a adequabilidade da arquitetura de controle do tipo 3 para esta situação.

4.4.4. Influência de erros aleatórios nos sensores

Em todas as simulações apresentadas até agora considerou-se que o sensor de visão e os girômetros não possuíam erros de medição. Tais erros foram considerados apenas nos encoders, tendo sido modelados como erros determinísticos (de quantização), dependentes apenas do número de fendas existentes no disco ótico do sensor, conforme foi visto na seção 3.5. Nas simulações que se seguem serão considerados erros aleatórios no sensor de visão e girômetros, representados por funções de distribuição de probabilidade (*fdp*) retangulares. Será considerado que os erros de “offset” são nulos.

Para se verificar a influência dos erros de medição do sensor de visão e dos girômetros, será repetida, para cada arquitetura de controle, a simulação onde o alvo e o corpo 0 encontram-se fixos. Em todas as simulações será considerado, ainda que:

i) $\eta_1 = \eta_2 = 0.001 \text{ rad}$;

ii) atraso de tempo para atualização das tensões no controle tipo 1:
 $\Delta t = 0,02 \text{ s}$;

iii) atraso de tempo das malhas externas nos controles tipo 2 e tipo 3:

$$\Delta t_1 = 0,02s;$$

iv) atraso de tempo para atualização das tensões nos controles tipo 2 e tipo

$$3: \Delta t_2 = 0,002s;$$

Os ganhos dos controladores são aqueles utilizados nas simulações anteriores para os sistemas com os parâmetros acima.

4.4.4.1.

Arquitetura de controle do tipo 1

a) Simulação 30

Neste caso, como não há girômetros no sistema o único sensor com erro aleatório de medição é o sensor de visão. Os resultados obtidos encontram-se na Fig. 4.31. As curvas em vermelho são referentes à simulação considerando um sensor ideal, sem erros de medição ($\Delta=0$). As curvas em azul são referentes à simulação considerando um sensor com $\Delta=0.0007\text{ rad}$, que é um valor similar ao erro do sistema da bancada de testes. As curvas em preto são referentes à simulação considerando um sensor com $\Delta=0.01\text{ rad}$. As curvas em verde são referentes à simulação considerando um sensor com $\Delta=0.05\text{ rad}$, que é um valor exageradamente alto.

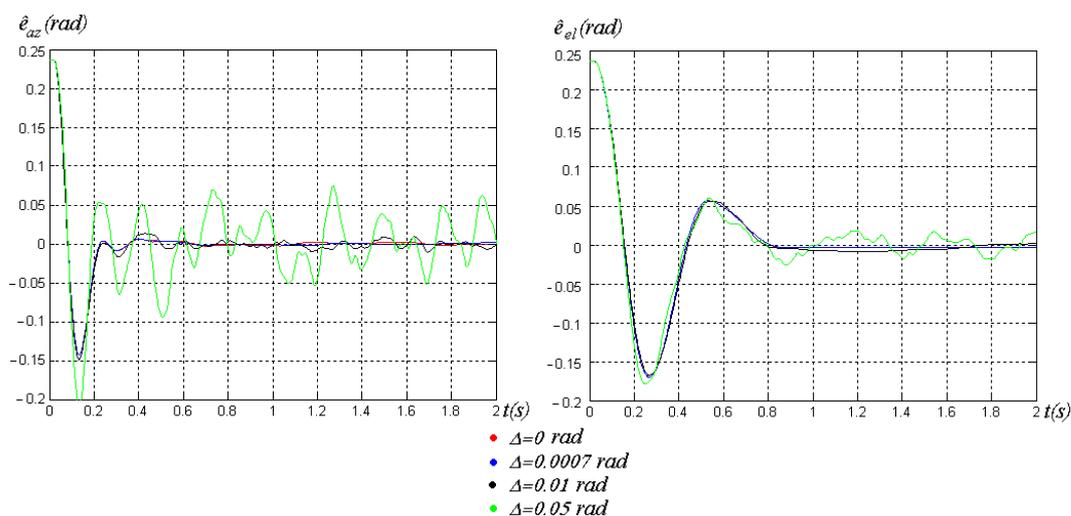


Figura 4.31 - Simulação 30: Erros angulares de azimuth e elevação em função do tempo.

Observa-se na figura acima que diferenças nos resultados só conseguem ser percebidas quando $\Delta=0.01\text{ rad}$ e, mesmo quando se utiliza um sensor de visão

com erro de medição exageradamente alto ($\Delta=0.05 \text{ rad}$), observa-se que o sistema ainda consegue manter o alvo dentro do campo de visão sem maiores dificuldades.

4.4.4.2. Arquitetura de controle do tipo 2

a) Simulação 31

Novamente, o único sensor com erro aleatório de medição é o sensor de visão. Considerando as mesmas incertezas da simulação anterior, obtêm-se os resultados apresentados na Fig. 4.32.

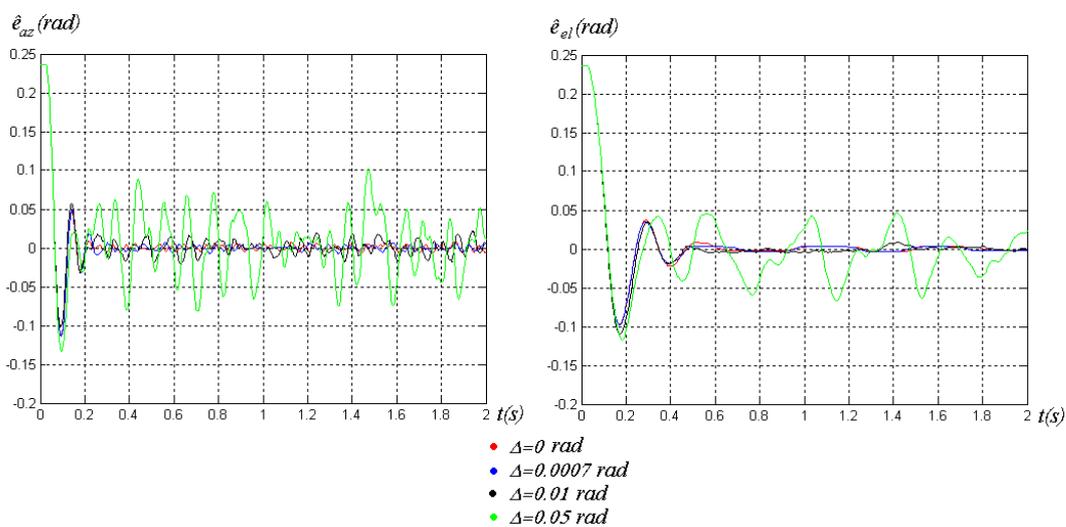


Figura 4.32 - Simulação 31: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Observa-se pelos resultados da Fig. 4.32 que esta arquitetura de controle é mais sensível a grandes erros de medição no sensor de visão (curva verde). Este fato pode ser explicado pela utilização de malhas internas mais velozes que a externa. Com isso os controladores levam o sistema mais rapidamente para o ponto calculado pela malha externa, ponto este que, devido ao erro de medição do sensor de visão, não corresponde à localização real do alvo no plano paralelo à x_2 - z_2 (Fig. 3.1).

4.4.4.3. Arquitetura de controle do tipo 3

Agora, além dos erros de medição no sensor de visão também ocorrem erros de medição nos girômetros. As influências destes erros serão analisadas em simulações diferentes.

4.4.4.3.1. Erro de medição apenas no sensor de visão

a) Simulação 32

Considerando as mesmas incertezas das simulações anteriores, obtêm-se os resultados apresentados na Fig. 4.33.

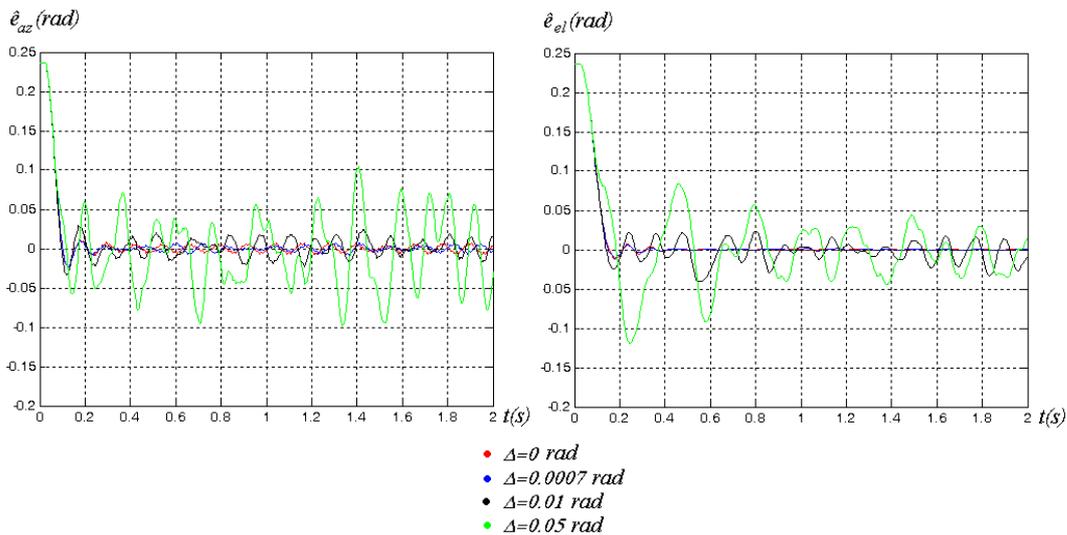


Figura 4.33 - Simulação 32: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

De forma similar ao controle do tipo 2, observa-se pelos resultados da Fig. 4.33 que esta arquitetura de controle é mais sensível a grandes erros de medição no sensor de visão (curva verde).

4.4.4.3.2. Erro de medição apenas nos girômetros

a) Simulação 33

Os resultados obtidos encontram-se na Fig. 4.34, onde as curvas em vermelho são referentes à simulação considerando girômetros ideais ($\Delta=0$), as curvas em azul são referentes à simulação considerando $\Delta=0.05 \text{ rad/s}$, as curvas em preto são referentes à simulação considerando $\Delta=0.1 \text{ rad/s}$ e as curvas em verde são referentes à simulação considerando $\Delta=0.5 \text{ rad}$ (valor exageradamente alto).

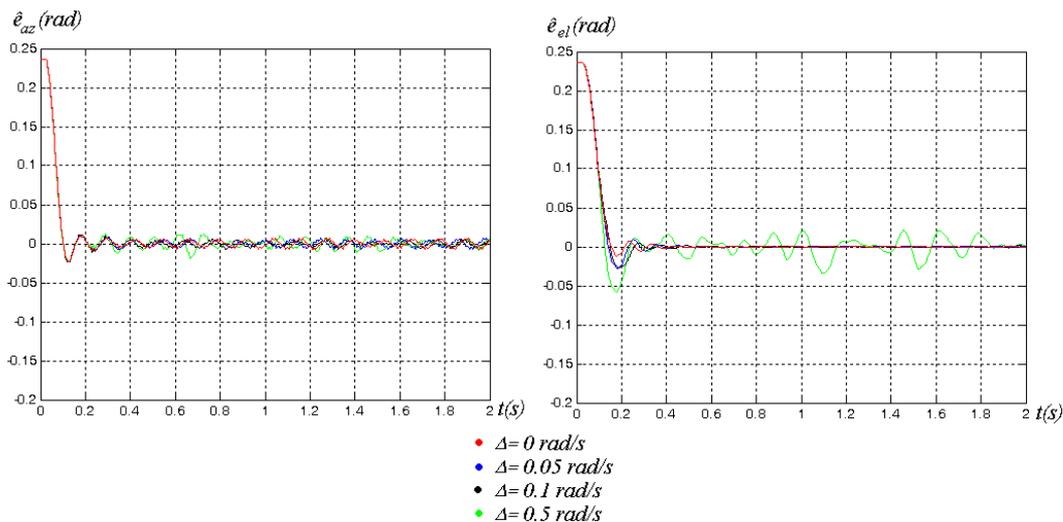


Figura 4.34 - Simulação 33: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Pelos resultados apresentados na Fig. 4.34, observa-se que os erros de medição dos girômetros só alteram o desempenho do sistema de forma significativa se forem muito grandes (curvas verdes).

4.4.4.4. Comparação entre os controladores

a) Simulações 34, 35 e 36

Por último, serão apresentados na Fig. 4.35 os resultados obtidos com as três arquiteturas de controle na situação 3 e os seguintes parâmetros:

i) folgas: $\eta_1 = \eta_2 = 0.001$ rad;

ii) atraso de tempo para atualização das tensões no controle tipo 1:
 $\Delta t = 0,02$ s;

iii) atraso de tempo das malhas externas nos controles tipo 2 e tipo 3:
 $\Delta t_1 = 0,02$ s;

iv) atraso de tempo para atualização das tensões nos controles tipo 2 e tipo 3:
 $\Delta t_2 = 0,002$ s;

iv) incerteza de medição no sensor de visão: $\Delta = 0.0007$ rad;

v) incerteza de medição nos girômetros: $\Delta = 0.1$ rad/s;

Os ganhos dos controladores são aqueles utilizados nas simulações anteriores para o sistema com os parâmetros acima.

As curvas em vermelho correspondem ao sistema com a arquitetura de controle do tipo 1 (simulação 34), as curvas em azul com o tipo 2 (simulação 35) e as curvas em preto com o tipo 3 (simulação 36).

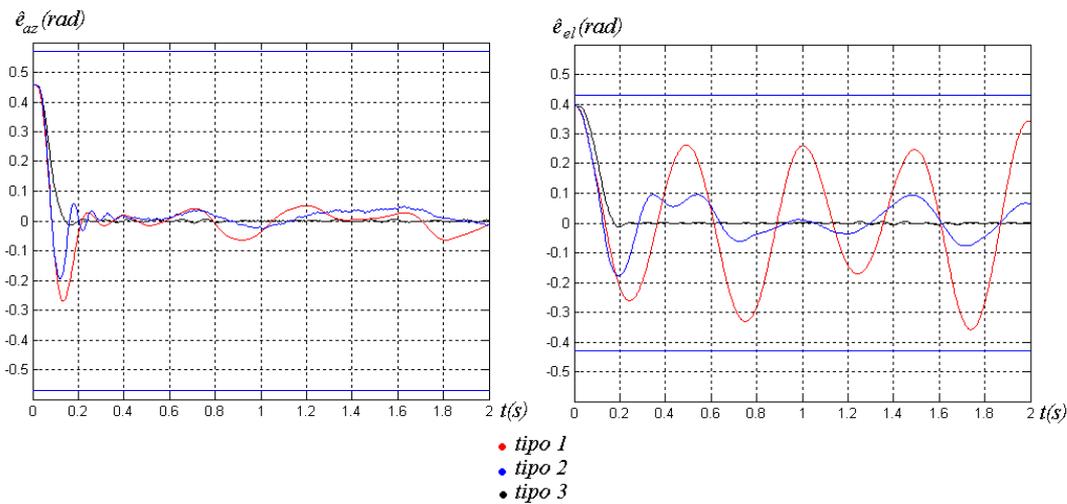


Figura 4.35 – Simulações 34, 35 e 36: Erros angulares de azimute e elevação em função do tempo.

Pelos resultados da Fig. 4.35 percebe-se que com o controle do tipo 3 ocorre uma melhora significativa no desempenho do sistema.

4.5. Análise de resultados

Neste capítulo foram apresentadas simulações com o modelo numérico do sistema de acompanhamento de alvos, em quatro diferentes situações:

- i) Situação 1: Corpo 0 e alvos fixos.
- ii) Situação 2: Corpo 0 fixo e alvo movendo-se.
- iii) Situação 3: Corpo 0 movendo-se e alvo fixo.
- iv) Situação 4: Corpo 0 e alvo movendo-se.

Em cada uma destas situações foram utilizadas as três arquiteturas de controle apresentadas no capítulo 3 e variou-se alguns parâmetros do sistema como o tamanho das folgas nos redutores e os atrasos de tempo nas malhas dos controladores. Os demais parâmetros permaneceram iguais e foram utilizados valores similares aos da bancada de testes. Os ganhos dos controladores PID empregados nas diferentes arquiteturas de controle foram reajustados cada vez que ocorria uma variação nos parâmetros. Pelos resultados das simulações

observou-se que o aumento das folgas nos redutores e o aumento do atraso de tempo nas malhas de controle prejudicam o desempenho do sistema. Na arquitetura de controle do tipo 3 não se conseguiu nem ajustar os ganhos do controlador pelo método de Ziegler-Nichols quando os redutores possuíam folgas e atrasos de tempo grandes. Assim, para esta arquitetura só foram apresentadas simulações com folgas totais de 0,002 rad e atrasos de tempo Δt_1 e Δt_2 iguais, respectivamente, a 0,02 e 0,002 segundos. Os erros aleatórios de medição no sensor de visão e girômetros causaram uma piora significativa no desempenho do sistema apenas quando se considerou sensores exageradamente imprecisos.

A arquitetura de controle do tipo 1 mostrou-se pouco adequada para a situação 3, e, na situação 4 não foi capaz de manter o alvo dentro do campo de visão do sensor. A arquitetura de controle do tipo 2 não foi capaz de manter o alvo dentro do campo de visão do sensor na situação 4. A arquitetura de controle do tipo 3 apresentou desempenho satisfatório em todas as situações. O desempenho superior desta arquitetura de controle pôde ainda ser constatado no teste comparativo entre as três arquiteturas, Fig. 4.35. Apesar da arquitetura de controle do tipo 3 ter apresentado um desempenho superior do que a do tipo 2 e esta um desempenho superior do que a do tipo 1, deve-se ressaltar que a do tipo 1 é a de menor custo pois utiliza menos sensores. A arquitetura de controle do tipo 3 é a de maior custo, pois além de um sensor de visão e um sensor para medir o ângulo β (encoder), requer o uso de dois girômetros e um “hardware” que permita uma malha interna veloz.