

## **ANÁLISE TÉRMICA DE SISTEMAS HIDRÁULICOS DE AERONAVES**

**Gilliard Fabiano Adriano<sup>1</sup>, gilliadriano@gmail.com**  
**Emília Villani<sup>1</sup>, evillani@ita.br**  
**Marcondes Azevedo Matos<sup>2</sup>, mamatos@embraer.com.br**

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica  
12228-900 São José dos Campos, São Paulo, BRASIL  
Empresa Brasileira de Aeronáutica, Centro de Competência  
12227-901 São José dos Campos, São Paulo, BRASIL

**Resumo:** *As aeronaves de pequeno e médio porte mais recentes seguem a tendência de incluir um sistema de geração hidráulica para permitir melhor qualidade de voo, manobrabilidade em solo e performance. Este sistema tem características semelhantes às aeronaves de grande porte, incluindo a utilização de vários usuários tais como os comandos de voo, trens de pouso, steering, freios e reversos. Por ser um sistema que trabalha em alta pressão e em diversas condições de operação, o sistema hidráulico está sujeito a aquecimento, o que pode comprometer a integridade do sistema e sua segurança. Existem hoje poucas referências que tratam da modelagem da troca de calor e temperatura em de sistemas hidráulicos. Neste sentido, este trabalho apresenta uma abordagem para análise do desempenho de um sistema termo-hidráulico de uma aeronave por meio da ferramenta AMESim. Alguns componentes têm seus parâmetros mais impactantes identificados por meio de experimentos específicos. É analisado um cenário crítico para possibilitar a identificação dos limites do sistema e possíveis soluções para os problemas. Com base nesses dados é possível adiantar problemas de aquecimento em sistemas hidráulicos logo na sua concepção visando a segurança e confiabilidade do sistema.*

**Palavras-chave:** *Simulação; Sistemas Termo-hidráulicos; Aeronaves*

### **1. INTRODUÇÃO**

Os sistemas hidráulicos estão cada vez mais presentes nos sistemas de acionamento de aeronaves de pequeno e médio porte. A grande melhora na qualidade de voo devido ao controle proporcionado por essa tecnologia tem se mostrado um requisito de mercado, principalmente no setor de aeronaves corporativas. Ela é uma boa opção para acionamentos, porque é uma tecnologia madura e com boa relação custo/benefício. Os sistemas hidráulicos podem alimentar diversos tipos de sistemas como trens de pouso, *steering*, freios, reverso e comandos de voo.

Outra tendência em aeronaves de pequeno e médio porte são envelopes de voo cada vez mais semelhantes aos de aeronaves comerciais, com amplas faixas de altitudes e temperaturas. Isso implica em condições variadas nas quais o sistema deve operar com confiabilidade e segurança. Todos os aspectos de segurança devem ser criteriosamente analisados antes da certificação da aeronave. Esta análise pode ser realizada por meio de testes, simulações ou similaridade com aeronaves já existentes.

A simulação vem sendo cada vez mais utilizada para possibilitar prever condições críticas de operação e verificar o comportamento do sistema em condições muitas vezes impraticáveis por meio de testes. No projeto de uma nova aeronave a simulação pode também diminuir a campanha de ensaios, uma vez que com modelos calibrados permitem testar várias condições do envelope e realizar ensaios físicos apenas nos pontos mais críticos do sistema.

O aquecimento máximo do sistema hidráulico deve ser compatível com o envelope de operação da aeronave. Antigamente isso era demonstrado por meio de teste, calibração e extrapolações para as condições extremas do envelope. Como consequência, os problemas eram identificados tardiamente, quando a aeronave já estava pronta, obrigando a mudanças corretivas e onerando o projeto. Hoje a simulação permite verificar todos os pontos críticos antes da conclusão da arquitetura final do sistema.

O objetivo deste artigo é apresentar a abordagem utilizada para verificar o comportamento térmico de um sistema hidráulico, com particular ênfase no estudo do aquecimento do sistema, prevenindo condições de sobreaquecimento que possam comprometer a segurança da aeronave. Para tanto é apresentado um modelo termo-hidráulico de uma aeronave de pequeno e médio porte com foco nos fenômenos térmicos envolvidos. Por meio deste modelo pode-se prever a necessidade de incluir trocadores de calor no sistema ou mesmo alterar a configuração do sistema hidráulico.

O modelo não tem como objetivo identificar comportamentos dinâmicos complexos como efeitos de onda ou inércia, pois eles têm pouco impacto no aquecimento do sistema. É esperado, no entanto, simular os efeitos de queda de pressão nas linhas e troca de calor, possibilitando realizar um estudo de sensibilidade paramétrica para verificar as influências de parâmetros como temperatura ambiente, tipo de fluido, comprimento de tubulação e material utilizado nas temperaturas de equilíbrio.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Muitos trabalhos vêm sendo publicados no âmbito de modelagem e simulação de sistemas hidráulicos. Pode-se citar o trabalho de Mizioka (2009), que simula os efeitos da mudança de temperatura do fluido e apresenta a modelagem de um sistema de atuação direcional de uma aeronave por meio de um modelo hidromecânico acionado por cabos e polias. Este trabalho apresenta a modelagem detalhada dos componentes e faz uma análise minuciosa da influência da temperatura na resposta dinâmica de servo-atuadores, desprezando a influência das tubulações e trocas de calor e utilizando o software 20-Sim.

Outro trabalho relacionado é o de Carone (2009), que elaborou um modelo hidráulico do sistema de direcionamento da aeronave em solo (“steering”) utilizando o software AMESim. Essa abordagem utiliza a biblioteca de componentes hidráulicos do software para construir o modelo da válvula solenóide e da válvula de corte. Outro recurso explorado é uma ferramenta de simplificação de modelos do próprio AMESim, baseada no índice de atividade dos componentes. Esse índice consiste na medição do fluxo de potência entre os pórticos dos componentes. Infelizmente, esse índice ainda não se encontra funcional para sistemas termo-hidráulicos devido a complicações geradas pelo uso de pseudografos-de-ligação.

Vianna (2007) apresenta a modelagem de um sistema hidráulico por meio de grafos de ligação. Souza Neto (2006) apresenta um modelo hidráulico do sistema de extensão e retração de um trem de pouso, também baseado no uso do AMESim e utiliza a biblioteca de componentes hidráulicos para construir um modelo de válvula seletora dos trens de pouso e da válvula de queda livre.

Joshi e Jayan (2002) apresentam um modelo utilizado para dimensionamento de componentes de um sistema hidráulico com demandas de servo-atuadores, acumuladores, perdas de pressão nos componentes, fluxos dos servo-atuadores e finalmente calculando o fluxo nas bombas. Os resultados são apresentados e o modelo validado. Ao final foi criado um pacote de simulação de sistemas hidráulicos para Matlab-Simulink.

Rowland et al. (2000) apresentam um trabalho conjunto entre a Honeywell Normalair Garrett Inc. e a Flowmaster International Inc. Neste trabalho são apresentadas as condições organizacionais que favorecem um ambiente propício ao desenvolvimento de grandes modelos. Ele cita que para que haja vantagens reais no projeto os modelos devem começar a serem desenvolvidos em uma fase inicial do projeto, na qual muitas vezes não existem dados suficientes ou confiáveis. Os resultados dessas simulações são difundidos e podem acabar sendo utilizados quando os modelos já tiverem mudado suas premissas ou estiverem obsoletos. Portanto os modelos devem ter controle de versões e seus parâmetros serem facilmente reconfiguráveis. Ele também cita que nenhum software no mercado é capaz de suprir todos os componentes necessários em um projeto de grande porte. Dessa forma alguns componentes mais complexos são feitos com base em componentes mais simples, caso que realmente ocorreu durante o desenvolvimento deste trabalho. Outro ponto em comum com o trabalho em questão são os passos de tempo, que podem requerer microssegundos para análises de pressão ou minutos para análises térmicas.

Outro artigo afim com este trabalho é o de Villani e Góes (2006), que apresenta uma análise comparativa das vantagens e desvantagens do uso do AMESim e do Matlab-Simulink. Esta análise é baseada num estudo de caso desenvolvido com alunos de graduação. São discutidas vantagens e desvantagens das duas ferramentas.

## **3. METODOLOGIA DE PESQUISA**

Este trabalho foi organizado nas seguintes atividades: caracterizar o sistema hidráulico, definir o envelope de atuação do sistema, analisar cenários críticos de utilização do sistema, construir o modelo em AMESim de modo incremental, realizar ensaios para levantamento de parâmetros, realizar as simulações e analisar as respostas, modificando o projeto do sistema hidráulico caso necessário. A figura 1 mostra o fluxograma adotado no projeto.

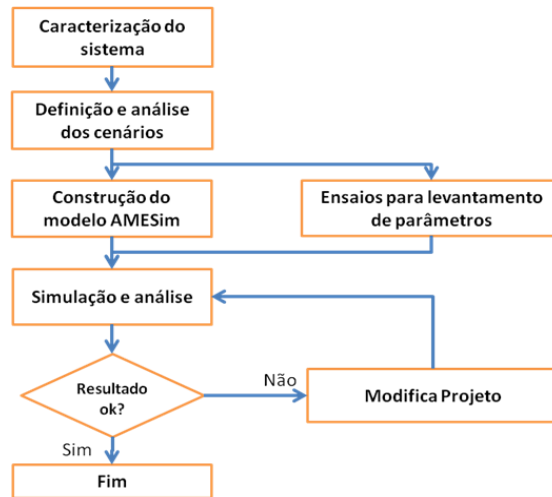


Figura 1. Fluxograma adotado no projeto.

## 4. DESENVOLVIMENTO DE MODELOS

### 4.1. Caracterização do sistema

O estudo de caso considerado é ilustrado na figura 2. O sistema hidráulico visa atender aos critérios de confiabilidade dos sistemas usuários, principalmente comandos de voo e possui dois sistemas hidráulicos independentes mais um de backup. Cada sistema possui bombas independentes e com alimentações distintas. A distribuição das superfícies de controle nos três sistemas é realizada através de uma análise criteriosa de segurança da aeronave. Alguns tipos de componentes foram retirados do diagrama simplificado.

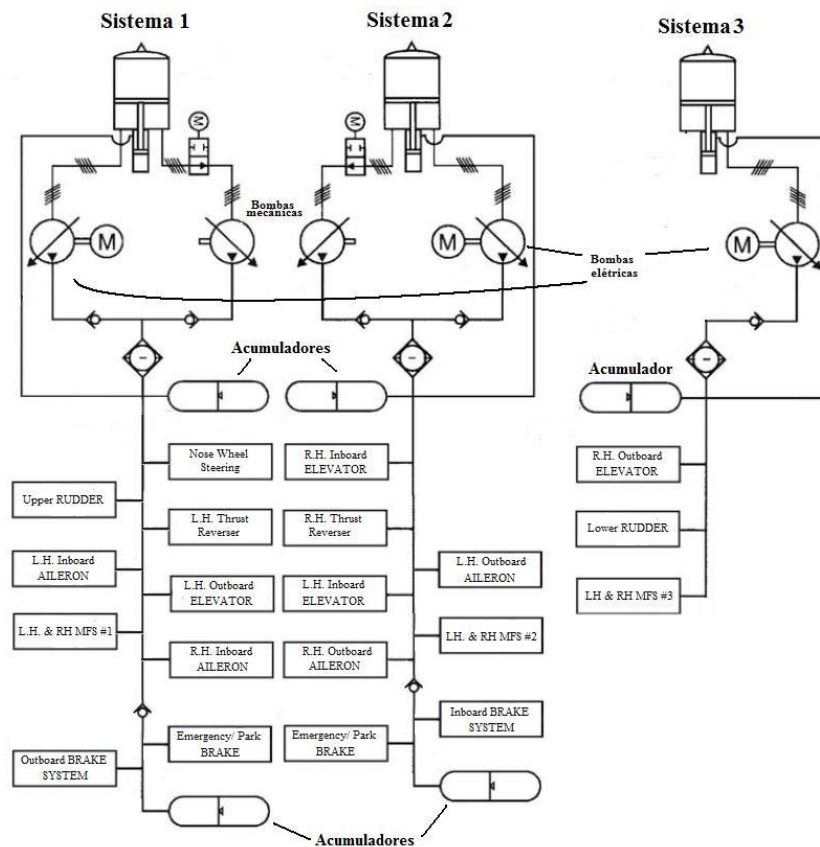


Figura 2. Diagrama simplificado dos sistemas hidráulicos.

## 4.2. Descrição e análise dos cenários

Para simular um sistema hidráulico é necessário escolher alguns cenários de operação. Normalmente os cenários devem representar as condições mais extremas do envelope de operação nas quais o sistema deve funcionar corretamente. Com isso é possível prever condições críticas do sistema, possibilitando projetá-lo com maior confiabilidade.

Para o modelo termo-hidráulico o foco principal está no aquecimento do sistema. Para essa condição, a fase de voo mais crítica é a de taxi, pois a temperatura externa é mais alta, o avião pode ficar exposto à radiação solar e não há fluxo de ar nem pelas superfícies, nem pelas entradas de ar, a não ser que o sistema possua ventiladores dedicados. Além disso, essa fase pode ter longa duração, dependendo das condições de operação.

Os dados de temperatura externa vêm do envelope de operação da aeronave, que é definida através de requisitos de mercado. Para este estudo o limite superior considerado será uma atmosfera padrão ISA+25, que significa aproximadamente 52°C de temperatura ambiente. A temperatura do compartimento que abriga os conjuntos de hidráulica deve ser estimada através do cálculo das temperaturas dos compartimentos adjacentes, juntamente com uma estimativa de irradiação solar (quando aplicável). Considera-se que a temperatura do compartimento tenha sido estimada através de dados de operação e que seja em torno de 60°C em média. Um limite de temperatura a ser respeitado no sistema hidráulico é a máxima temperatura que os anéis de vedação suportam, que é em torno de 135°C. Portanto será considerada uma margem de 10°C, deixando o limite de temperatura máxima de 125°C.

Os dados de consumo dos sistemas ativos foram obtidos usando-se dados de operação, de acordo com o tamanho da aeronave e dos esforços estimados para cada atuador.

## 4.3. Construção do modelo AMESim

AMESim ou Advanced Modeling Environment for Simulations é um software de engenharia desenvolvido para simulação de sistemas que envolvam múltiplos domínios. Ele surgiu de um projeto do professor Michel Lebrun da Universidade de Lyon à partir do projeto EKOFISK, para simulação do sistema de levantamento de plataformas do mar do norte, para o qual foi criada a empresa IMAGINE, em 1986. Atualmente foi comprada pela LMS, tornando-se LMS-IMAGINE.

O AMESim funciona baseado nos princípios de pórticos de potência proveniente dos formalismos de modelagem dos Bond Graphs, ou grafos de ligação, para realizar seus cálculos internos. Ele possui uma série de componentes dispostos em bibliotecas de vários domínios, como mecânico, eletromagnético, hidráulico, térmico etc. Esses componentes podem ser interconectados e possuem quatro tipos básicos de variáveis generalizadas: esforço, fluxo, deslocamento e momento. A Figura 3 mostra as variáveis presentes em uma bomba termohidráulica, pistão e volume hidráulico.

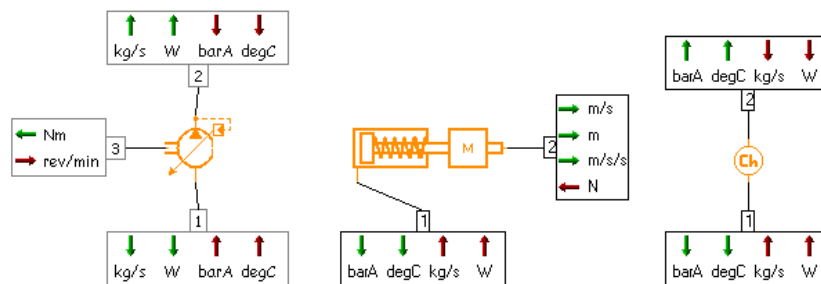


Figura 3. Exemplos de submodelos termohidráulicos em AMESim.

Para que um elemento seja conectado ao outro ele deve apresentar as mesmas dimensões e causalidades compatíveis. Dessa forma o software garante a coerência do modelo.

## 4.4. Reservatório

O reservatório utilizado no sistema é do tipo “bootstrap”. Além de armazenar o fluido hidráulico ele tem a função de pressurizar a linha de sucção do sistema hidráulico para evitar a cavitação da bomba e grandes flutuações no volume de fluido. No entanto o AMESim não contempla esse tipo de componente em sua biblioteca e o seu modelo foi substituído por um reservatório com câmara de gás pressurizado. Além disso, ele considera apenas a influência da capacidade térmica do óleo em seu interior e necessitou de uma adaptação para considerar também seu corpo. O modelo de reservatório final pode ser observado na Figura 4. Ele pode ser dividido em três partes, o reservatório, a massa e o elemento de convecção. O reservatório modela a dinâmica hidráulica e o fluxo de calor no fluido. O fluido troca calor por convecção com o reservatório (massa) que por sua vez troca calor com o ambiente. Alguns parâmetros tiveram de ser adaptados para aproximar os resultados do modelo com o observado experimentalmente.



Figura 4. Modelo do reservatório em AMESim.

#### 4.5. Tubulação

O AMESim possui diversos submodelos para tubulações e sua documentação possui uma breve descrição do funcionamento de cada um. Este trabalho prioriza os fenômenos térmicos, portanto os submodelos contêm apenas fenômenos de fricção, compressibilidade e convecção térmica.

#### 4.6. Modelo de bomba hidráulica

O modelo da bomba hidráulica usado consiste na adaptação do elemento TFPU4 do AMESim, mostrado na Figura 5. Este submodelo não é completo e precisou ser alterado para adicionar o case drain ao circuito hidráulico, juntamente com as trocas de calor envolvidas com ele.

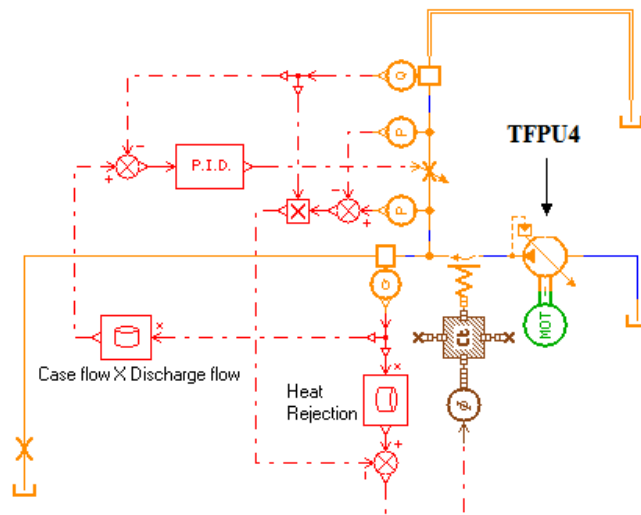


Figura 5. Adaptações realizadas no modelo TFPU4 para inclusão do Case Drain.

#### 4.7. Modelo de válvulas unidirecionais

As válvulas unidirecionais podem ser modeladas através de sua pressão de abertura, ou cracking pressure ( $P_{crack}$ ), que é a pressão mínima para permitir fluxo no sentido direto. O carretel da válvula tem um curso finito e sua posição é calculada de acordo com as pressões em seus pórticos. O fluxo é calculado proporcionalmente com o deslocamento do carretel até seu batente, no qual ele forma um orifício que é calculado usando-se o fluxo máximo e a queda de pressão neste ponto. A partir deste ponto a válvula passa a ser tratada simplesmente como um orifício. A Figura 6 mostra o diagrama de vazão x pressão da válvula unidirecional.

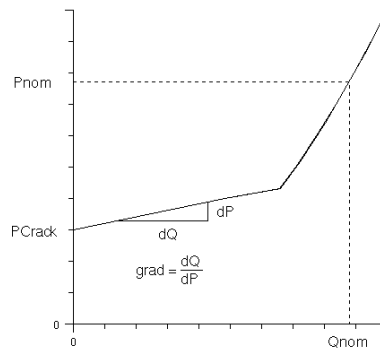


Figura 6. Diagrama vazão x pressão de válvula unidirecional.

#### 4.8. Modelo de válvulas de prioridade

Na fase de vôo analisada neste trabalho os ramos que possuem válvulas de prioridade se encontram inoperantes e, portanto, foram excluídos do modelo para evitar elementos desnecessários para as análises em questão.

#### 4.9. Modelo de consumidores

Os consumidores são os conjuntos de válvulas e atuadores utilizados para controlar as superfícies de comando da aeronave. Como o objetivo do estudo é modelar apenas o calor gerado pelos consumidores para o sistema hidráulico, o conjunto de componentes que formavam os consumidores foi substituído por orifícios hidráulicos com as vazões médias para cada atuador. Esta é uma abordagem conservadora, pois toda a queda de pressão nestes componentes acaba convertida em calor.

#### 4.10. Modelo do sistema

Os modelos dos sistemas foram feitos a partir dos esquemas mostrados na seção 4.1. Eles foram construídos de modo incremental. Primeiro foram inseridos os componentes básicos e seus parâmetros. Depois foi executada a simulação e verificaram-se as respostas. O modelo foi então depurado e os elementos mais complexos inseridos, até chegar ao sistema completo. A Figura 7 mostra o modelo completo do Sistema 1.

Modelo termo-hidráulico de aeronaves de Pequeno e Médio Porte  
 Sistema hidráulico #1

Material 1: Aluminum  
 Silydru50264

Material 2: Titanium

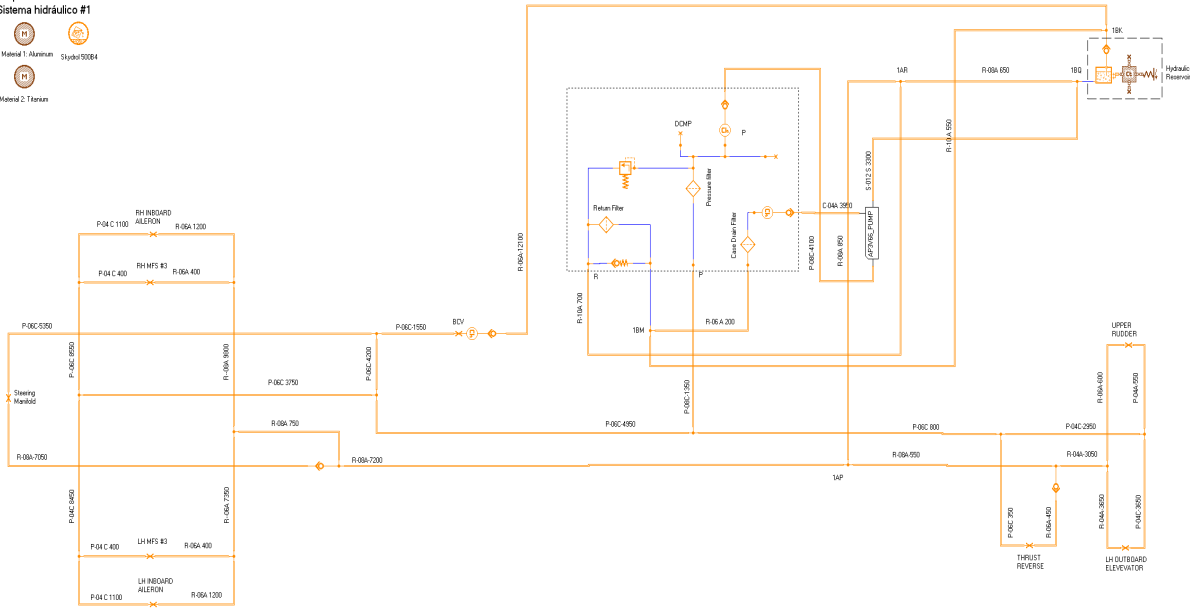


Figura 7. Modelo completo do Sistema Hidráulico 1.

## 5. ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS

### 5.1. Reservatório

O objetivo deste ensaio foi identificar o coeficiente de convecção interno e externo do reservatório. A instalação utilizada para os testes possuía uma configuração padrão e por isso as medidas tomadas neste ensaio foram limitadas à instrumentação original. Em uma abordagem completa seria aconselhável adotar uma condição de regime permanente para que fosse possível identificar os coeficientes de convecção forçados do fluido interno, mas não haviam fluxômetros ligados às linhas do reservatório. Desta forma adotou-se a identificação através da condição sem fluxo, apenas com convecção natural, o que consiste numa abordagem mais conservadora, visto que o deslocamento do fluido propicia melhor convecção térmica.

O ensaio consistiu em ligar o sistema até a temperatura de regime, desligar as bombas e gravar os dados. Os dados gravados foram a temperatura interna do reservatório através do RTD (Resistance Temperature Detector), a temperatura da carcaça e a temperatura ambiente através de um termopar, e a pressão do reservatório através de um transdutor de pressão. Após o resfriamento todos os demais sistemas foram desligados.

Foi obtida a curva de decaimento das temperaturas do fluido (interna) e do corpo do reservatório (externa). Esses dados foram calibrados para retirar os erros sistemáticos e reduzidos através do Excel. Então foi feito um modelo para identificar os coeficientes, minimizando os resíduos em relação às temperaturas obtidas experimentalmente. A Figura 8 mostra o modelo utilizado para ajuste dos coeficientes.

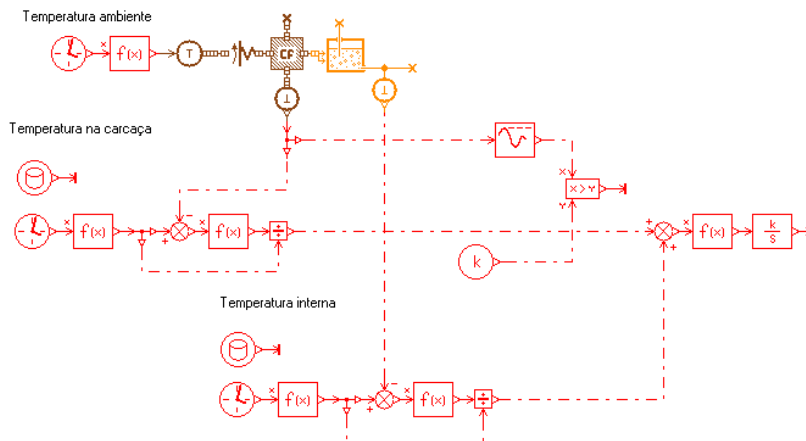


Figura 8. Modelo para ajuste dos coeficientes do reservatório.

## 5.2. Coeficiente de convecção em tubos

O objetivo deste experimento foi obter o coeficiente de convecção térmica de tubulações hidráulicas. Esse teste utilizou a instalação proposta na Figura 9. Utilizando-se um algoritmo de otimização interno do AMESim foi possível encontrar os coeficientes de convecção global para cada condição. Depois de encontrados os valores foram calculados a média e o desvio padrão.

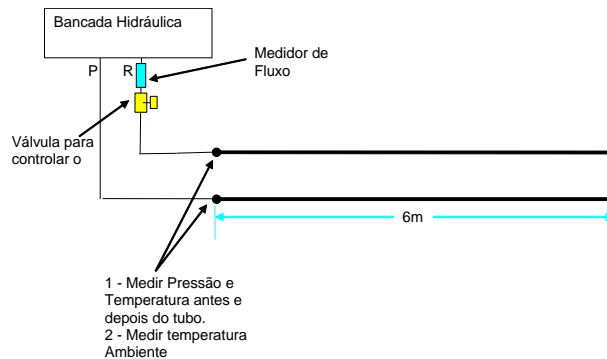


Figura 9. Diagrama do teste de identificação do coeficiente de convecção.

## 5.3. Bomba hidráulica

O objetivo deste ensaio foi inserir no sistema o calor produzido pela bomba hidráulica. Isso foi feito através da comparação dos resultados do modelo em AMESim com curvas experimentais de uma bomba hidráulica. Os parâmetros do modelo foram ajustados de acordo com essas curvas.

## 5.4. Simulação e análise

Realizando a simulação do sistema completo mostrado na secção 4.10 juntamente com os parâmetros obtidos experimentalmente e o cenário proposto obteve-se o comportamento esperado do sistema. As temperaturas em cada ponto do sistema puderam ser obtidas e o ponto mais crítico encontrado foi a tubulação logo após o *case drain* da bomba. A temperatura encontrada ultrapassa o valor máximo de projeto e alguma alteração deve ser refeita. A simulação da temperatura no *case drain* é mostrada na Fig. Figura 1.

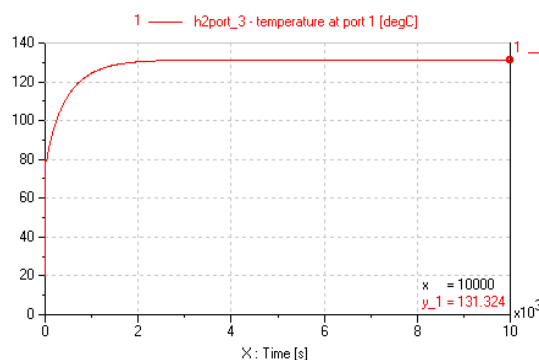
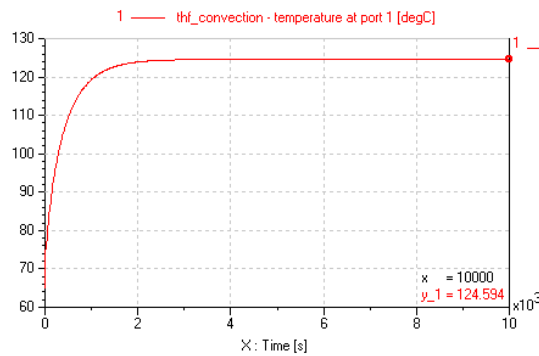


Figura 10. Temperatura simulada para o *case drain* da bomba.

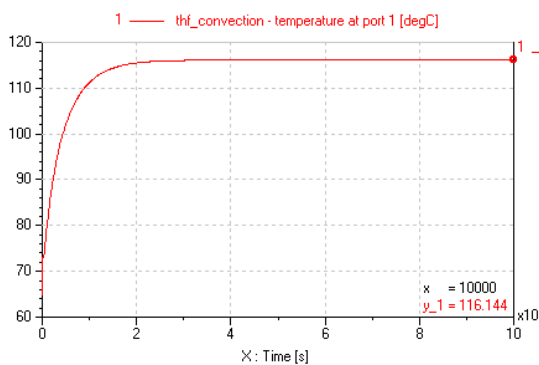
Uma das propostas para melhorar esse resultado foi passar a tubulação pela área do tanque de combustível, que aumentaria a troca de calor do sistema hidráulico com o ambiente. O resultado obtido para a temperatura do *case drain* pode ser visto na Fig. 11.





**Figura 11. Temperatura simulada do *case drain* com tubulação passando pelo tanque de combustível.**

Usando um trocador de calor de apenas 250W no sistema hidráulico, a temperatura simulada pode diminuir dentro dos níveis estabelecidos para esse projeto, conforme a Fig. 12. Isso pode dar mais margem a modificações futuras nos sistemas.



**Figura 12. Temperatura do *case drain* com trocador de calor.**

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a verificação do comportamento térmico de um sistema hidráulico de aeronave por meio de simulação. O objetivo é a análise do aquecimento de acordo com as condições ambientais e de operação. Pode-se concluir por este modelo que na condição analisada o sistema pode aquecer e mudanças devem ser adotadas para que o sistema atenda aos requisitos propostos. Duas propostas foram feitas, uma que atendia aos requisitos sem nenhuma margem de segurança e a segunda projetada para proporcionar essa margem.

O modelo em questão pode simular muito mais casos, desde outras temperaturas do compartimento, caso os cálculos de cada compartimento sejam refinados até mudança na rotação da bomba, que depende do regime de rotação da turbina (que é ligada mecanicamente com a bomba hidráulica).

Em um projeto de uma aeronave estas possibilidades poderiam ser estudadas em paralelo ainda em sua fase conceitual, interagindo-se com os outros sistemas da aeronave para encontrar a arquitetura com melhor relação custo-benefício atendendo a todos os requisitos.

## REFERÊNCIAS

- CARONE, Ricardo Rogge. “Modelagem, simulação e análise dinâmica unidimensional de um sistema de direcionamento em solo de aeronaves”. 2009. 76f. Dissertação de mestrado – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos.
- JOSHI, ASHOK; JAYAN, P. G. “Modeling and simulation of an aircraft hydraulic system” In: AIAA Modeling and simulation technologies conference and exhibit, 5-8 August, 2002, Monterey CA Disponível em: <>
- MIZIOKA, L. S. “Modelagem e análise de desempenho do servo atuador do sistema de leme de uma aeronave sob variação de temperatura”. 2009. 128f. Dissertação de mestrado – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos.
- ROWLAND, PETER et al., “Development of the modeling environment for the simulation of an aircraft hydraulic system” In: AIAA World Aviation Conference, 10-12 October, 2000, San Diego, CA Disponível em: <>;

- SOUZA NETO, José de Barros “Landing Gear Extension and Retraction Subsystem Modeling”. 2006. 161f. Dissertation of Master Sciences – Aeronautics Institute of Technology, São José dos Campos.
- VIANNA, Vlamir O. L.. “Modelagem e análise do sistema hidráulico de uma aeronave comercial regional”. 2007. 137f. Dissertação de mestrado – Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos.
- VILLANI, EMÍLIA; GÓES, L.C.S “Análise comparativa de softwares para simulação de sistemas aeronáuticos” In: CONEM Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 22-25 Agosto, 2006, Recife PE

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# THERMAL ANALYSIS OF AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEMS

Gilliard Fabiano Adriano<sup>1</sup>, gilliadriano@gmail.com

Emília Villani<sup>1</sup>, evillani@ita.br

Marcondes Azevedo Matos<sup>2</sup>, marcondes.matos@embraer.com.br

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Divisão de Engenharia Mecânica-Aeronáutica  
12228-900 São José dos Campos, São Paulo, BRASIL  
Empresa Brasileira de Aeronáutica, Centro de Competência  
12227-901 São José dos Campos, São Paulo, BRASIL

**Abstract:** *The newest small and medium size aircraft tend to include hydraulic systems to allow better flight qualities, ground handling and performance. This system has characteristics similar to those of a narrowbody aircraft, including the use of various other systems as flight controls, landing gear, steering, autobrakes and reverse. Because the system operates in high pressures and various conditions this system can heat up considerably, what would compromise the systems integrity and safety. Today there are few academic references concerning heat and temperature modeling in hydraulic systems. In this sense this work presents an approach to analyse the performance of a thermal-hydraulic system with the AMESim tool. Some components have their most impactant parameters identified through specific experiments. One critical scenario will be studied to identify the limits of this type of systems and possible solutions for problems. Based on this data it is possible to foresee overheating problems in the hydraulic system yet in its conception phase aiming safety and reliability.*

**Keywords:** *Modeling; Simulation; Hidraulics; Thermal; Aircraft*