

MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO DE VENTO EM UM TÚNEL DE VENTO DE CIRCUITO FECHADO UTILIZANDO DOIS SENSORES EM DUPLO RANGE

Matheus Victor Ramos dos Anjos* Guilherme de Souza Papini**
Hugo César Coelho Michel***

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil (e-mail: matheusvra@ufmg.br)

** Dep. de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (e-mail: papini@demec.ufmg.br)

*** Dep. de Engenharia Eletrônica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (e-mail: hugomichel@ufmg.br)

Abstract: In a Closed Circuit Wind Tunnel, the measurement of the wind flow velocity is performed using a Pitot Tube associated with two pressure sensors. A typical instrumentation problem is, for speeds below 10 m/s (an important range for many aerodynamic tests), pressure sensors lose the capacity to provide adequate measures for the speed control of the tunnel. This work aims to relate the possible causes associated with the low precision and accuracy of the system in the mentioned range, to improve the measurement. A measurement using two sensors operating in series, i.e., in a split range is proposed, switching from one sensor to another smoothly. In the end, it is presented the identified problems with the new sensor installed, considering its dynamic and static behavior, relating them to the observed impacts regarding the chosen transition methods.

Resumo: Em um Túnel de Vento de Circuito Fechado, a medição da velocidade de escoamento do vento é realizada por meio de um Tubo de Pitot associado a dois sensores de pressão. Um típico problema de instrumentação é que, para velocidades abaixo de 10 m/s (faixa importante para muitos testes aerodinâmicos) os sensores de pressão perdem a capacidade de fornecer medidas adequadas para o controle de velocidade do túnel. Este trabalho, busca relacionar as possíveis causas associadas à baixa precisão e exatidão do sistema na faixa mencionada, com o objetivo de melhorar a medição. Propõe-se uma medição utilizando dois sensores operando em série, i.e., em faixas divididas (*split range*), realizando-se o chaveamento entre os sensores de forma suave. Ao final, apresenta-se os problemas identificados com o novo sensor instalado, no que se refere ao seu comportamento dinâmico e estático, relacionando-os com os impactos observados referente aos métodos de transição escolhidos.

Keywords: Split Range; Kalman Filter; Hysteresis Switching; Wind Tunnel; Pitot Tube.

Palavras-chaves: Duplo Range; Filtro de Kalman; Chaveamento com histerese; Túnel de Vento; Tubo de Pitot.

1. INTRODUÇÃO

Túneis de vento são instalações experimentais que têm por objetivo analisar o escoamento de ar ao redor de um modelo que representa, *e.g.*, um perfil aeronáutico, um modelo veicular, ou até mesmo uma aeronave completa em subescala, ou partes de uma aeronave em escala real, ou uma estrutura arquitetônica. Experimentos em túneis de vento são realizados baseando-se no princípio da reciprocidade do movimento da aerodinâmica, a partir do qual a análise do movimento de um corpo relativo a um fluido

pode ser substituída pela análise do escoamento do fluido ao redor do corpo sem que haja perda de informações.

O Laboratório de Aerodinâmica Experimental (LAExp), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), possui um Túnel de Vento de Circuito Fechado (TVCF) que está entre os maiores túneis de vento do Brasil, em termos acadêmicos, tendo capacidade pra gerar ventos de até 335 km/h (~ 93 m/s).

Atualmente, em sua seção de testes, o TVCF possui um Tubo de Pitot como elemento primário, ou sensor, para a medição da velocidade de escoamento de vento. O Tubo de

Pitot utiliza o diferencial de pressão (ΔP) entre a pressão total (P_T) e a pressão estática (P_E), ambas geradas pelo fluido em movimento em escoamento. O resultado é a pressão dinâmica (P_D), associada diretamente à velocidade de escoamento do fluido por meio da equação de Bernoulli.

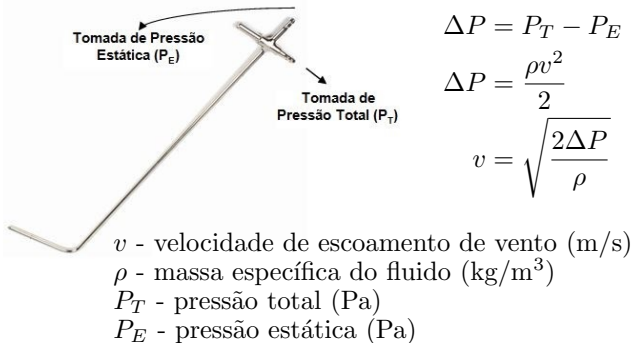


Figura 1. Tubo de Pitot utilizado no TVCF.

O Tubo de Pitot do TVCF, bem como seu princípio de medição, é mostrado na Figura 1. Na maior parte das aplicações aerodinâmicas, este sensor opera de forma adequada. Porém, em baixas velocidades, a medição do ΔP perde exatidão, precisão e a amplitude do ruído aumenta, o que implica em erros de medição maiores que a própria medida (Robinson et al., 2004).

Esta dificuldade de medição de pequenas velocidades é observada no TVCF do LAExp da UFMG, entre 0 e 10 m/s, onde pode ser verificado a perda de linearidade e repetibilidade e, conseqüentemente, de exatidão e precisão, comprometendo o controle da velocidade de escoamento do vento, bem como a qualidade dos testes realizados.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe o acréscimo de mais um sensor ao TVCF, funcionando em um *duplo range*¹ de medição com o Tubo de Pitot, *i.e.*, uma faixa de medição dividida entre os dois sensores, de forma que se obtenha uma medição final e confiável para a velocidade de escoamento de vento. O segundo sensor possui princípio de medição distinto do Tubo de Pitot, *i.e.*, não depende da pressão diferencial, bem como ele é capaz de medir na faixa de 2 a 10 m/s e suportar a sobre-faixa de até 100 m/s, sem sofrer danos.

A comutação entre os dois sensores deve seguir um critério que garanta a qualidade da medição (exatidão e precisão), principalmente na velocidade da comutação, 10 m/s. Portanto, uma terceira variável deve apresentar ao sistema de controle o resultado da medição da faixa completa, 2 a 90 m/s, mediante à junção das medições dos dois sensores. Dessa forma, o trabalho ainda apresenta dois métodos para se obter o *duplo range* de medição: o chaveamento direto com banda de histerese e a fusão sensorial utilizando Filtro de Kalman.

¹ O termo *duplo range* é equivalente ao termo *split range*, ou dupla faixa. Neste trabalho opta-se pela utilização do termo *duplo range*

2. TÉCNICAS DE CHAVEAMENTO ENTRE SENSORES

2.1 Técnicas Aplicadas Para Melhorar a Qualidade de Medições

Diferentes técnicas são utilizadas para na melhoria de medições, desde técnicas de filtragem de sinal, fusão, inteligência artificial e até mesmo soluções combinadas entre estas. Uma versão aprimorada do chaveamento simples de sensores é utilizada neste trabalho e também por Jie-Sheng Wang (Wang and Shen, 2015), em que uma banda de histerese (BH), impede múltiplas transições entre estados (estado de sensores, atuadores, etc.) na faixa de transição. Outra melhoria de qualidade em medições pode ocorrer por meio da fusão de dados provenientes de dois sistemas dinâmicos, *e.g.*, instrumentos de medição, com o intuito de obter uma informação mais precisa do que aquela observada de forma isolada em cada um deles. O Filtro de Reconciliação Dinâmica de Dados (*Dynamic Data Reconciliation Filter - DDR*) (Bai et al., 2006) é uma possibilidade para realizar fusão sensorial. Pode-se citar ainda, a fusão de dados utilizando o Filtro de Kalman Adaptativo (*fuzzy logic-based adaptive Kalman filter - FL-AKF*) (Escamilla-Ambrosio and Mort, 2003), que utiliza técnicas de lógica nebulosa para poder atribuir um grau de confiança para cada fonte de dados, onde realiza a fusão dos mesmos e após isso, obtém-se um valor final mediante a defuzzificação. Como dito anteriormente, este trabalho implementa uma fusão sensorial utilizando o Filtro de Kalman, melhor descrito no item 2.3.

2.2 Chaveamento Direto com Banda de Histerese

Em circuitos eletrônicos digitais, essa técnica tem como objetivo dar robustez ao circuito ao se determinar o estado binário de um ponto elétrico (Moraes et al., 2018). Para esse trabalho, uma das características que essa técnica apresenta é a rejeição da influência do ruído de medição na transição de um sensor para o outro, visto que a BH faz com que as transições entre os sensores sejam feitas em pontos diferentes. Outra característica é que essa técnica não possui dinâmica, *i.e.*, trata-se de uma máquina de estados finitos cuja variação de um estado para o outro é instantânea, ocorrendo após o disparo de um evento sinalizando a troca de estados que, no caso, refere-se à medida ser menor ou maior que os pontos definidos como limites da BH, h_{min} e h_{max} . Apesar da baixa complexidade, esta técnica apresenta problemas onde os sensores são fortemente influenciados pela dinâmica de medição.

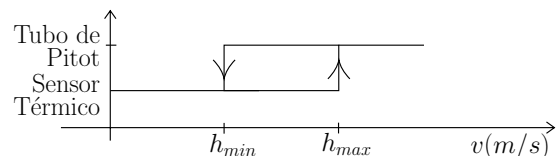


Figura 2. Histerese no chaveamento entre dois sensores de velocidade de escoamento de vento.

A Figura 2 representa o chaveamento de sensores com histerese, onde os dois pontos de operação no eixo vertical

representam os dois sensores, que trabalham de forma individual e excludente, enquanto o eixo horizontal representa os valores de medição e os pontos de transição de um sensor para o outro. O comportamento do sistema pode ser modelado por uma máquina de estado finitos contendo apenas dois estados, cuja transição de um estado para outro depende da velocidade de escoamento (v), como pode ser visto na Figura 3.

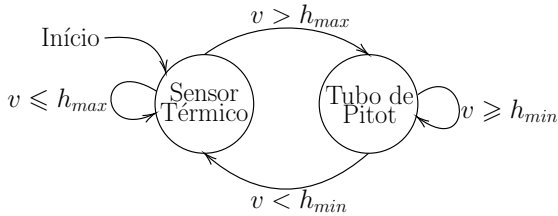


Figura 3. Máquina de estados finitos - Chaveamento com histerese.

A máquina de estados mostrada na Figura 3 começa sempre no sensor de baixa velocidade (por dispersão térmica, aqui denominado sensor térmico) e o túnel de vento sempre parte com o motor desligado, portanto, a velocidade inicial sempre é zero. Os valores h_{min} e h_{max} são os parâmetros da BH e podem ser modificados para ajustes.

2.3 Fusão Sensorial Utilizando Filtro de Kalman

Nomeado de acordo com Rudolf E. Kalman, o Filtro de Kalman é um dos algoritmos mais importantes e comuns no contexto de fusão de dados (Faragher, 2012). O que o torna tão útil é o seu baixo custo computacional, suas propriedades recursivas e o fato de ele ser um estimador ótimo para sistemas lineares com erros estatísticos gaussianos (Aguirre, 2015).

Modelando as duas medições como funções de densidade de probabilidade (PDF) $f_1(x|y_1)$ e $f_2(x|y_2)$, obtém-se uma combinação dessas medições, $f(x|y_1, y_2)$ capaz de estimar a grandeza x por meio das duas medições. Para tratar essa nova PDF, é necessária a utilização de elementos estatísticos denominados momentos. Dessa forma, assume-se que a PDF das medições combinadas pode ser modelada satisfatoriamente como sendo uma distribuição gaussiana.

Portanto, para se utilizar o Filtro de Kalman na fusão das medidas, é necessário apenas se determinar a média e o desvio padrão de cada medida, gerando assim, uma média e um desvio padrão, que é a combinação dos parâmetros isolados. Essa combinação possui estatisticamente uma qualidade superior à cada medida tomada de forma isolada, uma vez que o desvio padrão da combinação é sempre igual ou menor do que o menor dos desvios padrões (Aguirre, 2015).

A medição resultante da fusão pode ser modelada como a combinação ponderada conforme mostram as equações (1) e (2).

$$\mu = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot y_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \cdot y_2 \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \left(\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2} \right)^{-1} \quad (2)$$

Reescrevendo de forma mais compacta e direta, a medida combinada é representada por \tilde{y} , de acordo com a equação (3)

$$\tilde{y} = y_1 + k \cdot (y_2 - y_1) \quad (3)$$

$$k = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

em que y_1 representa a medição do Tubo de Pitot, y_2 a medição do IFM SL5201 e k é um fator de correção chamado ganho de Kalman.

Pode-se obter também a variância dessa estimativa ao se manipular a Equação (2), utilizando o ganho de Kalman da Equação (3), como é visto na Equação (4).

$$\tilde{\sigma}^2 = \sigma_1^2 - k \cdot \sigma_1^2 \quad (4)$$

As Equações (3) e (4) foram implementadas neste trabalho, conforme mostra a seção 3.2. Considerando um cenário hipotético onde apenas uma medida (y_1) é tomada, é evidente que essa medida é a melhor estimativa disponível. No momento em que uma segunda medida (y_2) é tomada, é possível incorporar a informação dessa nova medida na medida anterior, de forma a se ter uma estimativa nova, envolvendo as duas medidas, utilizando o fator de correção visto em (3). Essa estimativa é o resultado da fusão utilizando o Filtro de Kalman.

2.4 Rangeabilidade do Tubo de Pitot

O Tubo de Pitot possui uma faixa de medição ampla em comparação a outros sensores de velocidade de escoamento de vento. Porém, o seu desempenho cai em velocidades baixas, uma vez que a pressão total (P_T) diminui e se aproxima da pressão estática (P_E), gerando pressões dinâmicas (P_D) pequenas e difíceis de se medir, abaixo de 100 Pa (Robinson et al., 2004). No TVCF do LAExp, tanto a P_T , como a P_E são medidas e o ΔP é calculado pelo controlador, obtendo-se a P_D . Porém, estas últimas, geradas por ventos de baixa velocidade, também são pequenas em relação às típicas P_E , o que impacta diretamente na confiabilidade de medição da P_D (Robinson et al., 2004).

Além do exposto acima, é importante destacar que o Tubo de Pitot em questão é utilizado individualmente para uma faixa de velocidade de 0 a 90 m/s. Esta especificação implica em uma ampla faixa de medição de pressão, no qual as pressões geradas, quando o túnel opera em baixas velocidades, são pequenas a ponto de serem menores que a própria resolução dos medidores utilizados, modelo PN2028, da IFM Electronics, contendo repetibilidade de $\pm 0,1\%$ do *span* ($\pm 0,26$ mbar) e resolução de 0,5 mbar. Além da baixa capacidade de medição devido a resolução limitada, ainda se deve considerar o ruído de medição, que impacta diretamente na repetibilidade expressa deste medidor, podendo ser ainda maior que a resolução. A Tabela 1 apresenta a relação entre as velocidades de escoamento de vento no TVCF e as P_D geradas, considerando a densidade do ar à temperatura de 25 °C, $\rho = 1,1839$ kg/m³.

Como exemplo, observando a Tabela 1, uma velocidade $v = 8,00$ m/s, resulta em um $\Delta P = 37,885$ Pa, que equivale a 0,3788 mbar. Nessa velocidade, pode-se desconsiderar P_E do sistema, de maneira que a velocidade do

vento depende apenas da P_T . Portanto, tem-se uma pressão medida menor que a resolução do medidor PN2028.

Velocidade [m/s]	Pressão Dinâmica [Pa]	Pressão Dinâmica [mbar]
2	2,368	0,0237
4	9,471	0,0947
6	21,310	0,2131
8	37,885	0,3788
10	59,195	0,5920
20	236,780	2,3678
40	947,120	9,4712
60	2131,020	21,3102
80	3788,480	37,8848
90	4794,795	47,9480

Tabela 1. Relação entre a velocidade de escoamento de vento e a pressão dinâmica.

Em um primeiro momento, pode-se pensar na utilização de um medidor de pressão diferencial, em substituição aos dois medidores monométricos citados. Todavia, esse medidor deve ter capacidade de medir décimos de Pa em uma faixa de 25.000 Pa, *i.e.*, um medidor inexistente até o presente momento. Logo, o duplo range deve ser implementado, *i.e.*, utilizando dois medidores atuando de forma complementar e aumentando a amplitude de faixa da medição de velocidade de escoamento de vento para a faixa de operação projetada para o TVCF, 0 a 90 m/s.

Neste trabalho, utiliza-se um medidor baseado na dispersão térmica do fluido em escoamento para medição de velocidade na faixa de 0 a 10 m/s. O sensor térmico, assim denominado, é o modelo SL5201, da IFM Electronics (faixa de 2 a 10 m/s), instalado e em operação no TVCF em conjunto com o Tubo de Pitot. Por sua vez, o chaveamento entre eles é experimentado nesse trabalho, podendo ocorrer apenas com uma BH, ou utilizando a fusão sensorial por Filtro de Kalman, com o intuito de suavizar a transição de um sensor para outro.

3. IMPLANTAÇÃO DO DUPLO RANGE DE MEDIÇÃO

O TVCF é composto por um sistema de controle centralizado, onde todos os subsistemas ou sistemas periféricos se comunicam de forma direta com o Controlador Programável (CP), modelo AC1421, da IFM Electronics, ou com o sistema SCADA (*Supervisory, Control and Data Acquisition*) do TVCF.

O ambiente de desenvolvimento utilizado para programar o CP do TVCF é o CoDeSys v3.5 SP4. Nele, são configuradas todas entradas e saída (E/S) do CP, bem como a execução da aplicação de controle e automação e, ainda, a comunicação com a interface humano-máquina (IHM) do TVCF, que é realizada utilizando o serviço WebVISU, *i.e.*, telas de um sistema SCADA *web based*. É importante salientar que a programação de toda a aplicação, que executa no CP, utiliza o padrão IEC 61131-3, padrão propagado pelo CoDeSys. Portanto, a alteração de Blocos de Funções (FB) existentes é realizada seguindo o padrão. Um exemplo, é a alteração feita no FB responsável por calcular a velocidade do TVCF, baseando-se nas pressões medidas ($P_D = P_T - P_E$) e enviá-la ao FB, responsável

por realizar controle desta variável. A Figura 4 apresenta um esquema da alteração realizada:

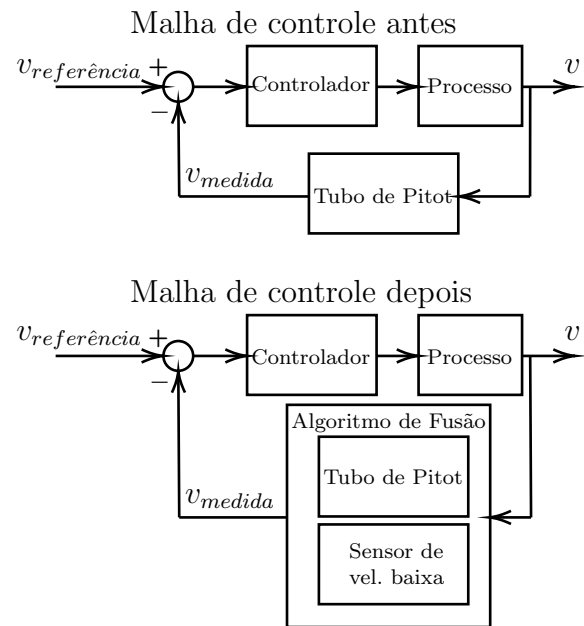


Figura 4. Malha de controle antes e depois.

3.1 Chaveamento com Banda de Histerese (BH)

A implementação da técnica de chaveamento com BH, realizada no CoDeSys, utiliza a máquina de estados finitos, mostrada na Figura 3. Portanto, em uma tarefa cíclica de 100 ms do CP, tem-se que, a cada ciclo de varredura, o próximo estado é definido a partir das medições e do estado anterior. Logo, cada estado define qual sensor vai governar a medição na malha de controle.

3.2 Chaveamento com Filtro de Kalman

A implementação da técnica de chaveamento utilizando fusão sensorial por Filtro de Kalman modifica a anterior de modo que, quando as medições estão dentro da BH, essa técnica fornece um valor filtrado pelo Filtro de Kalman (Equação (4)). Observe que este valor é a média ponderada pelas variâncias de cada medida.

Idealmente, a BH é uma faixa na qual ambos os sensores possuem confiabilidade suficiente para que cada medida seja considerada. Enquanto as duas medidas adentram, ou já se encontram, e ao menos uma delas permanece na BH, o Filtro de Kalman utiliza as duas medidas, considerando dois momentos estatísticos (média e desvio padrão) da PDF, descritores de cada medida. Para isso, é necessário que os dois momentos sejam calculados a cada iteração do algoritmo de controle, mesmo nos instantes em que o Filtro de Kalman não está ativo, permitindo a possibilidade de fornecer um valor válido para a saída, caso seja requisitado.

Os dois momentos estatísticos podem ser calculados recursivamente de acordo com a Equação (5) (Braga et al., 2013):

$$\begin{aligned} \text{Média: } y_k &= (1 - \alpha)y_{k-1} + \alpha \cdot u_k \\ (y^2)_k &= (1 - \alpha)(y^2)_{k-1} + \alpha \cdot u_k^2 \\ \text{Variância: } s_{u_k}^2 &= \frac{2 - \alpha}{2(1 - \alpha)} [(y^2)_k - y_k^2] \\ \alpha &= \frac{2}{M + 1} \rightarrow M = \frac{2}{\alpha} - 1 \end{aligned} \quad (5)$$

em que u_k é a medida no instante k ($k = 1, 2, 3, \dots$) e M é o tamanho da janela amostral para estimação da média e variância.

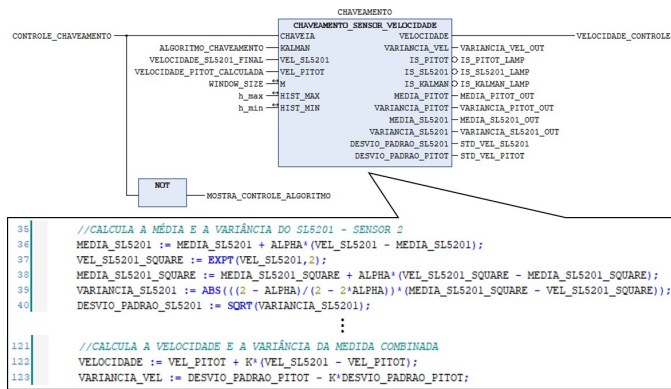


Figura 5. Trecho de código em texto estruturado implementado no CLP

Na Figura 5, tem-se o FB que implementa o algoritmo de chaveamento, com destaque para a transcrição das Equação (5), (3) e (4). A implementação é feita em um único bloco contendo uma máquina de estados finitos, com a possibilidade de escolha das técnicas de chaveamento, ajuste de parâmetros e verificação do estado do sistema. A linguagem de programação IEC 61131-3 dentro do FB é o Texto Estruturado (ST).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Vários testes foram realizados, mas alguns resultados são similares e podem ser bem representados em apenas três deles. O primeiro é o de chaveamento com histerese. O teste consiste em pequenos degraus de subida, aplicados em malha aberta, na velocidade de escoamento no TVCF, até que ocorra a ultrapassagem do valor h_{max} , enquanto seu valor aumenta. A Figura 6a mostra os valores da velocidade de cada sensor e a resultante da fusão dos dois sensores, além dos limites h_{min} e h_{max} da BH. Já a Figura 6b mostra duas variáveis booleanas que indicam qual sensor está fornecendo a medição de velocidade ao sistema de controle.

Como é possível observar, a transição de um sensor para o outro ocorre de maneira brusca, com um salto de cerca de 1 m/s, uma vez que os dois possuem medições destoantes durante a transição. Esse fato é devido às medições dos dois não convergirem para o mesmo valor durante a transição. Além da diferença significativa observada no tempo de convergência dos sensores, onde o Tubo de Pitot converge várias vezes mais rápido do que o IFM SL5201 (cerca de dez vezes mais rápido, dependendo do ponto de operação, uma vez que o IFM SL5201 é não linear). Esse comportamento é esperado, uma vez que a técnica de

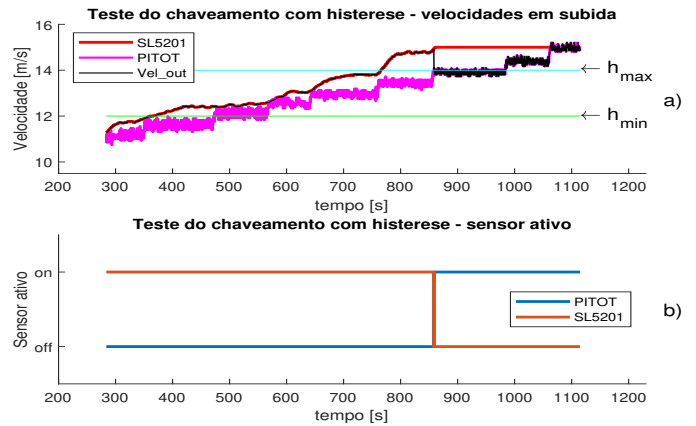


Figura 6. Chaveamento com histerese - subida

chaveamento utilizando o Filtro de Kalman é proposta para mitigar esse comportamento.

O segundo teste consiste no chaveamento com Filtro de Kalman na BH, conforme mostra a Figura 7.

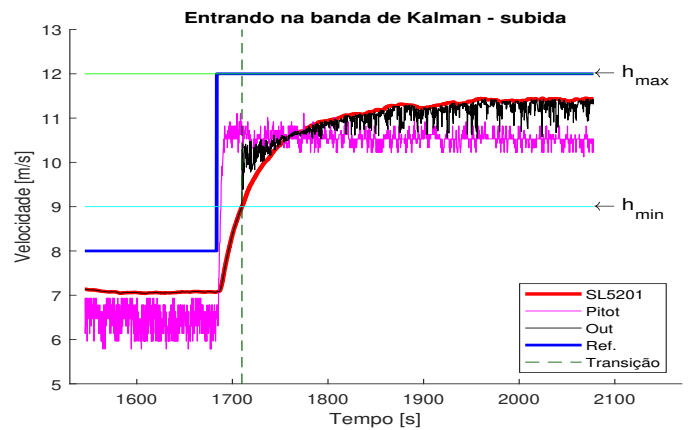


Figura 7. Chaveamento com Filtro de Kalman, entrando na banda

Na Figura 7, a velocidade do TVCF se encontra, inicialmente, abaixo da BH, *i.e.*, com a medição governada pelo IFM SL5201. Logo, com o aumento da velocidade, ambos os sensores adentram na BH e, assim, a medição final é a fusão das medidas do IFM SL5201 e do Tubo de Pitot. A transição para a medição resultante da fusão, *i.e.*, quando a medição é governada pelo resultado do Filtro de Kalman, tem-se um pequeno salto, uma vez que a medição resultante ocorre entre os valores de cada sensor, individualmente, apresentando uma diferença de aproximadamente 1 m/s em relação ao IFM SL5201 no momento da transição. Observando a Figura 7, percebe-se que o valor médio da medição resultante ocorre entre os valores médios das duas medições, porém, a medição de menor variância contribui mais para a fusão, como pode ser visto na Figura 7, onde a variável resultante da fusão, “Out”, fica mais próxima dos valores do IFM SL5201 e mais distante dos valores do Tubo de Pitot.

Vale ressaltar que, uma característica da medição resultante é que, neste caso em particular, ela absorve as características dos dois sensores, ou seja, a medição resultante possui uma dinâmica mais lenta que o Tubo de Pitot, devido à característica do IFM SL5201 e, ao mesmo tempo,

possui um ruído de maior amplitude que o presente no IFM SL5201, característica essa herdada do tubo de Pitot. Ambas as características citadas são indesejáveis.

O último teste também é com chaveamento utilizando o Filtro de Kalman, consistindo em um degrau partindo de um valor abaixo da BH até um valor acima da mesma, de modo que o Filtro de Kalman só atua quando os dois sensores estiverem simultaneamente na BH durante o regime transitório após o degrau. A Figura 8 apresenta os resultados.

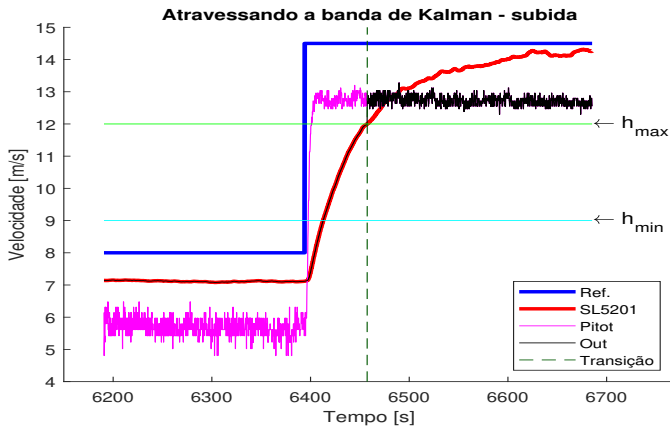


Figura 8. Chaveamento com Filtro de Kalman, atravessando a banda

A diferença no tempo de convergência entre os dois sensores é tão significativa que antes do IFM SL5201 entrar na banda de Kalman, o Tubo de Pitot já atravessa a banda e converge para o valor final após o degrau. Assim, o comportamento da técnica de chaveamento usando o Filtro de Kalman é o mesmo da técnica de chaveamento com histerese, onde após os dois sensores atingirem h_{max} na BH, ocorre o chaveamento do IFM SL5201 direto para o Tubo de Pitot.

5. CONCLUSÕES

Ambas as técnicas não funcionaram de acordo com o esperado, tendo como causa as características dinâmicas fortemente discrepantes dos dois sensores. A característica dinâmica lenta do sensor IFM SL5201 se dá pelo fato do mesmo ser baseado no princípio de dispersão térmica. Entretanto, a fusão sensorial ocorre com sucesso, mas em ambas as técnicas, as transições de um sensor para outro, ou de um sensor para a medida resultante da fusão, ou vice-versa, se mostram abruptas, gerando descontinuidades na medição resultante, o que não pode ocorrer. Portanto, ambas as técnicas fornecem resultados inadequados para controle em malha fechada, uma vez que na transição de um sensor para o outro, a medição final se torna fortemente não linear, gerando degraus que não refletem a velocidade de escoamento de vento real. Finalmente, este trabalho explicita uma condição para que o chaveamento suave ocorra com sucesso, *i.e.*, as dinâmicas dos dois sensores devem ser similares.

REFERÊNCIAS

Aguirre, L. (2015). *Introdução à Identificação de Sistemas*. Editora UFMG. doi:10.13140/RG.2.1.1616.7925.

- Bai, S., Thibault, J., and McLean, D.D. (2006). Dynamic data reconciliation: Alternative to Kalman filter. *Journal of Process Control*, 16(5), 485 – 498. doi:https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2005.08.002.
- Braga, L., Braga, A., and Braga, C. (2013). On the characterization and monitoring of building energy demand using statistical process control methodologies. *Energy and Buildings*, 65, 205 – 219. doi:https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.002.
- Escamilla-Ambrosio, P.J. and Mort, N. (2003). Hybrid Kalman filter-fuzzy logic adaptive multisensor data fusion architectures. In *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No.03CH37475)*, volume 5, 5215–5220 Vol.5. doi:10.1109/CDC.2003.1272465.
- Faragher, R. (2012). Understanding the basis of the Kalman filter via a simple and intuitive derivation [lecture notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(5), 128–132. doi:10.1109/MSP.2012.2203621.
- Moraes, L., Zimpeck, A., Meinhardt, C., and Reis, R. (2018). Evaluation of variability using schmitt trigger on full adders layout. *Microelectronics Reliability*, 88-90, 116 – 121. doi:https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.07.061. 29th European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis (ESREF 2018).
- Robinson, R.A., Butterfield, D., Curtis, D., and Thompson, T. (2004). Problems with pitots. issues with flow measurement in stacks.
- Wang, J.S. and Shen, N.N. (2015). Hybrid multiple soft-sensor models of grinding granularity based on cuckoo searching algorithm and hysteresis switching strategy. *Scientific Programming*, 2015, 1–11. doi:10.1155/2015/146410.