

Desenvolvimento de Sistema de Controle e Aquisição de Dados para Ensaio de Motor Foguete a Propelente Híbrido (MFPH) utilizando Linguagem Gráfica e Plataforma PXI

David R. G. Ribeiro¹, Ângelo Dybal², Ronaldo Chaves¹ e Renato Nunes¹

¹Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE); ²Faculdade de Tecnologia de São José dos Campos (FATEC SJC)

Resumo - O motor foguete híbrido (H1) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) tem como objetivo principal a capacitação técnica no desenvolvimento de tecnologia propulsiva alternativa competitiva. O sistema de injeção do motor H1 introduz o oxidante no estado gasoso no interior da câmara de combustão onde se encontra o bloco de combustível com geometria estrela. O processo de combustão é iniciado por ignitores pirotécnicos gerando pressões da ordem de 15 bar e empuxo de 1 kN. O IAE conta com infraestrutura de ensaios, Laboratório de Ensaios em Propulsão (LEPR), instrumentada com célula de carga e transdutores de pressão para medir os parâmetros de operação do motor. Neste contexto, sistema de controle e aquisição de dados é desenvolvido utilizando a linguagem gráfica LabVIEW e plataforma PXI. A instrumentação de ensaio baseia-se no sistema de aquisição de dados de tempo real da National Instruments definido pelo chassi PXI-1031, equipado com a controladora PXI-8196 e os cartões PXI-8431 e PXI-6289. Para operacionalizar o sistema foi adotada como requisito de desenvolvimento a arquitetura distribuída SCADA e o padrão de projeto QMH nativo do LabVIEW. Essa abordagem sistêmica resultou na consecução dos objetivos fixados pelos requisitos técnicos e operacionais que visam efetividade e segurança do procedimento de ensaio.

I. INTRODUÇÃO: MOTOR H1 - CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES

O motor H1 [1, 2], apresentado na figura 1, é plataforma para desenvolvimento de injetores e combustíveis no interesse de avaliar o desempenho de tecnologia alternativa face à propulsão sólida ou líquida. Oxigênio gasoso (GOx) é introduzido na câmara de combustão onde o combustível sólido (figura 2) oferece uma superfície de combustão caracterizada pela geometria estrela do grão. Um sistema de ignição é utilizado para deflagrar o processo de combustão, através de um dispositivo pirotécnico montado sobre o cabeçote do motor (figura 3). Uma vez que a chama é estabelecida, o processo é autossustentável e os gases quentes do processo de combustão são ejetados através de uma tuberia produzindo empuxo. A tecnologia de propulsão híbrida agrega funcionalidades herdadas da propulsão líquida como a possibilidade de re-ignição e o controle de empuxo.

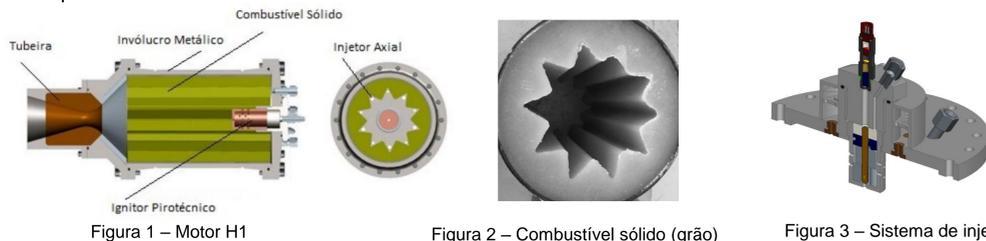


Figura 1 – Motor H1

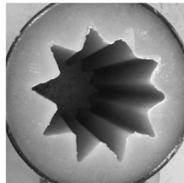


Figura 2 – Combustível sólido (grão)

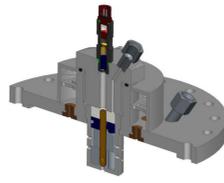


Figura 3 – Sistema de injeção

II. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA

O Banco de Ensaios dedicado ao motor H1 possui uma arquitetura hidro-pneumática (figura 4) que utiliza uma bateria de gases dividida em Gás Oxigênio (GOx) e Gás Nitrogênio (GN₂), um conjunto de válvulas de passagem e válvulas reguladoras de pressão e sensores de pressão na saída das baterias de gases e na entrada do cabeçote do motor. Na área de teste, um berço horizontal, figura 5, está equipado com uma célula de carga para medir o empuxo para motores de até 1kN. O sistema de controle é operado remotamente na sala de controle onde está localizado o hardware de aquisição de dados e de interface do sistema conforme ilustrado na figura 6.

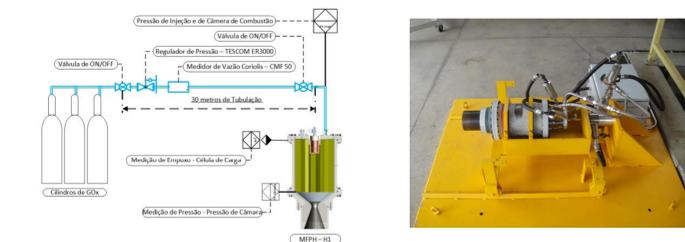


Figura 4 - Sistema hidro-pneumático



Figura 5 – Plataforma de ensaio instrumentada

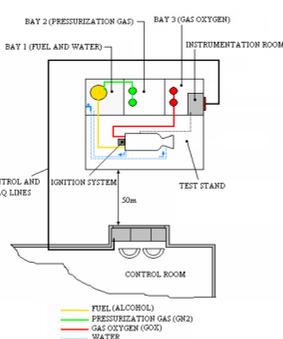


Figura 6 – Esquema de operação do Banco

III. REQUISITOS TÉCNICOS E OPERACIONAIS

Definidos os parâmetros a serem medidos durante as etapas de funcionamento do motor H1 (ignição, operação e desligamento) e os dispositivos para o controle de operação do banco (válvulas e medidores de vazão), requisitos de natureza técnica e operacional devem ser estabelecidos para garantir o cumprimento dos objetivos do ensaio a quente. Os requisitos (tabela 1) visam estabelecer padrões de projeto, rotinas bem definidas de acionamento do sistema e procedimentos de segurança mitigatórios de falha do motor. A figura 7 apresenta uma distribuição pertinente de processos para se atingir os presentes requisitos como verificado na documentação pertinente [3 e 4].

Tabela 1 – Requisitos Técnicos e Operacionais

| Requisitos Operacionais | |
|--|---|
| Sequenciamento automático pré-determinado de válvulas e dispositivos pirotécnicos para ignição do motor | Definição exata e invariável da sequência de acionamento do MFPH |
| Regulagem remota da pressão de GOx | Isola a área de testes e evita a exposição de operadores durante o ensaio |
| Botão de Emergência para rotina segura em caso de falha do motor foguete | Atua no momento da queima do motor interrompendo alimentação de GOx e metizando o motor com a abertura de N ₂ gasoso. Ainda realiza a despressurização da linha de GOx e o fechamento das garrafas |
| Acionamento manual | Permite o controle manual para testes de atuadores e dispositivos no pré-ensaio |
| Requisitos Técnicos | |
| Desenvolvimento do sistema segundo a arquitetura SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) | Viabiliza a divisão de funções do sistema nas camadas de hardware e software |
| Arquitetura Distribuída composta por PC Host e DAQ remoto | Implementa a arquitetura SCADA separando processos determinísticos e não determinísticos encarregados da aquisição e monitoramento do sistema |
| Sistema Operacional de Tempo Real (RTOS) em rotinas de aquisição e controle | Permite que o dispositivo de tempo real (controladora RT) execute o código nas temporizações esperadas sem atrasos inesperados que podem comprometer o ensaio |
| Registador de dados de no mínimo 1000 amostras por segundo no formato TDMS (Technical Data Management Streaming) | Registra os fenômenos observados pela instrumentação do sistema de teste e do MFPH a uma taxa de amostragem satisfatória para as frequências esperadas |

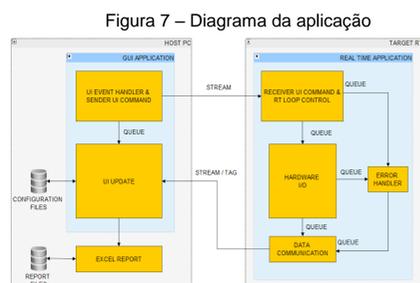


Figura 7 – Diagrama da aplicação

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a implementação do sistema de controle e aquisição de dados (SCADA) para o ensaio do motor H1 foram utilizadas como plataformas de desenvolvimento a linguagem de programação gráfica LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)^[4] e a plataforma de hardware baseada em PC PXI (PCI Extensions for Instrumentation)^[5]. A linguagem de programação foi escolhida devido à elevada integração com o hardware e ao seu módulo RTOS (Real Time Operating System) para controladoras de tempo real PXI. O PXI é composto por um chassis modelo 1031 de 4 slots comandados por uma controladora NI PXI-8196, um cartão NI PXI-8431 para RS-485 e um cartão multifuncional NI PXI-6289 para aquisição de sinais analógicos (0-10V) e saídas digitais TTL/CMOS para acionamentos discretos. A instalação e configuração do sistema foi realizada via NI MAX versão 15.0 facilitando ainda a definição das tarefas de aquisição de dados (DAQmx Tasks) empregadas no programa de aquisição e controle do sistema.

Os processos programados no PC host e no PXI estão baseados no padrão de projeto QMH (Queued Message Handler), uma versão robusta da arquitetura "produtor-consumidor" do LabVIEW. A principal vantagem da utilização da QMH para o projeto foi a execução paralela de diversas porções de código com diferentes taxas. Isso permite que a aquisição e atualização dos indicadores sejam realizadas de forma ininterrupta sem afetar a habilidade do operador de controlar o programa e completar os procedimentos de teste. Além disso, a QMH é uma arquitetura de alta escalabilidade, facilitando a adição e remoção de funções conforme necessidade, podendo até ser adaptada para diferentes projetos com pouco tempo de desenvolvimento. No PC host, os loops são controlados através de uma Event Structure. Essa estrutura capta a interação do operador com os controles da GUI (Graphical User Interface) exibida na figura 8, e envia mensagens para o loop Update da interface. O loop de Update da interface também é responsável por enviar mensagens ao PXI. No PXI, existem 8 loops (figura 9) implantados dividindo tarefas tais como comunicação com o PC host, aquisição de dados e controle automático da sequência de ensaio. Essa arquitetura é similar a QMH presente no host, sendo que a principal diferença está no uso de Timed Structures (estruturas de repetição rigorosamente temporizadas) nos VI's (Virtual Instruments) dos loops de aquisição e controle a fim de reforçar o determinismo da aplicação.



Figura 8 – GUI de controle e supervisão

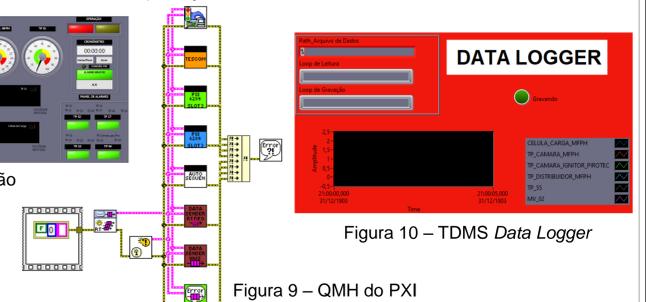


Figura 9 – QMH do PXI



Figura 10 – TDMS Data Logger

V. VALIDAÇÃO

A validação do sistema de controle e aquisição de dados considerou quatro pontos: a) capacidade de realizar o registro de dados nos requisitos estabelecidos; b) correlação entre as grandezas elétricas e as unidades de engenharia estabelecidas como parâmetros de ensaio; c) determinismo da aplicação de software tanto na aquisição de dados quanto no controle das rotinas de ensaio e, por fim; d) requisitos operacionais com destaque aos procedimentos de segurança mitigatórios de danos ao banco no caso de falha do motor. No caso do registrador de dados, o VI Data Logger (figura 10) cumpre o requisito de abrir, gravar e fechar arquivos no formato TDMS. Ainda, por meio do NI MAX, ficou estabelecida uma frequência de amostragem de 1kS/s (samples/second) por canal (valor que permite detectar frequências até 500Hz). No tocante à calibração das entradas analógicas destinadas às aquisições de pressão e empuxo do motor H1, os sensores puderam ser gerenciados também via NI MAX, tendo, inclusive, inseridas suas cartas de calibração para correções de erros e rastreabilidade metrológica. No caso do determinismo da aplicação, a escolha do PXI aliada ao padrão de projeto QMH viabilizou a solução do requisito. De fato, no ambiente RTOS, o paralelismo dos loops e a adoção de Timed Structures mantêm consistente a temporização programada nos estados (da máquina de estados) que aquisitam e interagem com a planta. Essa consistência pode ser checada via benchmarking (medição das temporizações dos loops). Por fim, foram ainda conferidas ao sistema as habilidades de controle manual sobre atuadores eletromecânicos, sequenciamento automático de ensaio e controle remoto da pressão de GOx via regulador eletrônico. Com destaque à segurança do sistema, um botão virtual de emergência foi implementado podendo ser acionado durante o ensaio a quente. A programação desse objeto na tela conduz a máquina de estados da sequência automática na direção de um procedimento seguro capaz de prontamente extinguir a queima do motor H1 e diminuir as concentrações de GOx no ambiente das instalações de teste.

VI. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do sistema de controle e aquisição de dados para ensaio do motor H1 foi realizado de forma satisfatória no que se refere à habilidade de ensaio, tendo como condições de contorno os requisitos operacionais e técnicos preestabelecidos. No decorrer do trabalho é possível notar que tão importante quanto o equipamento de teste é a arquitetura desenhada para o sistema, impactando no desempenho e principalmente na segurança da operação. Esse desenho pôde ser construído devido às características gráficas da linguagem LabVIEW e a sua integração com dispositivos RTOS da plataforma PXI. Essa habilidade da ferramenta aliada ao padrão de projeto QMH permitiu a implementação de processos críticos que demandam determinismo no sistema RTOS com grande flexibilidade e agilidade frente às demandas atuais do sistema.

REFERÊNCIAS

- Cardoso et al. "Preparation of Paraffin-Based Solid Combustible for Hybrid Propulsion Rocket Motor", Journal of Propulsion and Power, Vol. 33, No. 2, March-April 2017.
- ALMEIDA PRADO, André Neves de. "Identificação Empírica de um Sistema Propulsivo Híbrido". 2017. 100f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- RAMOS, Henrique KM et al. "Portable test system for jet engines through FPGA technology." In: 2018 IEEE AUTOTESTCON. IEEE, 2018. p. 1-8
- TRAVIS, J.; KRING J. LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun. 3 ed. Prentice Hall, 2006.
- RIBEIRO, David R. et al. Data acquisition system for turbojet engine using LabVIEW programming and PCI extensions for instrumentation. In: 33rd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. 2017. p. 3323.