



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.31.12.10-RPQ

MODELO DE DINÂMICA EM VOO E CONTROLE DE BALÃO AUTÔNOMO

Viktor Koldaev

Nota Técnico-Científica (NTC) Desenvolvimento de modelo para cálculo da dinâmica em voo de balão. Apresentação dos resultados de simulações e ensaio do modelo com aquisição de dados pelo GPS.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P2ELN8>>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID) **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/05.31.12.10-RPQ

MODELO DE DINÂMICA EM VOO E CONTROLE DE BALÃO AUTÔNOMO

Viktor Koldaev

Nota Técnico-Científica (NTC) Desenvolvimento de modelo para cálculo da dinâmica em voo de balão. Apresentação dos resultados de simulações e ensaio do modelo com aquisição de dados pelo GPS.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P2ELN8>>

INPE
São José dos Campos
2017



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

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pelo suporte oferecido para a realização deste trabalho durante execução do plano da bolsa pelo processo individual 312736/2015-0. Agradeço especialmente aos representantes do LIT e colaboradores do Setor de Lançamento de Balões da CEA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): José Oscar Fernandes (supervisor da bolsa), Nilton Benedito Renó (técnico em balões), Benedito Aparecido das Neves (técnico mecânico), Luiz Carlos de Almeida (técnico eletrônico), Eduardo Piacsek Barbosa Franco (técnico eletrônico) que participaram deste trabalho de especificação e de testes dos sistemas desenvolvidos.

RESUMO

Neste relatório é apresentado o desenvolvimento de um modelo para cálculo da dinâmica em voo e para controle de trajetória de balão autônomo. São incluídos resultados de simulações e ensaio no solo do modelo com aquisição de dados pelo GPS. O trabalho realizado pelo bolsista Viktor Koldaev (bolsa PSI-DA, processos individuais 302582/2014-2 e 312736/2015-0) no período de 30/06/15 até 31/05/17.

Palavras-chave: Balão autônomo Dinâmica em voo. Controle trajetória.

ABSTRACT

In present note the development model for calculation of flight dynamics and trajectory control of autonomic balloon are presented. The results of simulation and ground test with data acquisition by GPS are included. This work is produced by Viktor Koldaev (PSI-DA, personal process s 302582/2014-2 e 312736/2015-0) during period of 30/06/15 -31/05/17.

Keywords: Autonomic balloon. Flight dynamics. Trajectory control.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema de cálculo da projeção do vento para direção pretendida.
- Figura 2. Trajetória no plano horizontal durante subida e durante descida.
- Figura 3. Esquema de cálculo do tempo t_c de voo na altura de retorno.
- Figura 4. Densidade do ar vs altitude.
- Figura 5. Pressão do ar vs altitude.
- Figura 6. Temperatura do ar e do gás durante subida e descida vs altitude.
- Figura 7. Trajetória calculada de subida do balão em plano horizontal.
- Figura 8. Projeção do vento vs altitude para direção pretendida.
- Figura 9. Conexão do termômetro DHT11 com placa Arduino.
- Figura 10. Conexão do Micro Servo HK 151178 e EC Power SG90.
- Figura 11. Esquema do sistema de controle com placa de Arduino do balão.
- Figura 12. Trajetória no plano pelos dados do GPS.
- Figura 13. Direção de vento durante subida e descida.
- Figura 14. Projeção do vento na direção para ponto de aterrissagem.
- Figura 15. Perfil vertical durante voo.

SUMARIO

	<u>Pag.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	7
2 CONTROLE DA TRAJETÓRIA DO BALÃO.....	9
3 CALCULO DA DINÂMICA EM VOO DO BALÃO.....	14
4 SIMULAÇÃO DUM CONTROLE EM VOO DO BALÃO.....	17
5 TESTE DA PLACA DE CONTROLE EM SOLO COM AQUISIÇÃO DA TRAJETÓRIA COM GPS.....	25
6 CONCLUSÕES GERAIS.....	27
REFERENCIAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

O Setor de Lançamento de Balões do INPE é responsável pelo lançamento de balões estratosféricos durante missões científicas e pela recuperação dos experimentos. No plano de trabalho proposto para o bolsista Viktor Koldaev (bolsa PSI-DA, processos individuais 302582/2014-2 e 312736/2015-0) no período de 30/06/15 até 31/05/17 foi programado o estudo de dinâmica em voo de balões.

Presente trabalho inclui estudos da dinâmica de voo do balão com objetivo de calcular parâmetros da trajetória do balão pelo Processo 312736/2015-0 e programar um controle de altitude durante voo.

1.1 MODELAGEM.

Dinâmica em voo.

O equilíbrio das forças durante subida com velocidade estabelecida do balão de acordo com referencia /1/ é dado por::

$$\rho_a v_z^2 C_D A_b/2 = \mathbf{g}(\rho_a V_b - m_G - m_g) \quad (1)$$

Adotando uma forma esférica do balão, a área do corte horizontal dele será,

$$A_b = \pi R_b^2, \text{ onde raio do balão é: } R_b = (3 V_b / 4\pi)^{1/3}. \quad (2)$$

Usando expressão para constante de gás R

$$R = \rho_a M_a / (T_a \rho_a) = \rho_g M_g / (T_g \rho_g) \quad (3)$$

nas condições do balão de “pressão zero” temos

$$\rho_a = \rho_g \quad (4)$$

$$\rho_g = m_g / V_b = \rho_a M_g T_a / (M_a T_g) \quad (5)$$

$$V_b = m_g M_a T_g / (M_g T_a \rho_a) \quad (6)$$

Substituindo $M_a / M_g = M$ e $T_g / T_a = T$ (7)

$$2 g / (\rho_a C_D A_b) = K \quad (8)$$

temos velocidade de subida:

$$v_z^2 = K (m_g (M T - 1) - m_G) \quad (9)$$

e duração de subida Δt na faixa de altura z_1 a z_2 :

$$\Delta t = (z_2 - z_1) / v_z \quad (10)$$

Força adimensional de subida no solo f_o de acordo com /1/ é dada por

$$f_o (m_G + m_g) = \rho_a V_b - m_G - m_g \quad (11)$$

Quando no solo $T_g = T_a$

usando (4) e (11) podemos estimar massa inicial do gás necessário como:

$$m_{g0} = m_G (1 + f_o) / M \quad (12).$$

Termodinâmica do gás em balão

Temperatura do gás muda durante voo devido fluxo de calor e pela expansão (compressão) do gás:

$$m_g C_{pg} \Delta T_g / \Delta t = q_g + V_b dp_g / dt \quad (13)$$

quando $dp_g = - \rho_a g dz$ (14)

usando (4) e (7) temos

$$m_g C_{pg} \Delta T_g / \Delta t = q_g - g m_g \rho_a T M dz / dt \quad (15)$$

$$dz/dt = v_z \quad (16)$$

Fluxo de calor inclui convecção e radiação, expressado pela equação simplificada da referencia /1/:

$$q_g = k_c (T_a - T_g) + k_r ((T_a^4 - T_g^4)) \quad (17)$$

onde coeficientes k_c e k_r dependem do material e área efetiva do balão, condições da atmosfera, iluminação, hora e etc.

Adotando valores empíricos dos k_c e k_r podemos estimar mudança da temperatura do gás durante voo como:

$$\Delta T_g = ((k_c (T_a - T_g) + k_r ((T_a^4 - T_g^4))) / m_g - g \rho_a T M v_z) \Delta t / C_{pg} \quad (18)$$

2 CONTROLE DA TRAJETÓRIA DO BALÃO

Algoritmo de controle da trajetória do balão é baseado nas seguintes fases:

1. Atualizar componentes do vento w_x e w_y em função da altura z durante voo utilizando dados do GPS do bordo.
2. Escolher direção pretendida em plano como linha dento ponto de aterrisagem (ou ponto de lançamento (0;0) como objetivo) e o ponto atual $d(x;y)$.
3. Determinar projeção $p(z)$ do vento vs altura para direção pretendida, Figura 1.

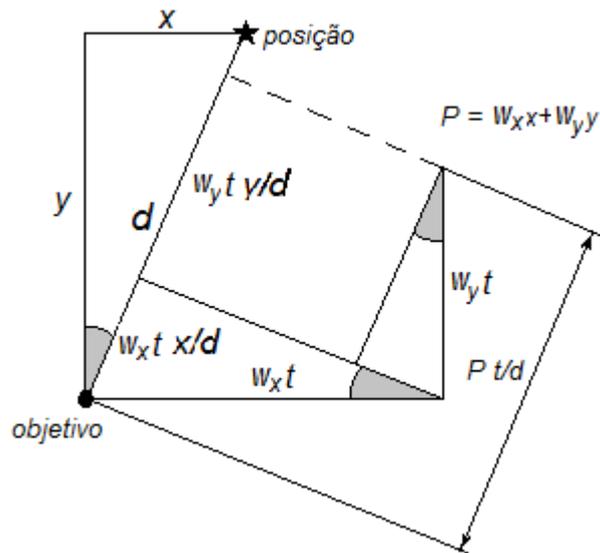


Figura 1. Esquema de cálculo da projeção P do vento $(w_x; w_y)$ para direção pretendida $d(x;y)$.

É importante anotar que valor e sinal do $P(z)$ dependem dos valores dos parâmetros w_x , w_y , x e y :

$$P t / d = t w_x x / d + t w_y y / d \quad (19)$$

onde

$$P = x w_x + y w_y \quad (20)$$

4. Determinar dois mínimos extremos negativos da função $P(z)$ para adotar correspondentes valores z como a altura de retorno z_r e a altura de aproximação z_c
5. Determinar massa de gás m_{gc} e m_{gr} para garantir uma velocidade de descida pretendida de descida v_{zp} e calcular tempos de válvula aberta t_{vc} e t_{vr} para reduzir massa de gás até valores correspondentes:

$$m_{gr} = m_G - (\rho_{ar} v_{zp}^2 C_D A_{br} / 2 g) / (MT_r - 1) \quad (21)$$

$$m_{gc} = (m_G - \rho_{ac} v_{zp}^2 C_D A_{bc} / 2 g) / (MT_c - 1) \quad (22)$$

$$t_{vr} = (m_{go} - m_{gr})/k_v \quad (23)$$

$$t_{vc} = (m_{gr} - m_{gc})/k_v \quad (24)$$

6. Calcular coordenadas x_r e y_r no final da trajetória de descida, do z_{max} ate altura z_r com a massa de gás m_{gr} ilustradas na Figura 2

$$x_r = x + \Delta t \sum_{z_{max}}^{z_c} w_x(z) \quad (25)$$

$$y_r = y + \Delta t \sum_{z_{max}}^{z_c} w_y(z) \quad (26)$$

$$\Delta t = (z_2 - z_1) / v_{zp} \quad (27)$$

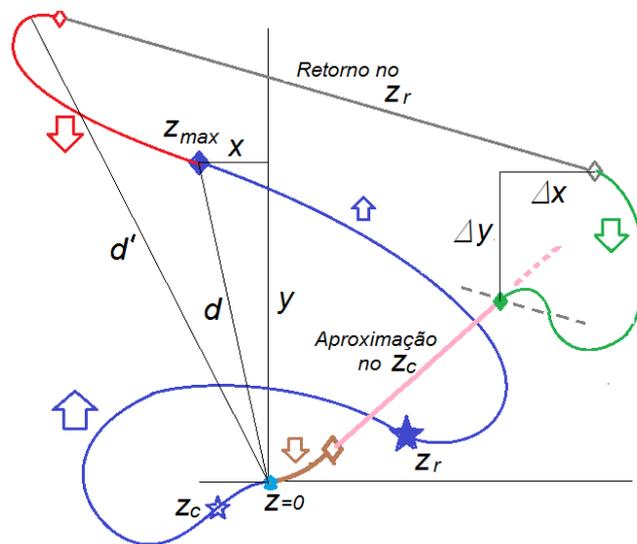


Figura 2. Trajetória no plano horizontal durante subida (curva azul) e durante descida ate altura de retorno (curva vermelha), ate altura de aproximação (curva verde) e durante aterrissagem (curva marrom).

7. Calcular deslocamento Δx e Δy no plano durante voo de altura z_r ate altura z_c com massa de gás m_{gc}

$$\Delta x = \Delta t \sum_{z_r}^{z_c} w_x(z) \quad (28)$$

$$\Delta y = \Delta t \sum_{z_r}^{z_c} w_y(z) \quad (29)$$

8. Determinar coordenadas x_c e y_c no calculo reverso partindo no ponto $(x_o; y_o; z_o)$ no solo ate do inicio da trajetória de aterrissagem na altura z_c

$$x_r = \Delta t \sum_{z_o}^{z_c} w_x(z) \quad (30)$$

$$y_r = \Delta t \sum_{z_o}^{z_c} w_y(z) \quad (31)$$

9. Calcular tempo t_c de voo na altura z_c e tempo t_r de voo na altura z_r , Figura 7.

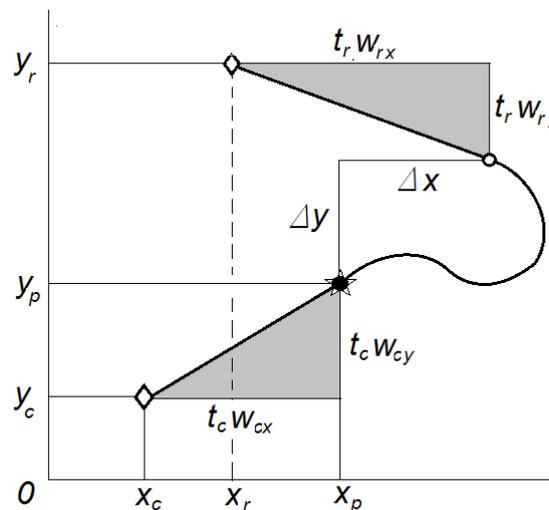


Figura 3. Esquema de cálculo do tempo t_c de voo na altura z_c e do tempo t_r de voo na altitude z_r

As coordenadas x_p e y_p são determinadas como final da trajetória na altura z_c deslocadas para valores Δx e Δy :

$$x_p = x_r + t_r w_{rx} - \Delta x \quad (32)$$

$$y_p = y_r + t_r w_{ry} - \Delta y \quad (33)$$

Por outro lado as coordenadas da ponta (x_p ; y_p) podem ser determinadas como início da aterrissagem na altura z_r

$$x_p = x_c + t_c w_{cx} \quad (34)$$

$$y_p = y_c + t_c w_{cy} \quad (35)$$

Resolvendo sistema de equações (32-35) tem valor t_c

$$t_c = ((y_c - y_r + \Delta y) w_{rx} - (x_c - x_r + \Delta x) w_{ry}) / (w_{cx} w_{ry} - w_{cy} w_{rx}) \quad (36)$$

Usando (34) e (35) tem x_p e y_p e usando (32) e (33) tem

$$t_r = (x_c - x_r + \Delta x + t_c w_{cx}) / w_{rx} \quad (37)$$

Durante descida o controle de voo inclui seguintes passos:

1. Na descida, antes de chegar até altura preliminar z_r recalcular valores z_r e para $d'(x;y)$ atualizado.
2. Durante voo na altura z_r calcular altura ótima z_c para aproximação com ponto de aterrissagem como itens 2-4.
3. Para equilibrar voo nas alturas z_r e z_c calcular o tempo de soltar lastro t_{lr} e t_{lc} .
4. No caso necessário de subir durante controle de voo nas alturas z_r e z_c calcular o tempo de aquecedor ligado t_{aq} para aquecer gás.

3 CALCULO DA DINÂMICA EM VOO DO BALÃO

Dados iniciais.

O sistema de voo utilizado nas operações do INPE inclui um balão com gás leve de pressão zero e uma gondola com o sistema de ligação com interfaces, apresentadas em referencia /2/.

Considerou-se a estimativa inicial de massa total do conjunto de voo com balão de 1500 kg (para experimento protoMIRAX como exemplo) é com a gôndola de 500 kg, descrita em referencia /3/.

Para estudos preliminares foram adotados seguintes dados iniciais:

- | | | |
|---|------------|------------------------|
| 1. Massa total do conjunto de voo com balão | m_G | 1500 kg |
| 2. Volume máximo do balão | V_{bmax} | 450352 m ³ |
| 3. Coeficiente de arrasto aerodinâmico do balão | C_D | 0,3 |
| 4. Força adimensional de subida no solo | f_o | 0,12 |
| 5. Massa molecular do gás | hidrogênio | M_g 2 g/mol |
| | hélio | M_g 4 g/mol |
| | ar | M_a 29 g/mol |
| 6. Calor especifico do gás | hidrogênio | C_{pg} 14236J/kg °K |
| | hélio | C_{pg} 5193 J/kg °K. |

7. Características da atmosfera:

Faixa de altitude, km	0-11	11-20	20-50
$\log = d\rho_a / dz, 1/m$	-0,1035	-0,11	-0,12 a -0,17
$k_t = dT_a/dz, ^\circ K/m$	-6,6	0	1,3

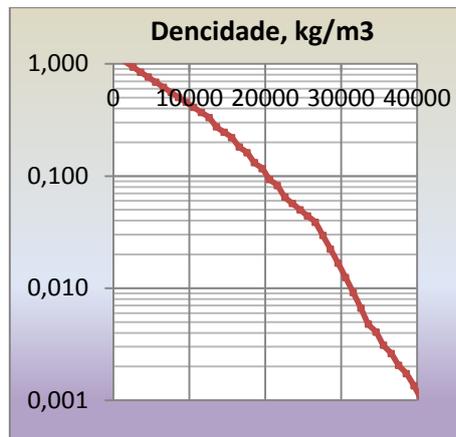


Figura 4. Densidade do ar vs altitude z.

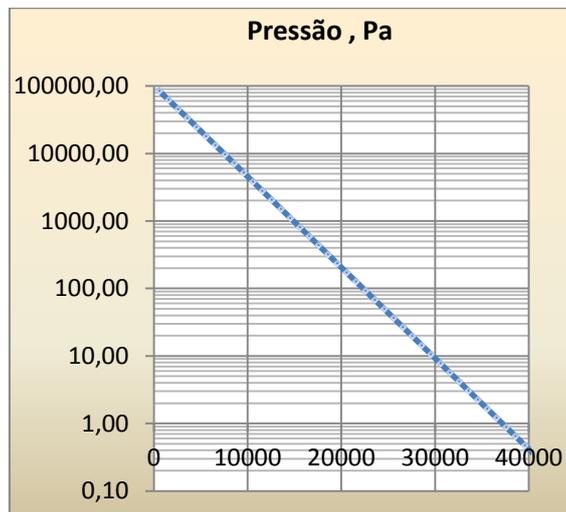


Figura 5. Pressão do ar vs altitude z.

Para valores dados em referencia /3/ $m_G = 1500\text{kg}$, $f_o = 0,12$ e $M = 14,5$ temos valo da massa inicial do gás é $m_{g0} = 1500 (1+0,12) / 14,5 = 116 \text{ kg}$.

1. Em Figura 6 esta apresentada temperatura do ar T_a em atmosfera padrão vs altura e um exemplo das temperaturas do gás durante subida $T_{g\ sub}$ e descida $T_{g\ des}$ do balão.

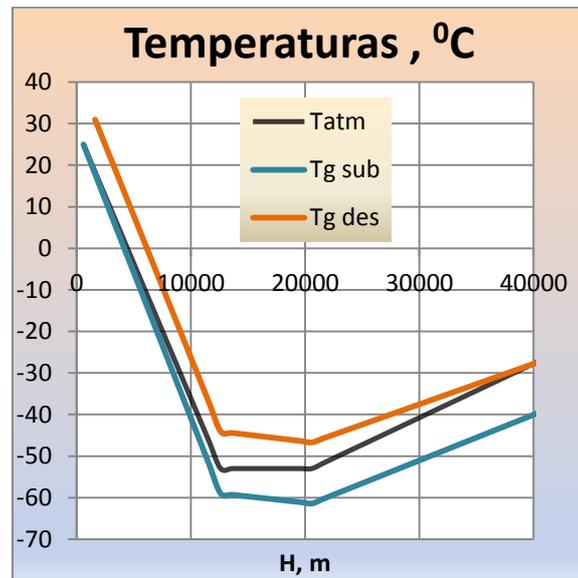


Figura 6. Temperatura do ar e do gás durante subida e descida vs altitude.

Um resultado de cálculo da trajetória no plano horizontal durante subida é apresentada em Figura 7.

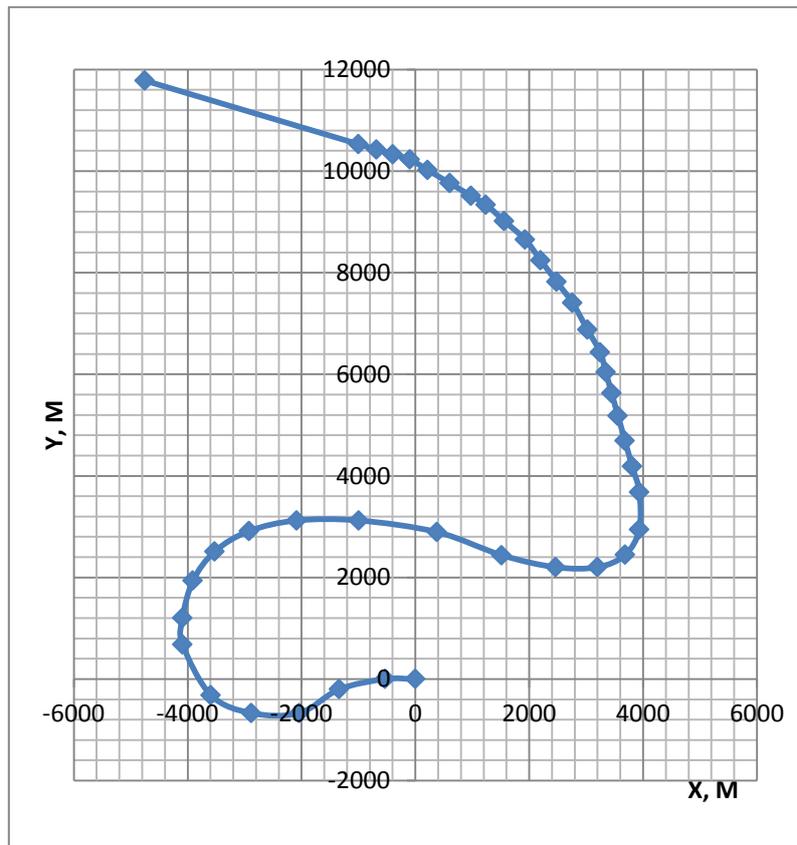


Figura 7. Trajetória calculada de subida do balão apresentada em plano horizontal.

4 SIMULAÇÃO DUM CONTROLE EM VOO DO BALÃO

Cálculo da projeção do vento para controle do balão

Para um previsão de vento adotado a projeção do vento $P(z)$ vs altitude z esta ilustrada em Figura 8.

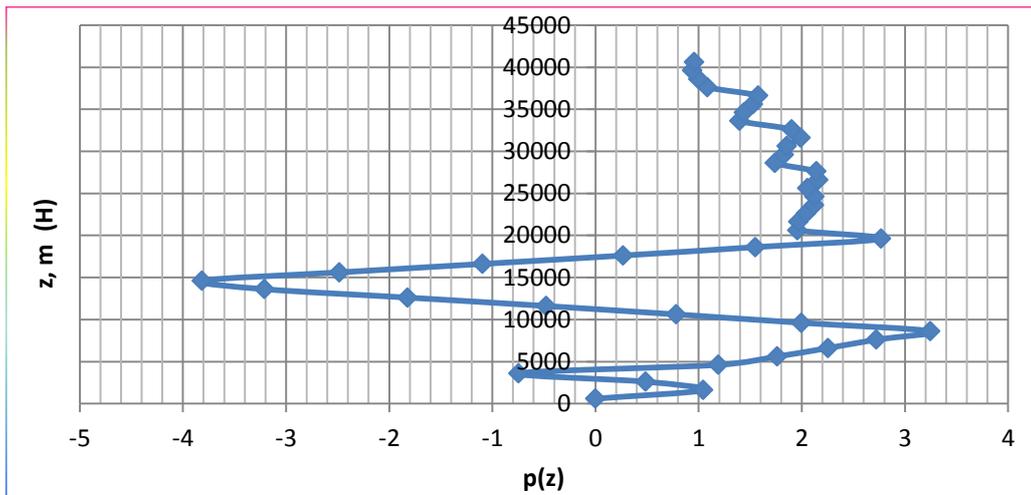


Figura 8. Projeção P(z) do vento vs altitude z para direção pretendida.

Um extremo mínimo da função P(z) da Figura 5 na altura $z_r = 14$ km pode ser escolhido para voo do retorno. Outro extremo mínimo está na altitude de $z_c = 3,5$ km que serve para aproximação á ponto de aterrissagem.

Funções da placa de controle durante voo:

1. Memoriza dados:
 - a) do GPS (ISM300F2) – latitude, longitude, altitude, tempo e data;
 - b) da bussola (HMC5883L) – ângulos verticais A_x , A_y e A_z (do Norte em plano)
 - c) dos termômetros - temperaturas e umidades do ambiente e do gás
 - d) do sensor de aproximação –altitude Z quando $Z < 5m$.

2. Durante todo voo calcula e grava:
 - a) Coordenadas a partir da ponta de lançamento – x, y, z e distancia $d = (x^2 + y^2)^{1/2}$
 - b) Componentes do vento $W_x = dx/dt$; $W_y = dy/dt$ e $W_z = dz/dt - (dz/dt)_{media}$

- c) Curva simulada $P(z) = x W_x + y W_y$ para descida com $dz/dt = 2$ m/s da ponta x, y, z ate ponta de lançamento
- d) Dois extremos negativos e altitudes correspondentes de retorno Z_r e Z_c
- e) Tempos T_r e T_c de voo nas altitudes Z_r e Z_c que garante o retorno
- f) Inicia a descida quando T_r, T_c, Z_r e Z_c são positivos.

3. Durante descida liga motor de força Ad e servo motores Sg (válvula de gás), Sl (válvula de lastro), Sx, Sy e Sz (para orientação em volta dos eixos X, Y e Z):

- a) Liga Sg ate garantir $dz/dt = 2$ m/s ate $z = Z_r$
- b) Liga motor Ad com orientação $A_x = -90^\circ$ se em 20s não atinge $dz/dt = 2$ m/s;
- c) Liga Sl ate garantir $z = Z_r$ com $dz/dt \approx 0$ durante T_r
- d) Liga Sg ate garantir $dz/dt = 2$ m/s ate $z = Z_c$
- e) Liga Sl ate garantir Z_r com $dz/dt \approx 0$ durante T_c
- f) Liga Sg ate garantir $dz/dt = 2$ m/s ate $d < 300$ m
- g) Liga Sx e Sy ate garantir $A_x \approx 0, A_y \approx 0$ e liga Sz ate $A_z \approx \arctg(x/y)$
- h) Liga motor Ad quando $A_x \approx 0, A_y \approx 0$ e $A_z \approx \arctg(x/y)$ ate $d < 10$ m
- i) Liga Sx para aumentar A_x ate $10-30^\circ$ quando $Z < 4$ m ate $dz/dt = 0$ para $Z = 3$ m;
- j) Liga Sx para reduzir A_x com $A_y \approx 0$ e Sz ate $A_z \approx \arctg(x/y)$ quando $d < 10$ m ate $Z = 0$ m.

Sequencia para programação da placa de controle:

Gravar dados iniciais:

Vazão da válvula de gás	k_v	0,1 kg/s
Vazão do registro de lastro	k_l	0,5 kg/s .

Parâmetros da atmosfera:

Faixa altitude, km	0-11	11-20	20-50	Obs.
$\log = d\rho_a/dz, 1/\text{km}$	0,1035	-0,11 a -0,126	-0,126 a -0,17	Padrão USSR
$k_t = dT_a/dz, ^\circ\text{K}/\text{km}$	-6,6	0	1,3	

1. Durante voo nos instantes de limite das faixas de altura (z_i) registrar tempo Δt e coordenadas x, y pelo GPS.

- | | |
|---|---|
| 2. Densidade da atmosfera | $\rho_a = \rho_o e^{(\log(z+z_o))};$ |
| 3. Temperatura da atmosfera, $^\circ\text{K}$ | $T_{azi+1} = T_{azi} + k_t (z_i+z_o)$ |
| 4. Temperatura inicial do gás, $^\circ\text{K}$ | $T_{gzo} = T_{azo}$ |
| 5. Relações | $M = M_a / M_g e T = T_g / T_a, T_o = 1$ |
| 6. Massa inicial do gás | $m_{go} = m_G (1+f_o) / M$ |
| 7. Volume do balão | $V_b = m_g M T / \rho_a < V_{bmax}$ |
| 8. Raio do balão | $R_b = (3 V_b / 4\pi)^{1/3}$ |
| 9. Área de corte horizontal do balão | $A_b = \pi R_b^2$ |
| 10. Superfície do balão | $S_b = 4\pi (3 V_{bmax} / 4\pi)^{2/3}$ |
| 11. Coeficiente aerodinâmico | $K(z) = (\rho_a C_D A_b) / 2g$ |
| 12. Velocidade relativa | $v_z = ((m_g (MT-1) - m_G) / K(z))^{1/2}$ |
| 13. Temperatura do gás | $T_{gzi+1} = T_{gz} + ((k_c(T_a - T_g) + \dots$
$+ (1 + \sin(\pi(t_h+9)/12)) S_b / m_g - g v_z T M) \Delta t / C_{pg}$ |
| 14. Componente vertical do vento | $w_z = (z_{i+1} - z_i) / \Delta t - v_z$ |
| 15. Componentes horizontais de vent: $w_x = (x_{i+1} - x_i) / \Delta t, w_y = (y_{i+1} - y_i) / \Delta t$ | |
| 16. Distancia no plano | $d = (x^2 + y^2)^{1/2}$ |
| 17. Projeção do vento para d fixo: | $p(z) = x w_x + y w_y$ |
- durante descida simulada para v_z possíveis.
18. A altura de retorno z_r é no extremo mínimo da função $p(z)$ e altitude de aproximação z_c é no outro extremo da $p(z)$.

19. Massa de gás para descida ate altura z_r $m_{gr} = (m_G - K_r v_{zp}^2)/(MT_r - 1)$,
 $K_r = K(z)$ e $T_r = T$ na altura z_r
e para descida ate altura z_c $m_{gc} = (m_G - K_c v_{zp}^2)/(MT_c - 1)$
20. Tempos de válvula aberta $t_{vr} = (m_{go} - m_{gr})/k_v$ e
 $t_{vc} = (m_{gr} - m_{gc})/k_v$
21. Tempo para faixa de descida $\Delta t_d = (z_{i+1} - z_i)/v_{zp}$
22. Coordenadas de inicio de retorno $x_r = x + \Delta t_d \sum_{z_{max}}^{z_c} w_x(z)$ e
 $y_r = y + \Delta t_d \sum_{z_{max}}^{z_c} w_y(z)$
23. Deslocamento $\Delta x = \Delta t_d \sum_{z_r}^{z_c} w_x(z)$ e $\Delta y = \Delta t_d \sum_{z_r}^{z_c} w_y(z)$
24. Coordenadas de inicio de aterrisagem $x_r = \Delta t_d \sum_{z_0}^{z_c} w_x(z)$ e
 $y_r = \Delta t_d \sum_{z_0}^{z_c} w_y(z)$
25. Tempo de voo de aproximação na altura z_c $t_c = ((y_c - y_r + \Delta y) w_{rx} -$
 $-(x_c - x_r + \Delta x) w_{ry}) / (w_{cx} w_{ry} - w_{cy} w_{rx})$
26. Tempo de voo de retorno na altura z_r $t_r = (x_c - x_r + \Delta x + t_c w_{cx}) / w_{rx}$
27. Índice do retorno possível $I = 1$ com $t_r > 0$ e $t_c > 0$, e do impossível $I = 0$.

Funções da placa de controle (Arduino) durante voo:

Memoriza dados:

- e) do GPS (ISM300F2) – latitude, longitude, altitude, tempo e data;
 - f) da bussola (HMC5883L) – ângulos verticais A_x , A_y e A_z (do Norte em plano)
 - g) dos termômetros - temperaturas e umidades do ambiente e do gás
 - h) do sensor de aproximação –altitude Z quando $Z < 5m$.
4. Durante todo voo calcula e grava:
- g) Coordenadas a partir da ponta de lançamento – x , y , z e distancia $d = (x^2 + y^2)^{1/2}$.

Componentes do vento $W_x = dx/dt$; $W_y = dy/dt$ e $W_z = dz/dt - (dz/dt)_{media}$

- h) Calculo $P(z) = x W_x + y W_y$ para descida com $dz/dt = 2$ m/s da ponta x , y , z ate ponta de lançamento

- i) Determinação de dois extremos negativos e altitudes correspondentes de retorno Z_r e Z_c
 - j) Tempos T_r e T_c de voo nas altitudes Z_r e Z_c que garante o retorno
 - k) Inicia a descida quando T_r, T_c, Z_r e Z_c são positivos.
5. Durante descida liga motor de força Ad e servo motores Sg (válvula de gás), Sl (válvula de lastro), Sx, Sy e Sz (para orientação em volta dos eixos X, Y e Z):
- k) Liga Sg ate garantir $dz/dt = 2$ m/s ate $z = Z_r$
 - l) Liga motor Ad com orientação $A_x = -90^\circ$ se em 20s não atinge $dz/dt = 2$ m/s
 - m) Liga Sl ate garantir $z = Z_r$ com $dz/dt \approx 0$ durante T_r
 - n) Liga Sg ate garantir $dz/dt = 2$ m/s ate $z = Z_c$
 - o) Liga Sl ate garantir Z_r com $dz/dt \approx 0$ durante T_c
 - p) Liga Sg ate garantir $dz/dt = 2$ m/s ate $d < 300$ m
 - q) Liga Sx e Sy ate garantir $A_x \approx 0, A_y \approx 0$ e liga Sz ate $A_z \approx \arctg(x/y)$
 - r) Liga motor Ad quando $A_x \approx 0, A_y \approx 0$ e $A_z \approx \arctg(x/y)$ ate $d < 10$ m
 - s) Liga Sx para aumentar A_x ate $10-30^\circ$ quando $Z < 4$ m ate $dz/dt = 0$ para $Z = 3$ m
 - t) Liga Sx para reduzir A_x com $A_y \approx 0$ e Sz ate $A_z \approx \arctg(x/y)$ quando $d < 10$ m ate $Z = 0$ m.

Esquemas sugeridos para uma ligação de sensores e de GPS com placa Arduino são apresentados em Figuras 9, 10 e 11.

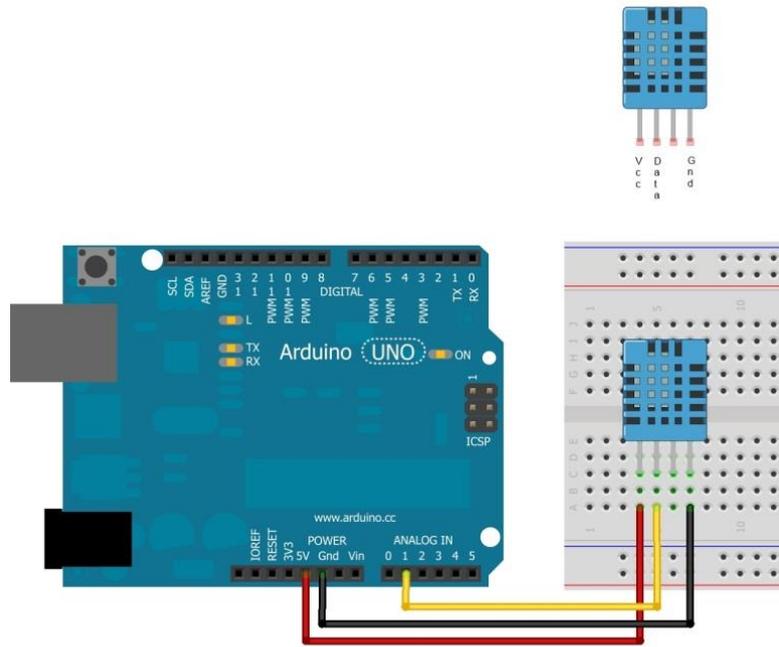


Figura 9. Conexão do termômetro DHT11 com placa Arduino.

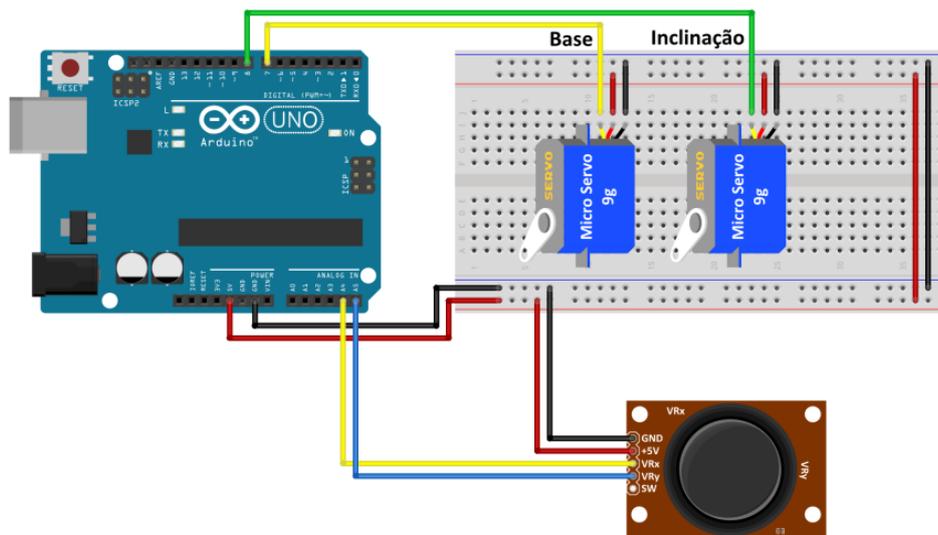
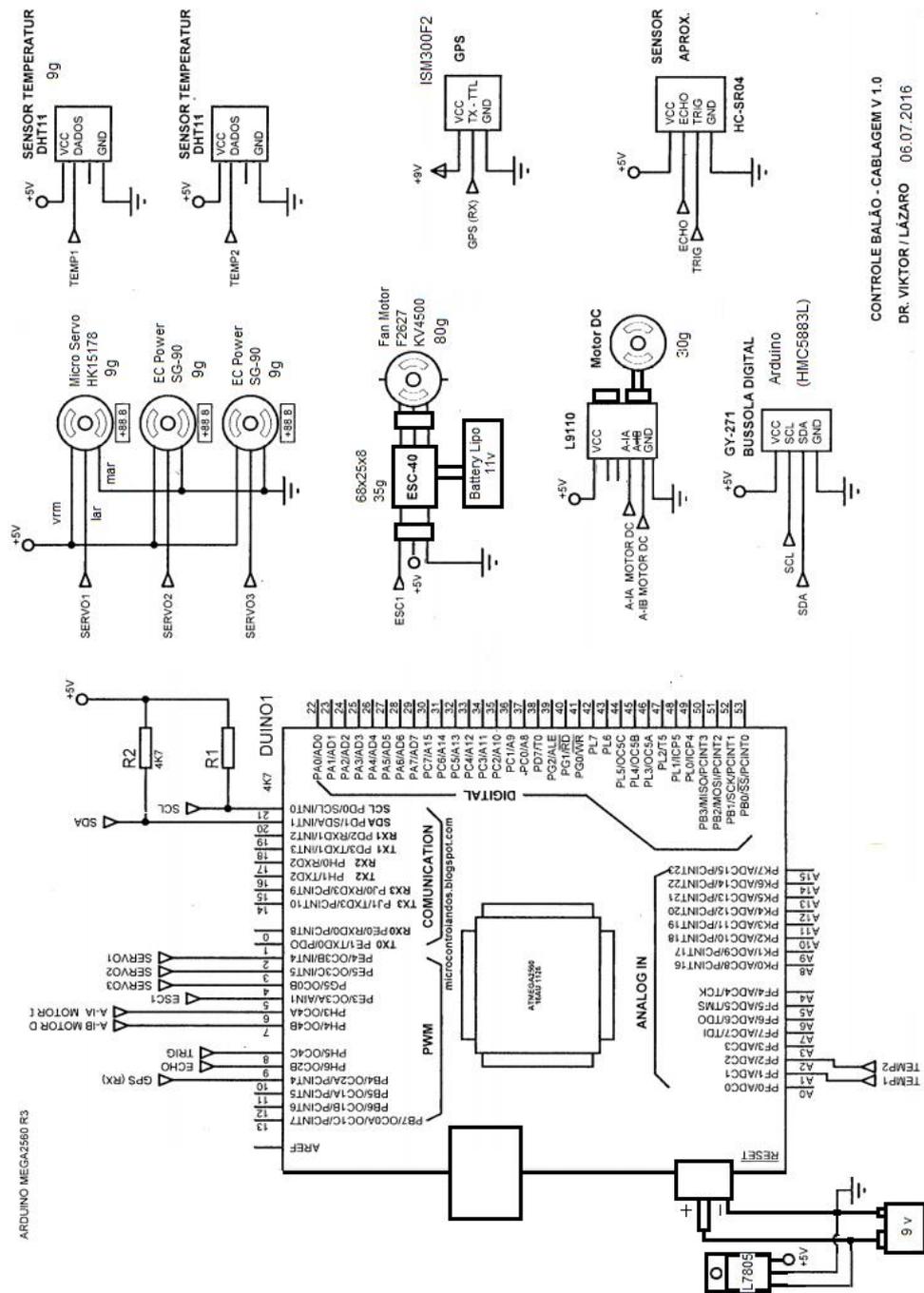


Figura 10. Conexão do Micro Servo HK 151178 , EC Power SG90.



CONTROLE BALÃO - CABLAGEM V 1.0
 DR. VIKTOR / LAZARO 06.07.2016

Figura 11. Esquema do sistema de controle com placa de Arduino do balão autônomo.

5 TESTE DA PLACA DE CONTROLE EM SOLO COM AQUISIÇÃO DA TRAJETÓRIA COM GPS

Aquisição dos dados de GPS

Resultado da aquisição dos dados de GPS ISM300F2 reduzidos com coeficientes de latitude $x = 111,4 \text{ km/grau}$ e de longitude $y=102,4 \text{ km/grau}$ é apresentado em Figura 12.

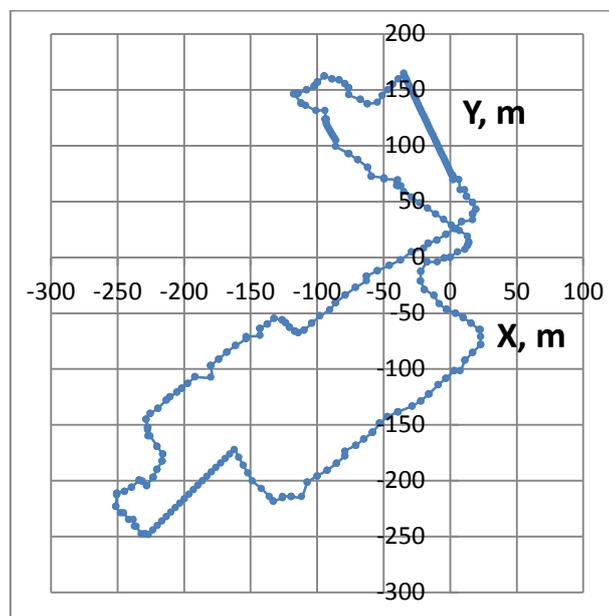


Figura 12. Trajetória no plano pelos dados do GPS.

Simulação do controle de altitude do balão

Direção do vento foi calculada pelos deslocamentos W_x e W_y da posição dos dados de GPS e é apresentado como azimute do vento em função de altitude em Figura 13.

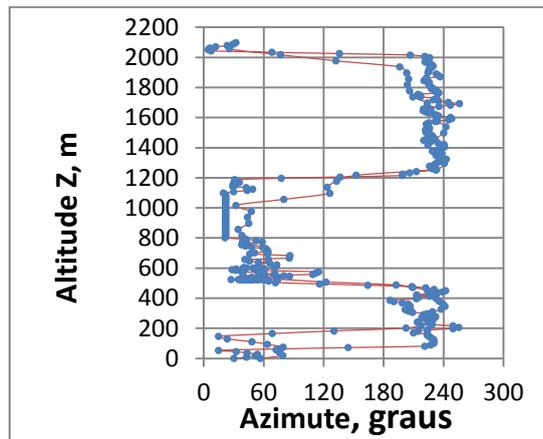


Figura 13. Direção de vento durante subida e descida.

A projeção do vento na direção para objetivo (para ponto inicial) durante descida simulada com velocidade $v_z = 20$ m/s foi calculada pelo formula $P(z) = x w_x + y w_y$ e apresentada em Figura 14. As altitudes de retorno z_r e de compensação z_c são determinados como extremos negativos da curva $P(z)$ nas altitudes $z_r = 600$ m e $z_c = 525$ m e são apresentados durante controle em Figura 12.

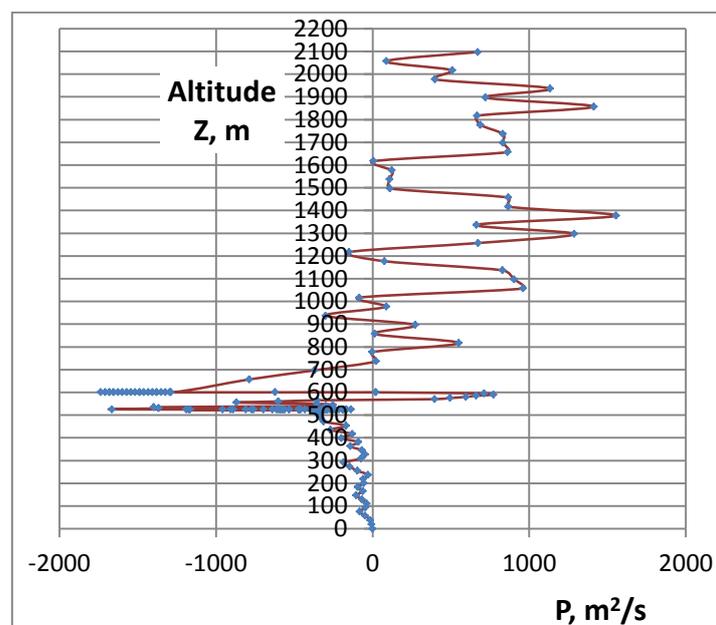


Figura 14. Projeção do vento na direção para ponto de aterrissagem.

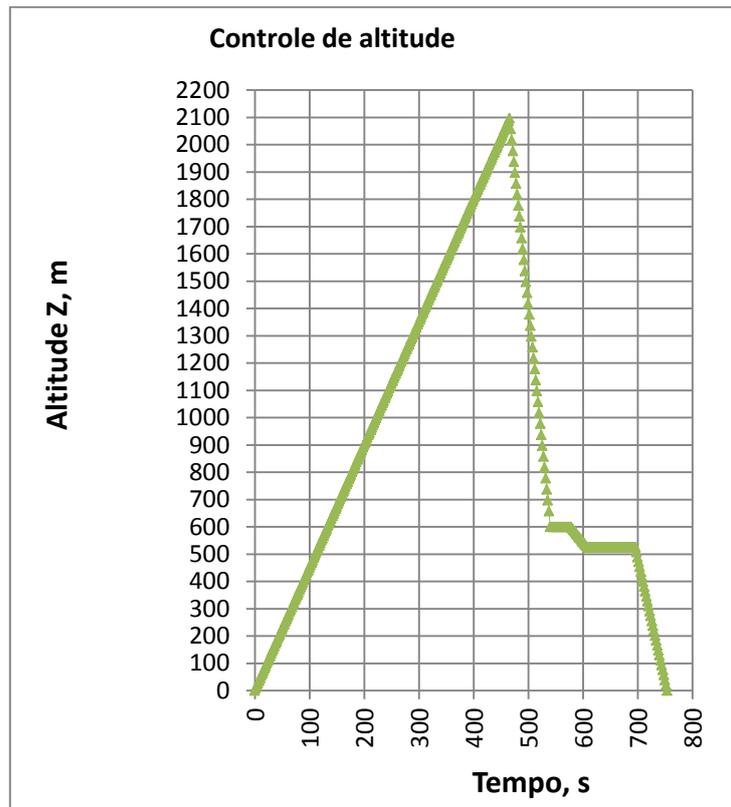


Figura 15. Perfil vertical da altitude durante voo.

6 CONCLUSÕES GERAIS

A aproximação boa da direção do vento calculado durante descida com a mesma durante subida mostra um bom controle.

Simulações da dinâmica em voo do balão conduzidas permitiram sugerir melhorias nas interfaces do sistema de voo e mostrou uma possibilidade de controle durante descida com balão de baixa altitude.

REFERENCIAS

1. Nobuyuki Yajima, Naoki Izutsu, Takeshi Imamura, Toyoo Abe. Scientific Ballooning. "Springer", Tokyo, 2009.
2. Balloon Flight Application Procedures - User handbook, OF-600-10-H ORIGINAL RELEASE, MAY 1, 2006, NASA BALLOON PROGRAM
3. KOLDAEV, V. Desenvolvimento de sistemas mecânicos para lançamento de balões estratosféricos. São José dos Campos: INPE, versão: 2017-05-24. IBI: <8JMKD3MGP3W34P/3NUC6GP>. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NUC6GP>>. Acesso em: 24 maio 2017.