Abstract

The development of pressure and flow control valves for hydrogen, particularly in its cryogenic liquid form, remains one of the most technically demanding tasks in aerospace propulsion engineering. Liquid hydrogen (LH_2) is a fluid with extraordinary properties: an extremely low boiling point of 20.27 K at atmospheric pressure, very low density, and a high tendency to penetrate even the smallest imperfections in containment systems. These characteristics make it an excellent propellant but also a substance that imposes strict requirements on every component it comes into contact with. Among these, valves for pressure reduction and regulation play a critical role, as they must guarantee precise and stable control over the fluid under a wide range of operating conditions.

Traditional pressure-reducing and regulating valves, designed for denser and less volatile fluids, often encounter serious limitations when used with LH_2. In particular, the rapid and localized pressure drops that occur inside the valve body can trigger flash vaporization of the liquid hydrogen, a phenomenon akin to cavitation. Once vapor bubbles form, they can collapse violently, causing erosion, vibration, and loss of sealing performance. These transient instabilities are difficult to predict and even harder to control, especially in systems where safety margins are already narrow. For this reason, innovative approaches are needed to ensure both performance and reliability.

In this doctoral research, two complementary valve concepts were conceived, each addressing a different aspect of hydrogen flow management. The first is a pressure-reducing valve specifically designed to lower the pressure of cryogenic hydrogen in a gradual and controlled manner, thereby avoiding conditions conducive to cavitation. The design relies on a sequence of chambers, or stages, separated by calibrated orifices. At each stage, the fluid loses a portion of its energy in a controlled way before passing to the next stage, preventing excessive localized pressure drops. This multi-stage layout allows the valve to transform a high upstream flow into a low downstream flow without abrupt transitions.

This device, named the Passive Pressure Reducer (PPR), is entirely static: it contains no moving parts, requires no external actuation or power, and is manufactured from a single monolithic block. The absence of joints and dynamic seals increases structural robustness and leak-tightness, an essential requirement when dealing with aggressive and low-temperature fluids such as LH_2. The fixed internal geometry determines the valve's performance, making it predictable and repeatable while significantly reducing the risk of mechanical failure.

To test the PPR without resorting to liquid hydrogen, which would entail very high costs and complex safety procedures, a dedicated hydraulic bench was designed and built. The bench uses water as the working fluid, exploiting fluid-dynamic analogy principles to reproduce the behavior of the cryogenic liquid under pressurized conditions. The structure of the bench includes a central housing capable of securely containing valve prototypes

during testing. This modular arrangement not only facilitates testing of the PPR but also makes it possible to accommodate other valve designs in the future, ensuring versatility and long-term usefulness of the facility.

The second valve developed in this work is a pressure regulator intended to work in series with the PPR. While the reducer is designed to handle the initial large pressure drop, the regulator fine-tunes the downstream pressure to the exact value required by the propulsion system. Unlike the PPR, this regulator contains moving parts to dynamically modulate the flow. This complexity makes it more challenging to prototype for early experimental validation, so its design phase relied heavily on computational fluid dynamics (CFD) simulations. These simulations assessed the regulator's ability to manage pressurized hydrogen and its compatibility with the PPR, paving the way for an integrated, high-precision pressure control system.

Even though the regulator has not yet been tested experimentally, the hydraulic bench was designed to accommodate it in future trials. Any valve body that fits within the dimensional constraints of the central housing can be installed and subjected to pressurized water testing. For initial tests, valve bodies were produced in high-temperature-resistant resin via additive manufacturing (3D printing). While unsuitable for cryogenic operation, these prototypes allowed rapid, low-cost validation of internal flow patterns, staged pressure drops, and overall structural behavior.

The combined development of the PPR, the regulator, and the hydraulic bench represents a comprehensive approach to solving the challenges of cryogenic hydrogen valve design. The PPR addresses the issue of cavitation by eliminating sharp, uncontrolled pressure drops and by using a passive, monolithic structure that maximizes robustness and reliability. The regulator, though more complex, offers the capability of precise, dynamic control to adapt to varying operating conditions. The hydraulic bench serves as an enabling tool, allowing these and other designs to be tested in a controlled and cost-effective environment.

By integrating conceptual design, numerical simulation, prototyping, and experimental validation within a single research framework, this work delivers both innovative components for cryogenic hydrogen systems and a reusable testing methodology that can accelerate future developments in the field. The results demonstrate that with the right combination of staged pressure reduction, passive architecture, and modular testing infrastructure, it is possible to overcome many of the limitations of traditional valve technology and move towards safer, more reliable hydrogen propulsion systems.

Sommario

La progettazione, la fabbricazione e la manutenzione operativa di valvole di regolazione della pressione e della portata per l'idrogeno, in particolare nella sua forma criogenica liquida, rappresentano una sfida ingegneristica significativa nel campo della propulsione aerospaziale. L'idrogeno liquido (LH_2), con il suo punto di ebollizione estremamente basso (20,27 K a 1 atm), l'elevata diffusività, la bassa densità e l'aggressività chimica, richiede un controllo preciso e stabile durante la fornitura ai sistemi propulsivi. Questo controllo deve essere ottenuto prevenendo instabilità di cambiamento di fase ed evitando rischi operativi.

Le architetture convenzionali di valvole riduttrici e regolatrici di pressione, sviluppate originariamente per fluidi più viscosi e densi, si rivelano spesso inadeguate con LH_2. Una delle criticità principali riguarda la loro suscettibilità a fenomeni simili alla cavitazione: cali di pressione improvvisi e localizzati all'interno del corpo valvola possono causare vaporizzazione istantanea del fluido criogenico. Questi eventi di micro-vaporizzazione, innescati da strati limite turbolenti o da geometrie di strozzamento accentuate, portano a instabilità di flusso, vibrazioni meccaniche, erosione delle superfici interne, degrado della tenuta e, in ultima analisi, a una riduzione dell'affidabilità.

In questo lavoro di dottorato sono stati sviluppati due progetti distinti ma complementari: una valvola di riduzione della pressione ottimizzata per l'idrogeno criogenico e una valvola di regolazione da accoppiare alla prima per un controllo preciso a valle. La prima è stata progettata per ridurre la pressione in modo graduale e controllato, evitando condizioni di cavitazione, mediante una configurazione multi-stadio in cui il fluido attraversa camere consecutive separate da orifizi calibrati. Ogni stadio dissipa parte dell'energia a monte, evitando cali di pressione eccessivi e mantenendo il flusso al di sopra della tensione di vapore dell'LH_2.

Questa valvola, denominata Passive Pressure Reducer (PPR), è completamente statica, priva di parti mobili e non richiede energia esterna. È realizzata come un blocco monolitico per garantire robustezza strutturale, tenuta e compatibilità con fluidi criogenici aggressivi. La geometria interna fissa determina le caratteristiche di riduzione della pressione, trasformando un flusso elevato in ingresso in un flusso ridotto in uscita senza transizioni brusche.

Per validare le prestazioni e l'integrità della PPR è stato progettato e realizzato un banco prova idraulico dedicato, utilizzando acqua come fluido di lavoro per analogia fluidodinamica, evitando i costi e le complessità dei test con LH_2. Il banco presenta una struttura modulare centrale in grado di ospitare diversi prototipi di valvola in un alloggiamento sicuro e compatto.

Il secondo progetto riguarda una valvola di regolazione della pressione, destinata a lavorare in serie con la PPR, capace di mantenere la pressione a valle ai valori richiesti. Questa valvola, più complessa, prevede parti mobili e per questo la sua progettazione è stata sviluppata e validata inizialmente tramite simulazioni CFD.

Sebbene non sia ancora stata testata sperimentalmente, il banco prova idraulico è già predisposto per ospitarla. I prototipi iniziali delle valvole sono stati realizzati in resina ad alta temperatura tramite stampa 3D, consentendo prove rapide e a basso costo.
Questo lavoro integra progettazione concettuale, simulazione numerica, prototipazione e validazione sperimentale, fornendo soluzioni innovative per valvole a idrogeno criogenico e un metodo di prova riutilizzabile, capace di accelerare lo sviluppo di sistemi propulsivi più sicuri e affidabili.