

PREDIÇÃO E MELHORIA DA CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE CONTROLE DE VÔO DE UM VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO

Giovanni Fernandes Amaral, gamaral@ita.com

Cairo Lúcio Nascimento Júnior, cairo@ita.br

Geraldo José Adabo, adabo@ita.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, CEP 12228-900, São José dos Campos, SP, Brasil

Resumo. Este artigo apresenta algumas propostas para o aumento da confiabilidade do sistema de controle de vôo embarcado de um Veículo Aéreo Não-Tripulado – VANT. Com o auxílio de ferramentas para previsão e cálculo de confiabilidade de sistemas eletrônicos, foram avaliadas algumas arquiteturas. O sistema eletrônico de controle de vôo embarcado de um VANT civil de baixo custo é utilizado como base para a proposta de novas arquiteturas, visando o aumento da confiabilidade e conseqüentemente da segurança da aeronave. A comparação dos resultados de confiabilidade obtidos entre a arquitetura original e as arquiteturas propostas evidencia o aumento da confiabilidade. Conclui-se que a utilização de um sistema de rádio-controle redundante independente e a redundância dos servos-atuadores eleva a confiabilidade do sistema eletrônico de controle de vôo embarcado do VANT em estudo.

Palavras-chaves: VANT, confiabilidade, redundância, piloto automático, previsão de confiabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Um VANT é definido como uma aeronave autônoma que pode ser remotamente controlada por uma estação localizada em solo (GCS, *Ground Control Station*). O sistema de um VANT é composto basicamente por: sistema aéreo, sistema de solo e sistema de comunicação (UAS Roadmap, 2005). A Figura 1 ilustra o sistema mínimo de um VANT para aplicações civis.



Figura 1 - Sistema mínimo de um VANT para aplicações civis

O sistema aéreo é composto por: plataforma aérea e carga útil. A plataforma aérea, ou veículo aéreo não-tripulado, é responsável por transportar todos os equipamentos que compõem a carga útil, além do sistema eletrônico responsável pelo controle de vôo, ou seja, o guiamento e controle da plataforma.

O sistema de solo é composto por: estação de controle em solo e estação de aplicação dos dados, que podem ser localizadas ou não no mesmo local. A estação de controle em solo permite que o operador controle ou comande o VANT quando requerido. Já a estação de aplicação dos dados possibilita a recepção dos dados obtidos pela carga útil e sua análise.

O sistema de comunicação interliga o sistema aéreo com o sistema de solo através de *links* de rádio frequência. Por este trafegam os sinais de telecomando e telemetria, que permitem, respectivamente, enviar controles para o sistema aéreo e receber dados da plataforma aérea. (UAS Roadmap, 2005)

Quando um VANT compartilha o espaço aéreo civil, a segurança torna-se o assunto mais importante. Os níveis de segurança de aeronaves tripuladas e não tripuladas no espaço aéreo dependem de: (Goetzendorf-Grabowski, 2006)

- Regulamentos de aeronavegabilidade como p.ex. FAR (*Federal Air Regulations*) e JAR (*Joint Airworthiness Requirements*),

- Procedimentos de controle de tráfego aéreo, ainda que em muitos países, como o Brasil, os VANTs civis não sejam aceitos oficialmente,

- Confiabilidade dos sistemas embarcados no VANT e da Estação de Controle em Solo,

- Treinamentos de pessoal e procedimentos aplicados de operação e,

- Redundância nos sistemas e procedimentos.

Este artigo objetiva apresentar soluções que visam o aumento da confiabilidade dos sistemas eletrônicos de controle de vôo embarcados de um VANT, e conseqüentemente o aumento da segurança durante as missões de vôo. O sistema de propulsão, a estrutura e projeto aerodinâmico da plataforma aérea, carga útil, além dos sistemas de comunicação e de solo não serão abordados neste trabalho.

O levantamento da arquitetura do sistema eletrônico embarcado de um VANT de pequeno porte possibilita a previsão de confiabilidade dos itens envolvidos. Identificados os pontos críticos que podem levá-lo a uma condição de

risco, são propostas modificações na arquitetura do sistema eletrônico visando aumentar a confiabilidade e segurança durante uma missão de vôo. Por exemplo, a implementação de sistemas redundantes e a implementação de sistemas que possibilitem o controle remoto do VANT por um piloto em solo, quando em condição de vôo visual. Tais propostas poderão ser adotadas em diversos modelos de VANTs.

Segundo Uhlig (2006), o desenvolvimento de VANTs em ambiente universitário geralmente utiliza componentes do tipo COTS (*Commercial, off-the-shelf*) e componentes de baixo custo de aeromodelismo. A implementação de redundância de servos-atuadores e sistemas de rádio-controle redundantes são soluções que evitam uma eventual perda da aeronave e contribuem para melhorar a confiabilidade e o nível de segurança.

2. PREDIÇÃO DE CONFIABILIDADE DO VANT COM A ARQUITETURA ORIGINAL

A base para o estudo de confiabilidade de uma arquitetura de um VANT de pequeno porte será um VANT para aplicações civis desenvolvido pela empresa canadense Micropilot (<http://www.micropilot.com>). Neste, a plataforma aérea é constituída por um aeromodelo do tipo treinador com asa alta, equipado com um piloto automático, o qual é o responsável controle de vôo, ou seja, pela guiação e navegação da plataforma aérea.

O sistema eletrônico de controle de vôo embarcado é composto por:

- Módulo de piloto automático, modelo MP2028g produzido pela própria Micropilot, que integra em uma única placa todos os sensores necessários para a navegação e guiação da plataforma aérea,
- Receptor de rádio-controle, que permite o controle por um piloto em solo,
- Placa denominada *Servo-board*, responsável pela interface entre o piloto automático e os servos-atuadores.
- Bateria A, de NiCd com 6V/1500mAh, responsável pela alimentação do piloto automático, do receptor de rádio-controle e da placa *servo-board*.
- Bateria B, de NiCd com 4,8V/600mAh, responsável pela alimentação dos servos-atuadores.

O diagrama de blocos da Figura 2 exhibe os subsistemas que compõem o sistema eletrônico embarcado no VANT comercializado pela Micropilot (Micropilot, 2009).

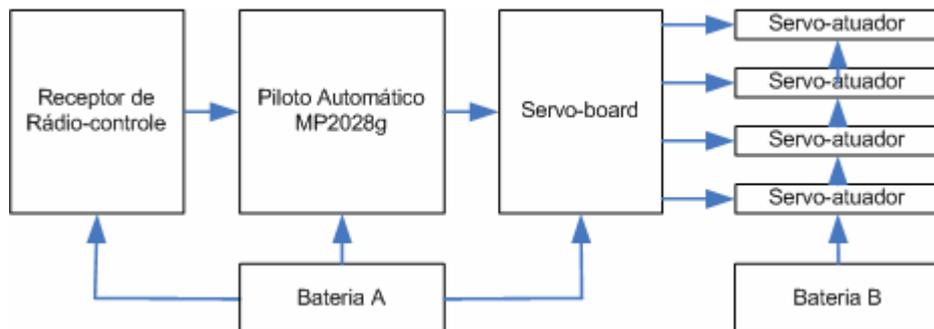


Figura 2 - Diagrama de blocos do sistema Micropilot.

A utilização de algumas ferramentas para o cálculo de confiabilidade de sistemas eletrônicos possibilita a detecção de pontos críticos, passíveis de falhas, e a predição da confiabilidade dos diversos subsistemas eletrônicos embarcados no VANT. Para a predição de confiabilidade será adotada a norma militar americana MIL-HDBK-217F, *Reliability Prediction for Electronic Systems*. Esta provê modelos de taxas de falhas para diversos tipos de componentes eletrônicos, levando em conta os fatores que afetam a confiabilidade do componente. O modelo geral da predição de taxa de falha para o método da análise de esforços é dado por (MIL-HDBK217F, 1991):

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_C \dots \quad (1)$$

onde a taxa de falha final do ítem (λ_p) é obtida a partir de uma taxa de falha básica (λ_b) para o ítem, oriunda de um banco de dados, ajustada por fatores adequados que afetam a sua confiabilidade, tais como: fator de ajuste ambiental (π_E), fator de qualidade (π_Q), fator de complexidade (π_C), dentre outros. Com o auxílio de diagramas de blocos de confiabilidade, torna-se possível o cálculo da confiabilidade do sistema eletrônico de controle de vôo embarcado no VANT em questão.

A predição de confiabilidade dos subsistemas envolvidos foi obtida segundo a norma MIL-HDBK-217F, com o auxílio do software Relex Reliability Studio 2008 (Relex, 2008).

A Tabela 1 lista os componentes integrados na placa do piloto automático Micropilot, modelo MP2028g, com as respectivas quantidades e a predição da taxa de falha. A taxa de falha encontrada para o piloto automático foi de 7,2674E-06 falhas/hora.

Tabela 1 - Predição da taxa de falha do piloto automático MP2028g Micropilot.

Componente	Código do componente	Quantidade	Predição de taxa de falha
Acelerômetro	ADXL50	2	7,8800E-08
Microcontrolador	MC68LK332ACPV16	1	7,1670E-07
FPGA	XC9536XL-7PC44C0166	1	1,0930E-07
Memória	AM41DL3244GB70I	1	2,7640E-07
Conversor A/D	CS5524AS	1	1,2200E-08
Conversor A/D	CS5528AS	1	1,2200E-08
Cristal de Quartz	ECS143S1	2	1,0070E-07
Resistor SMD	9C04021A1003FLHF3	55	2,4590E-07
Capacitor de Cerâmica	0402X102J500	137	7,1660E-07
Capacitor Eletrolítico	105SMH050M	11	1,8700E-08
Matriz de Resistores	EXB14V000JX	4	1,7000E-08
Diodo	1N4448W	14	3,8400E-08
Driver RS232	3232EE	1	5,1100E-08
Conversor DC-DC	MAX660M	1	8,0000E-09
Indutor	A920CY-390M	1	1,0000E-10
Transformador	Q4470	1	4,1860E-07
Conector de alimentação	53398-0271	1	5,0300E-08
Conector de Servos	SSW-101-01-F-D-LL	1	5,0300E-08
Receptor GPS	SQ GPS RECEIVER	1	1,6820E-07
Giroscópio	ADXL50	3	1,1820E-07
Regulador de tensão	ADP3050A3,3	1	3,2200E-08
Sensor de Pressão	MPXA4115A	2	3,9914E-06
Placa de circuito impresso	PCB 4 layers	1	3,6000E-08
Predição da Taxa de Falha do piloto automático MP2028g			7,2674E-06

De forma análoga foi levantada a predição da taxa de falha do servo-atuador Futaba, modelo S3151, conforme a Tabela 2 .A taxa de falha encontrada para o servo-atuador foi de 6,0762E-06 falhas/hora.

Tabela 2 - Predição da taxa de falha do servo atuador S3151 Futaba.

Componente	Código do componente	Quantidade	Predição de taxa de falha
Controlador de servo	PT2442-X	1	7,0900E-08
Motor DC	RF-020TH	1	5,4105E-06
Resistor	9C04021A1003FLHF3	21	3,1290E-07
Capacitor de cerâmica	0402X102J500	9	1,5690E-07
Cristal de Quartz	ECS143S1	1	5,0400E-08
Capacitor eletrolítico	105SMH050M	2	3,4000E-09
Diodo	1N4448W	2	5,5000E-09
Transistor	BC846A	5	2,2000E-09
Potenciômetro	5K LIN	1	3,6600E-08
Conector	87691-1007	1	2,5200E-08
Placa de circuito impresso	PCB 2 layers	1	1,8000E-09
Predição da Taxa de Falha do Servo-atuador S3151			6,0762E-06

A Tabela 3 lista os componentes integrantes do receptor de rádio controle R138DP Futaba com suas respectivas taxas de falhas, resultando em uma taxa de falha de 2,0670E-06 falhas/hora.

Tabela 3 - Predição da taxa de falha do receptor de rádio-controle R138DP Futaba.

Componente	Código do componente	Quantidade	Predição de taxa de falha
CI do Sistema de FI-FM	TA7761A	1	5,1100E-08
Transformador	Q4470	6	1,0000E-09
Microcontrolador	CPU FUTABA	1	2,7270E-07
Indutor	A920CY-390M	1	1,0000E-10
Diodo	1N4448W	1	2,7000E-09
Capacitor eletrolítico	105SMH050M	8	1,3600E-08
Cristal de Quartz	ECS143S1	3	1,5110E-07
Resistor SMD	9C04021A1003FLHF3	40	5,9610E-07
Capacitor de cerâmica	0402X102J500	42	7,3230E-07
Filtro de FI	FI FILTER	3	1,4130E-07
Transistor de RF	BF494	6	5,7000E-09
Transistor	BC846A	2	9,0000E-10
Regulador de tensão	ADP3050A3,3	1	3,2200E-08
Amplificador operacional	LM393	1	3,2200E-08
Placa de circuito impresso	PCB 2 layers	2	3,6000E-09
Conector	87691-1007	4	3,0600E-08
Predição da Taxa de Falha do receptor de rádio-controle R138DP			2,0670E-06

A Tabela 4 lista os componentes integrantes da placa *Servo-board*, responsável pela distribuição dos controles para os servos-atuadores, com suas respectivas taxas de falhas. A taxa de falha calculada é de 1,1920E-07 falhas/hora.

Tabela 4 - Predição da taxa de falha da placa *Servo-Board*.

Componente	Código do componente	Quantidade	Predição de taxa de falha
Decodificador	74HC237	1	4,8500E-08
Conector	87691-1007	10	6,8900E-08
Placa de circuito impresso	PCB 2 layers	1	1,8000E-09
Predição da Taxa de Falha da placa <i>Servo-board</i>			1,1920E-07

A predição da taxa de falha da bateria A, responsável pela alimentação do piloto automático, *servo-board* e receptor de rádio-controle, é de 3,0770E-07 falhas/hora. A predição da taxa de falha da bateria B, responsável pela alimentação dos servos-atuadores, também é de 3,0770E-07 falhas/hora.

O diagrama de blocos de confiabilidade da Figura 3 ilustra a arquitetura original da eletrônica de controle de vôo do sistema Micropilot.

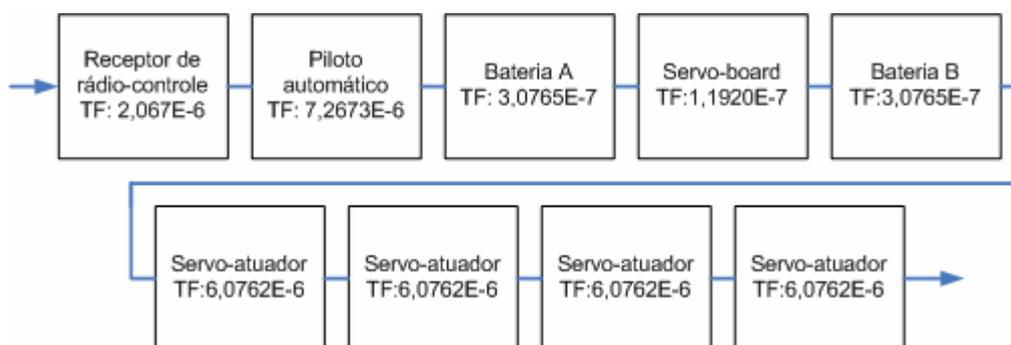


Figura 3 - Diagrama de Blocos de Confiabilidade da arquitetura original embarcada no VANT em estudo.

Nesta arquitetura percebe-se que a falha em qualquer um dos subsistemas pode resultar em uma condição de perda do VANT e possivelmente danos em solo.

A taxa de falha calculada para a eletrônica de controle de vôo embarcada no VANT é de 3,43737E-5 falhas/hora, o equivalente a um MTTF (*Mean Time To Failure*) de 29092 horas, não considerando assim os sistemas de comunicação, de solo, carga útil, sistema de propulsão e estrutura aerodinâmica (Azevedo, 2008).

A Tabela 5 compila as taxas de falhas calculadas para os subsistemas que compõem a eletrônica de controle de vôo embarcada no VANT em estudo.

Tabela 5 - Síntese das taxas de falhas encontradas para o sistema em estudo

Subsistema	Predição da Taxa de Falha (falhas/hora)
Piloto automático	7,2674E-06
Bateria A	3,0770E-07
Servos-atuadores	6,0762E-06
Bateria B	3,0770E-07
Receptor de rádio-controle	2,0670E-06
<i>Servo-board</i>	1,1920E-07
Taxa de falha total	3,43737E-5

3. PREDIÇÃO DE CONFIABILIDADE DO VANT COM ARQUITETURAS ALTERNATIVAS

Com base na arquitetura original analisada, foram propostas algumas arquiteturas que empregam técnicas de redundância de itens visando o aumento da confiabilidade. O primeiro cenário proposto para a arquitetura da eletrônica de controle de voo embarcada implementa a redundância do sistema de rádio-controle. Desta forma, um piloto em solo poderá assumir o controle da aeronave, em condições de voo visual, independente de qualquer tipo de falha ocorrida no piloto automático. O diagrama de blocos da Figura 4 ilustra esta arquitetura.

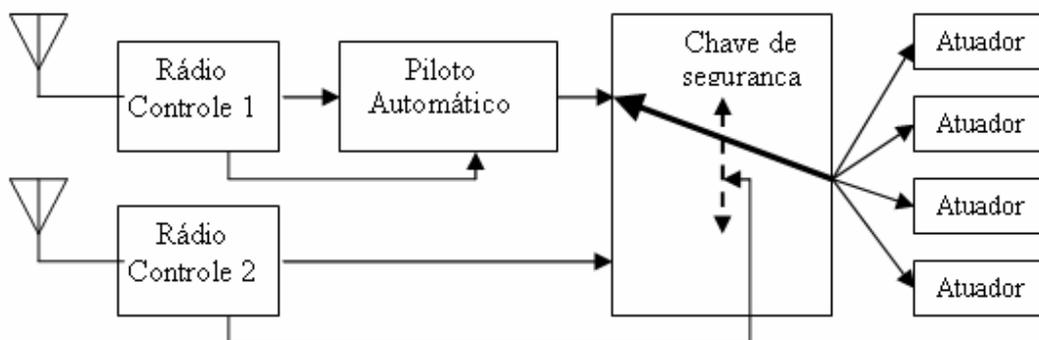


Figura 4 - Diagrama de Blocos da arquitetura da eletrônica embarcada com redundância do sistema de rádio-controle.

Para tanto, faz-se necessário a utilização de um subsistema capaz de realizar a comutação entre tais receptores de rádio-controle. Neste caso, foi implementado o subsistema chamado de “Chave de Segurança”. A Tabela 6 lista os componentes empregados na sua implementação.

Tabela 6 - Predição da taxa de falha da Chave de Segurança

Componente	Código do componente	Quantidade	Predição de taxa de falha
Chave Analógica CMOS	4066	2	9,2600E-08
Flip-flop CMOS	4013A	1	2,7000E-09
Placa de circuito impresso	PCB 2 layers	1	1,8000E-09
Conector	87691-1007	12	9,1900E-08
Predição da Taxa de Falha da Chave de Segurança			1,8900E-07

O diagrama de blocos de confiabilidade da Figura 5 apresenta a arquitetura da eletrônica embarcada com o segundo rádio-controle, totalmente independente do piloto automático, pelo qual o piloto em solo pode assumir o controle do VANT independente de falhas no piloto automático. A taxa de falha calculada foi de 2,49602E-5 falhas/hora, resultando em um MTTF de 38686 horas.

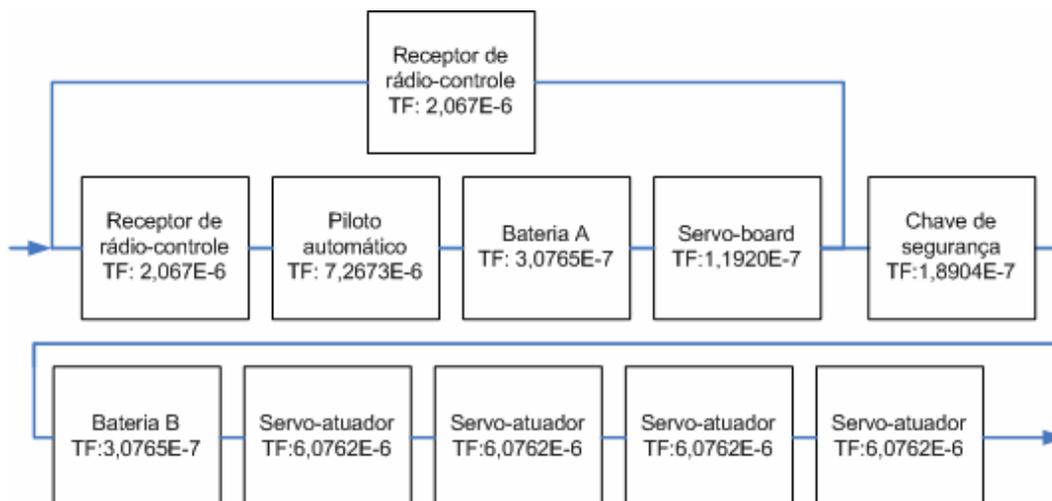


Figura 5 - Cenário 1 – Diagrama de Blocos de Confiabilidade da eletrônica embarcada com sistema de rádio-controle redundante, independente do piloto automático.

O segundo cenário é a implementação de redundância dos servos-atuadores. A perda de qualquer um dos servos-atuadores pode resultar na perda de controle total ou parcial da aeronave, causando assim um acidente. Estes são responsáveis pelo movimento das superfícies de controle do profundor, leme e ailerons, além do controle de propulsão. A Figura 6 apresenta uma proposta para a montagem mecânica de dois servos-atuadores redundantes. No dimensionamento do servo-atuador, considera-se que cada um deles será capaz de atuar na superfície de controle, independente se o outro estiver ou não em operação.



Figura 6 - Montagem mecânica de redundância de servos-atuadores

A Figura 7 mostra o diagrama de blocos de confiabilidade para a eletrônica de controle de voo embarcada, com taxa de falha de $1,05506E-5$ falhas/hora, o equivalente a um MTTF de 54703 horas.

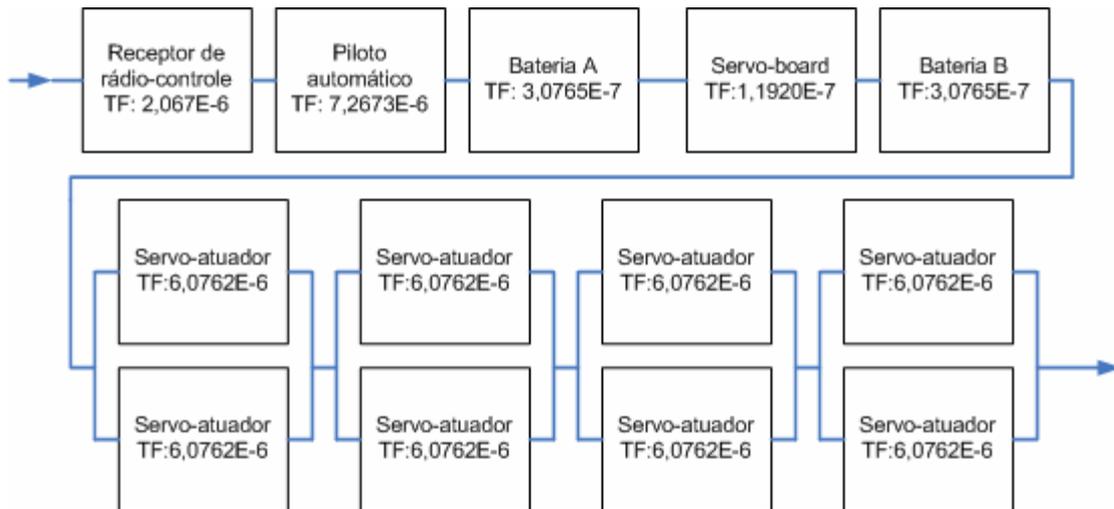


Figura 7 - Cenário 2 – Diagrama de Blocos de Confiabilidade da eletrônica embarcada com redundância de servos-atuadores.

O terceiro cenário reúne as soluções propostas no cenário 1 e 2, ou seja, a redundância do sistema de rádio-controle com redundância dos servos-atuadores. A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos de confiabilidade para a eletrônica embarcada. A taxa de falha calculada foi de $9,48111E-7$ falhas/hora, o equivalente a um MTTF de 85436 horas.

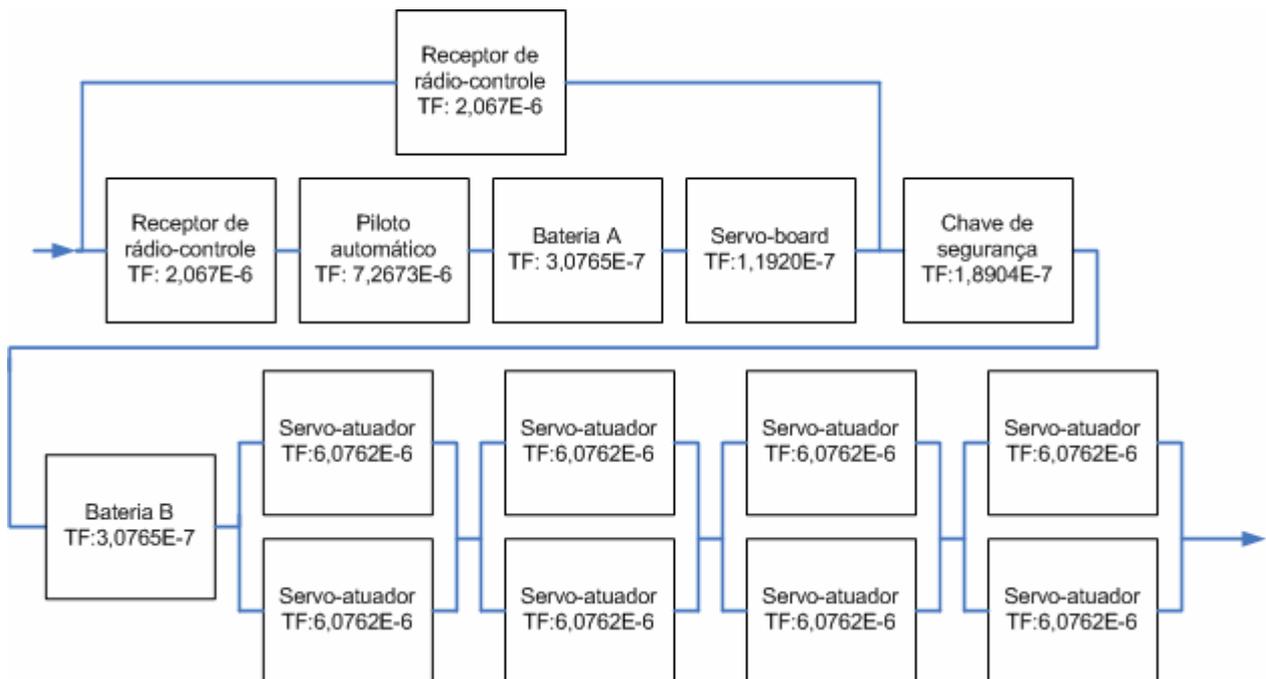


Figura 8 - Cenário 3 – Diagrama de Blocos de Confiabilidade da eletrônica embarcada com redundância do sistema de rádio-controle e servos-atuadores.

4. CONCLUSÕES

Na busca de uma plataforma aérea de baixo custo, confiável, para realizar e desenvolver ensaios de diversos tipos de subsistemas embarcados, tal como sistema de imageamento, esbarra-se na confiabilidade e segurança do sistema eletrônico de controle de voo embarcado. É extremamente importante que o piloto em solo possa assumir o controle da plataforma aérea sob qualquer circunstância durante o voo.

A arquitetura original implementada pelo fabricante do VANT se mostrou pouco confiável durante as realizações de ensaios em voo, principalmente por não prover nenhuma alternativa em caso de uma falha simples, motivando este estudo de confiabilidade.

Uma síntese dos resultados de confiabilidade obtidos nas diversas arquiteturas propostas, assim como na arquitetura original é apresentada na Tabela 7. Também é apresentada uma estimativa da confiabilidade do sistema eletrônico de controle de vôo após 1000 horas de operação, R(1000 horas), evidenciando assim a melhoria da confiabilidade entre os cenários.

Tabela 7 - Síntese dos resultados obtidos.

Cenário	0	1	2	3
Proposta implementada	Arquitetura Original	Redundância do sistema de rádio-controle	Redundância dos servos-atuadores	Redundância do sistema de rádio-controle e redundância dos servos-atuadores
Taxa de Falha [falhas/hora]	3,43737E-5	2,48415E-5	1,05506E-5	8,29397E-7
MTTF [horas]	29092	38850	54703	86015
R(1000 horas)	0,96621	0,975484	0,989649	0,999337

Em relação à arquitetura original, o cenário 1 se mostrou uma solução recomendável a qualquer tipo de VANT por prover a possibilidade do piloto em solo recuperar o VANT e trazê-lo de volta ao solo manualmente com segurança, independente de qualquer falha apresentada no piloto automático, apesar de não proporcionar uma melhoria significativa na confiabilidade global do sistema. O cenário 2 proporciona uma maior confiabilidade nos servos-atuadores, diretamente responsáveis pelo controle da plataforma aérea. Uma falha total ou parcial em qualquer um dos 4 servos-atuadores, responsáveis pelos comandos de elevação, guinada, rolamento e propulsão, torna muito difícil o controle da aeronave durante o vôo. O acréscimo de peso para esta solução deve ser avaliado para cada tipo de VANT. O cenário 3 reúne as implementações propostas nos cenários 1 e 2, apresentando uma taxa de falha significativamente menor. A redundância da bateria B não trouxe uma melhora expressiva da confiabilidade, além de aumentar o peso da aeronave, sendo assim não implementada. Conclui-se então que uma arquitetura que utilize redundância de sistemas de rádio-controle e redundância de servos-atuadores é recomendada para o desenvolvimento de VANTs de baixo custo que utilizem equipamentos COTS, necessitando também de outras soluções que contemplem as condições de vôo fora do alcance visual, tais como sistema de pára-quadras de emergência e sistemas de terminação de vôo.

5. REFERÊNCIAS

- Azevedo, I. A. Apostila EA-160, Confiabilidade de componentes e sistemas, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2008.
- Goetzendorf-Grabowski, T., MALE UAV design of an increased reliability level, Warsaw University of Technology, pp.226, 2006.
- MicroPilot., MP2028g UAV Autopilot, <http://www.micropilot.com> (acessado em maio de 2009)
- MIL-HDBK217F, Reliability Prediction of Electronic Equipment, USA DoD, Military Handbook, dezembro de 1991.
- MIL-HDBK338A, Electronic Reliability Design Handbook, Military Handbook, outubro de 1998.
- Relex Software Corp. Relex Reliability Studio 2008, setembro 2008 Update. <http://www.relexsoftware.com> (acessado em 2009)
- Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005 – 2030, United States of America, Department of Defense, Office of the Secretary of Defense –, pp.1,2,87,89; 2005
- Unmanned Aerial Vehicle Roadmap 2005 - European Civil Unmanned Air Vehicle Roadmap, volumes 1, 2 e 3, <http://www.uavnet.com> (acessado em maio de 2008) –, pp15 v3; 2005
- Uhlig, D., Bhamidipati, K., Neogi, N. – Safety and Reliability Within UAV Construction – University of Illinois at Urbana-Champaign, IEEE 1-4244-0378-2/06 - 2006

6. NOTA DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste artigo.