

Nº 179854

Desafios da metrologia avançada para a calibração de medidores de vazão

Nilson Massami Taira

*Palestra apresentada no
Encontro Técnico de Medição
de vazão de Saneamento, 2025,
Curitiba. 22 slides*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.

PROIBIDO REPRODUÇÃO

Painel 11 - Calibração de medidores de vazão em campo: práticas e desafios

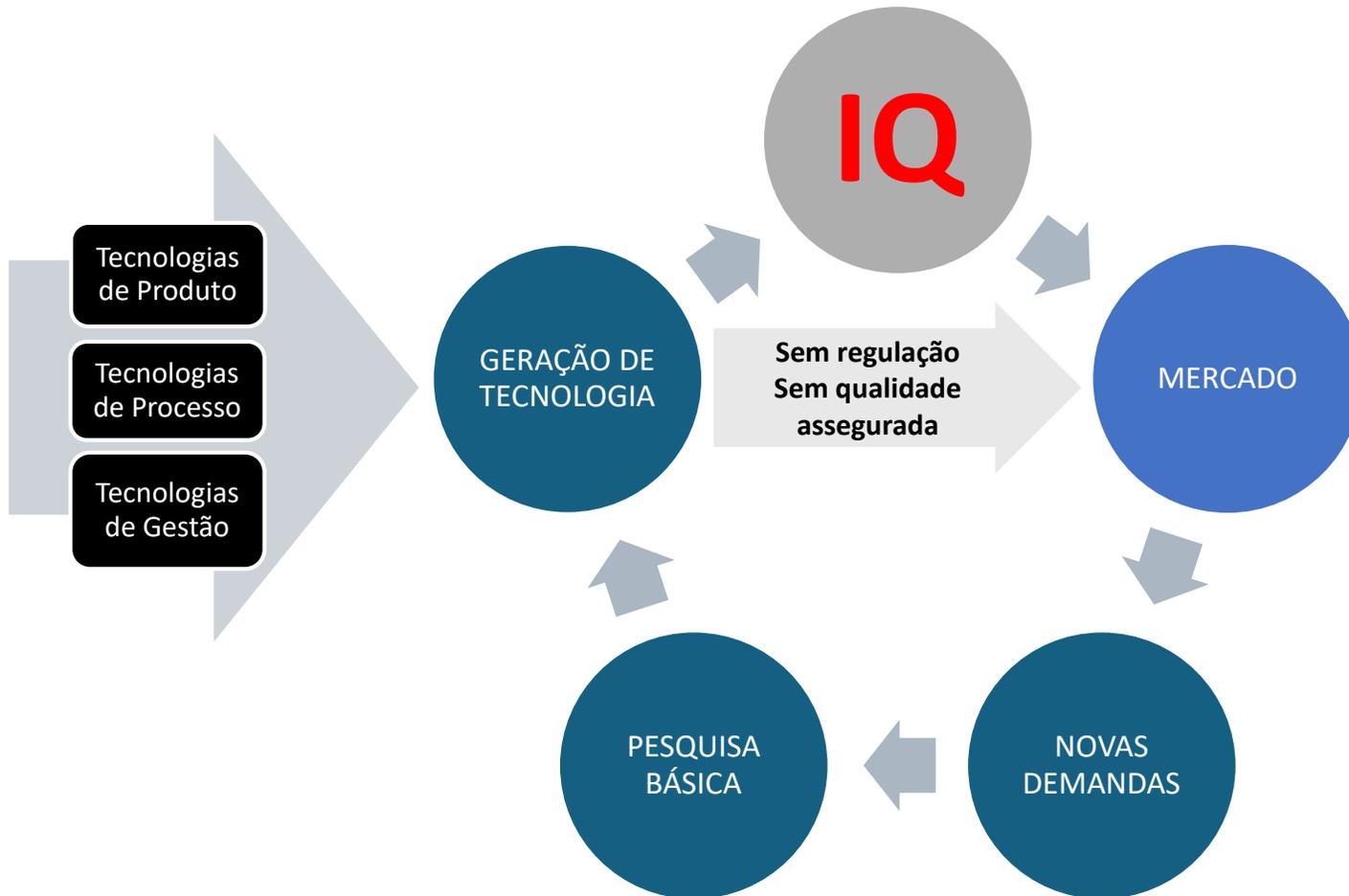
Desafios da Metrologia Avançada para a calibração de medidores de vazão

Nilson Massami Taira

Unidade Tecnologias Regulatórias e Metrológicas / IPT

Curitiba – PR 28.08.2025

CICLO DE INOVAÇÃO - INFRAESTRUTURA DA QUALIDADE (IQ)

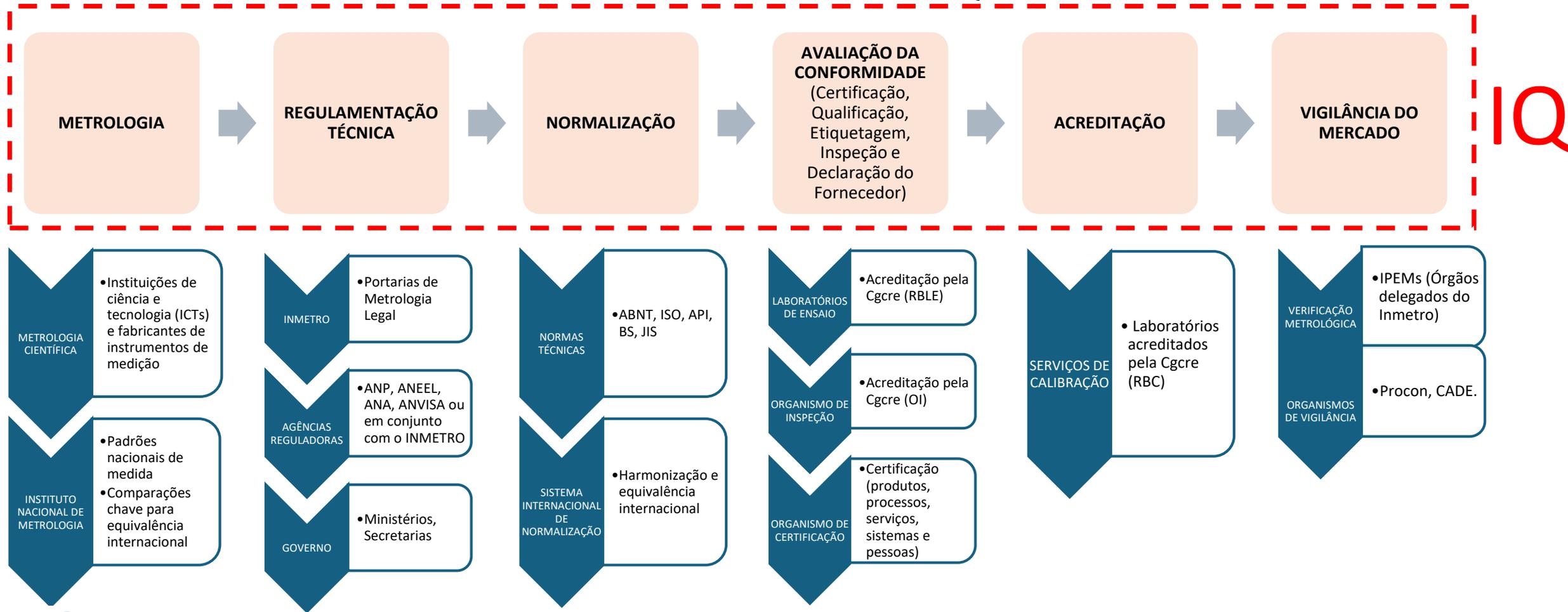


Monetização da IQ

Um relatório do *Bureau International des Poids et Mesures* – BIPM, apresenta uma estimativa de 3% a 6% do PIB nos países industrializados correspondem à medição e suas operações relacionadas.

Segundo a OCDE, 80 % do comércio global (24 trilhões de dólares em 2023) envolve testes e medições que confirmam a conformidade com regulamentos e normas.

INFRAESTRUTURA DA QUALIDADE



METROLOGIA CIENTÍFICA

- Instituições de ciência e tecnologia (ICTs) e fabricantes de instrumentos de medição

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA

- Padrões nacionais de medida
- Comparações chave para equivalência internacional

INMETRO

- Portarias de Metrologia Legal

AGÊNCIAS REGULADORAS

- ANP, ANEEL, ANA, ANVISA ou em conjunto com o INMETRO

GOVERNO

- Ministérios, Secretarias

NORMAS TÉCNICAS

- ABNT, ISO, API, BS, JIS

SISTEMA INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO

- Harmonização e equivalência internacional

LABORATÓRIOS DE ENSAIO

- Acreditação pela Cgcre (RBLE)

ORGANISMO DE INSPEÇÃO

- Acreditação pela Cgcre (OI)

ORGANISMO DE CERTIFICAÇÃO

- Certificação (produtos, processos, serviços, sistemas e pessoas)

SERVIÇOS DE CALIBRAÇÃO

- Laboratórios acreditados pela Cgcre (RBC)

VERIFICAÇÃO METROLÓGICA

- IPEMs (Órgãos delegados do Inmetro)

ORGANISMOS DE VIGILÂNCIA

- Procon, CADE.

TIPOS DE METROLOGIA E A INOVAÇÃO

Grau de normalização e regulação

Metrologia Legal (verificação)

Medidores de água, energia e gás, combustíveis, produtos pré medidos, balanças, termômetros, etilômetro, esfigmomanômetro, ...

Grau de segurança
jurídica

Demanda de
transformação
digital

Metrologia Industrial

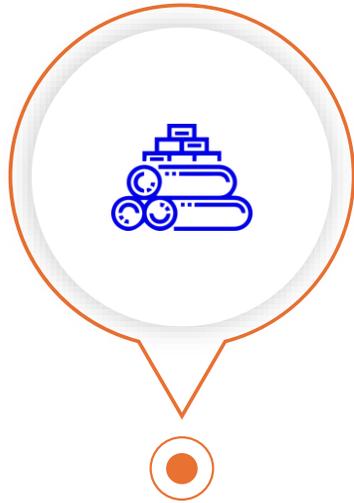
A metrologia industrial ou aplicada tem como objetivo apoiar as atividades de controle de processos e de produtos, assegurando a sua qualidade metrológica e também a gestão dos meios de medição que utiliza.

Metrologia Científica

Metrologia Científica é uma ferramenta fundamental no crescimento e inovação tecnológica, promovendo a competitividade e criando um ambiente favorável ao desenvolvimento científico e industrial em todo e qualquer país.

Grau de
inovação

Metrologia Avançada



2018
PDIP Chamada FAPESP



Metrologia do Futuro: Oito Perspectivas Estratégicas

01

Metrologia da Informação e do Produto Final com Qualidade Percebida

Vai além da medição tradicional de grandezas físicas. Amplia a metrologia tradicional ao quantificar aspectos da experiência do usuário, como conforto, usabilidade e confiança percebida. Integra medições físicas com análise de dados e avaliações subjetivas, essenciais em produtos e serviços onde a percepção do valor é tão importante quanto a conformidade técnica.

02

Metrologia da Imagem

Envolve a avaliação quantitativa de elementos visuais, como imagens médicas, satélites, inspeção óptica industrial e sensoriamento remoto. Integra técnicas de *visão computacional*, *fotometria*, *radiometria* e algoritmos de análise automatizada com rastreabilidade metrológica.

03

Metrologia do Serviço com Qualidade Suficiente e Ótimo Custo-Benefício

Prioriza a incerteza adequada ao uso, evitando excessos desnecessários de exatidão. Essa abordagem valoriza o equilíbrio entre qualidade entregue e custo, sendo essencial para avaliação e regulação de serviços públicos e privados com foco na eficiência e na percepção do usuário.

04

Metrologia do Byte

Trata da rastreabilidade e integridade de dados digitais: tempo de latência, perdas em transmissão, compressão, criptografia e verificação de integridade. É crítica na era da *IoT*, *blockchain*, metaverso e aplicações em nuvem com garantia de qualidade digital.

05

Metrologia Multivariada em Vários Domínios

Requer sistemas de medição capazes de operar simultaneamente em domínios distintos (tempo, frequência, espaço, clima, vibração etc.). Exemplo: sensores inteligentes que correlacionam pressão, vazão e composição química em tempo real.

06

Metrologia Analítica de Variáveis Simultâneas em Tempo Real

Envolve a captura, análise e decisão em ambientes altamente dinâmicos (como redes elétricas inteligentes, processos industriais autônomos ou veículos autônomos). Demanda metrologia com alta resolução temporal, tratamento de dados em fluxo contínuo (*streaming analytics*), e sistemas embarcados com confiabilidade metrológica.

07

Metrologia do Software

Avalia o desempenho, confiabilidade, rastreabilidade e reprodutibilidade de algoritmos e sistemas computacionais, incluindo tanto softwares determinísticos (como sistemas embarcados) quanto não determinísticos (como IA e aprendizado de máquina). Exige novos referenciais para testar, validar e calibrar comportamentos digitais.

08

Metrologia não Apenas da Medição com Exatidão, mas da Decisão Baseada na Medição

A metrologia deixa de ser fim em si mesma e passa a ser uma **metrologia para decisão**, capaz de sustentar políticas públicas, certificações de sustentabilidade, modelos econômicos baseados em dados e ações industriais em ambiente de incerteza.

Metrologia Avançada em Tempos de Dados e Algoritmos

Vivemos uma era em que a medição ultrapassa o físico. A inteligência artificial, o big data e o aprendizado por máquinas desafiam os limites da metrologia tradicional ao quantificar aspectos antes considerados subjetivos — emoções, decisões, comportamentos.

“Graças ao big data, à inteligência artificial e ao aprendizado por máquinas, pela primeira vez na história começa a ser possível conhecer uma pessoa melhor do que ela mesma, hackear seres humanos...”
— Yuval Noah Harari, 2018



Nesse novo cenário, a **metrologia deixa de ser apenas instrumento de controle técnico** e passa a ser **instrumento estratégico de compreensão e ação sobre sistemas complexos** — sejam eles sociais, computacionais ou híbridos.

Projeto IPT – ANA

Inspeção e calibração de sistemas de macromedição de água bruta

Transposição do Rio São Francisco



Planilha para determinação de vazão por mapeamento planimétrico
 referência: NBR 13800-2008

Elaborado por: Fernando A. Costa
 Data: 05/05/2024

Local de medição: Rio São Francisco (R. S. F.)
 Tipo de medição: Método de área de seção transversal
 Método de medição: Método de área de seção transversal

Diâmetro da tubulação: 1000 mm
 Área de seção transversal: 0,785 m²

Diâmetro do tubo: 1000 mm

Tabela Vertical					
posição (m)	distância corrigida (mm)	distância de seção efetiva (m)	velocidade (m/s)	velocidade corrigida (m/s)	velocidade corrigida (m/s)
0	0,000	0,000	0,00	0,00	0,00
1	0,081	0,081	1,71	2,20	2,20
2	0,203	0,203	2,01	2,60	2,60
3	0,324	0,324	1,50	2,10	2,10
4	0,445	0,445	1,41	2,10	2,10
5	0,566	0,566	2,10	2,70	2,70
6	0,687	0,687	2,10	2,70	2,70
7	0,808	0,808	2,10	2,70	2,70
8	0,929	0,929	2,10	2,70	2,70
9	1,050	1,050	2,10	2,70	2,70
10	1,171	1,171	2,10	2,70	2,70
11	1,292	1,292	2,10	2,70	2,70
12	1,413	1,413	2,10	2,70	2,70

Tabela Horizontal

posição (m)	distância corrigida (mm)	distância de seção efetiva (m)	velocidade (m/s)	velocidade corrigida (m/s)	velocidade corrigida (m/s)
0	0	0,000	0,00	0,00	0,00
1	0,081	0,081	1,71	2,20	2,20
2	0,203	0,203	2,01	2,60	2,60
3	0,324	0,324	1,50	2,10	2,10
4	0,445	0,445	1,41	2,10	2,10
5	0,566	0,566	2,10	2,70	2,70
6	0,687	0,687	2,10	2,70	2,70
7	0,808	0,808	2,10	2,70	2,70
8	0,929	0,929	2,10	2,70	2,70
9	1,050	1,050	2,10	2,70	2,70
10	1,171	1,171	2,10	2,70	2,70
11	1,292	1,292	2,10	2,70	2,70
12	1,413	1,413	2,10	2,70	2,70

Vazão medida (m³/s) **Vazão tratada (m³/s)**
 0,78 0,78

Velocidade (m/s)

velocidade corrigida	velocidade	Área	velocidade corrigida	velocidade
2,62	2,60	2,70	0,80	0,800

Medida PV: 0,807
 Média PV: 0,807

Medida PV: 0,807

Projeto IPT - ANA

Elaboração de manuais, guias e documentos orientativos



Cursos de capacitação para profissionais do setor



ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Superintendência de Fiscalização – SF e
Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica – SGH

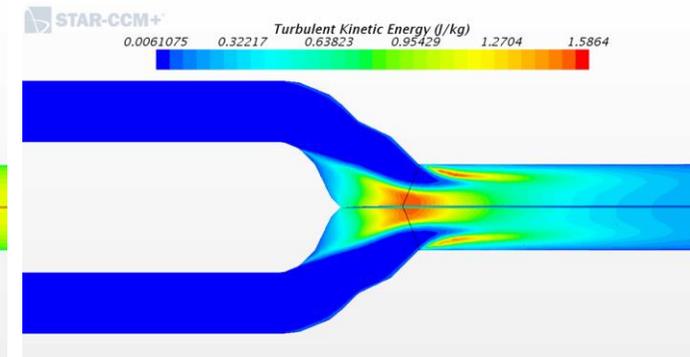
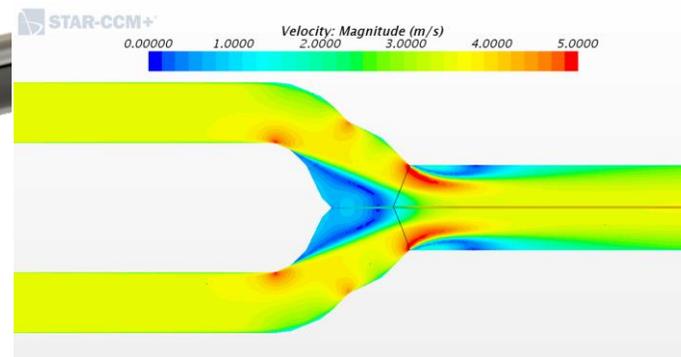
Projeto IPT – ANA Estudo para Utilização de CFD

Objetivo: Redução de incertezas associadas à assimetria do perfil de velocidades de cada seção da tubulação.

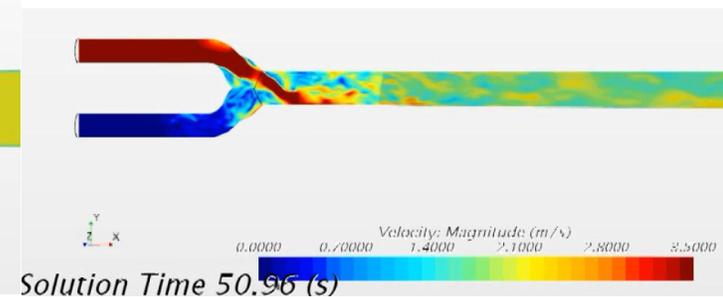
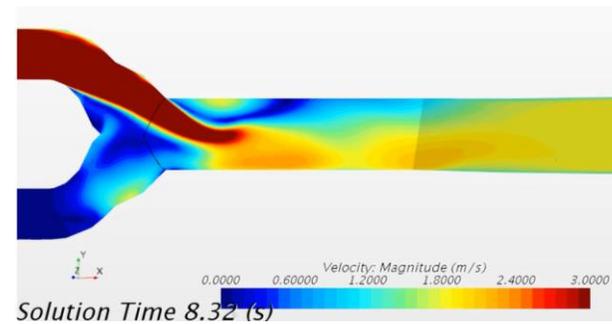
tubulação de 2,4 metros de diâmetro e 150 metros de comprimento



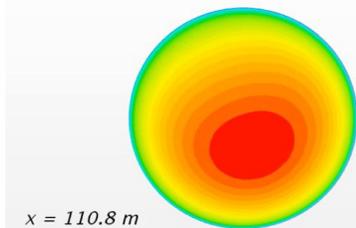
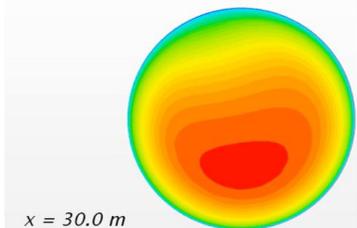
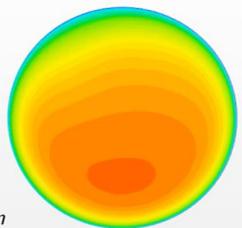
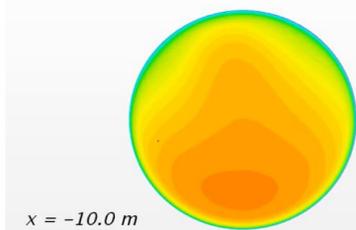
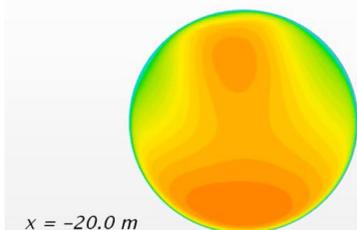
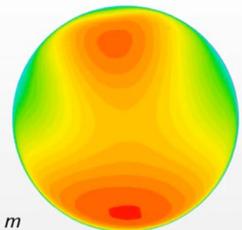
Modelagem da geometria



Campo de velocidades e energia cinética de turbulência



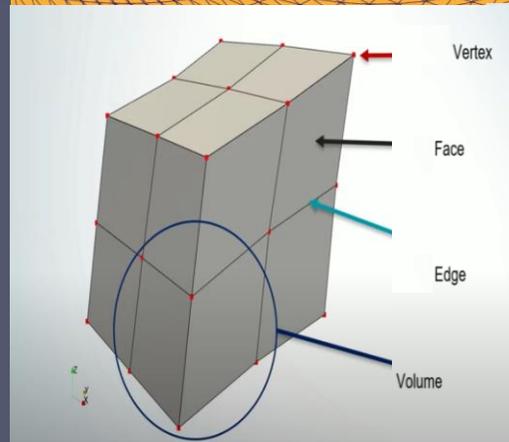
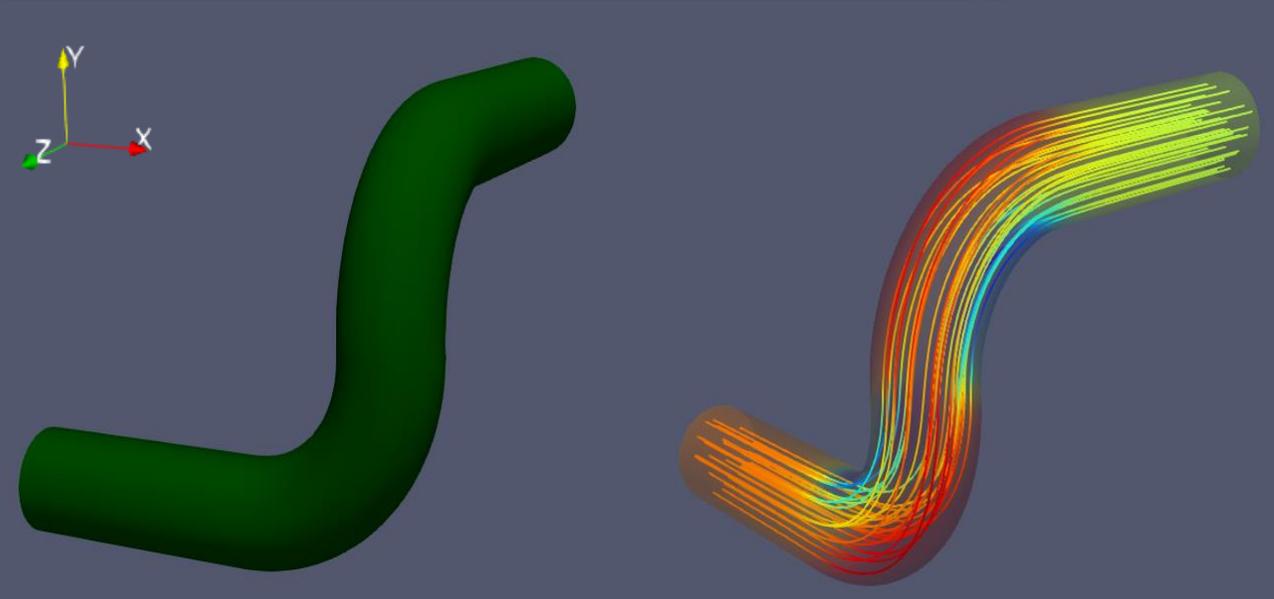
Transitório - 1 Bomba Acionada - Modelo de Turbulência – RANS e LES



Linhas de isovelocidades ao longo da tubulação

What is Computational Fluid Dynamics?

Colors for Directors
 Or
 Colorful Fake Dynamics



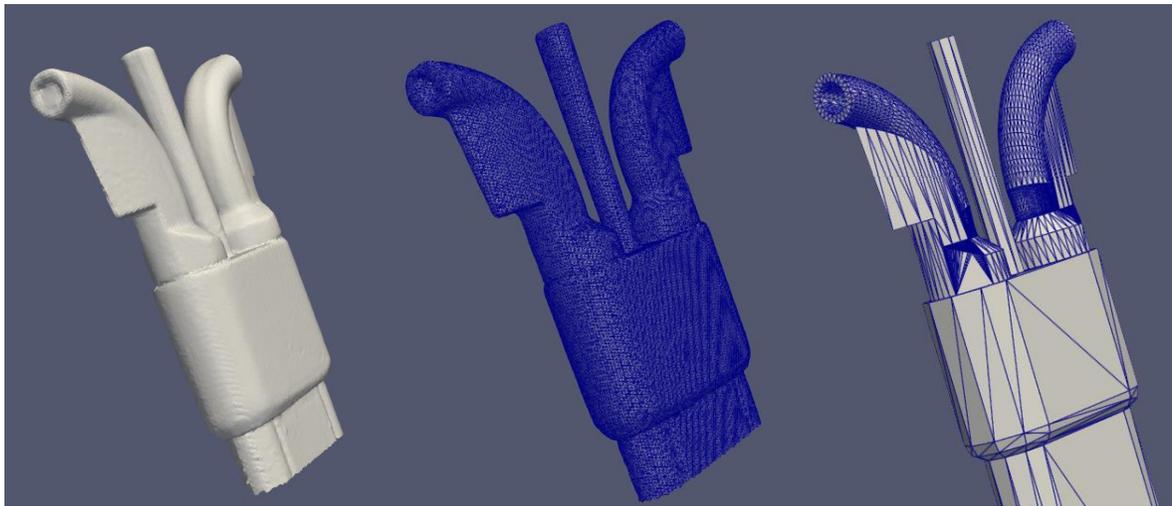
The Navier-Stokes Equations

MASS	ACCELERATION	FORCE
ρ	$\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right)$	$= \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \vec{v}$
Density of the Fluid	Change in Velocity over Time Speed and Direction of Fluid	External Forces such as Gravity Pressure Gradient Internal Stress Forces (viscous effects)

Newton's 2nd Law of Motion

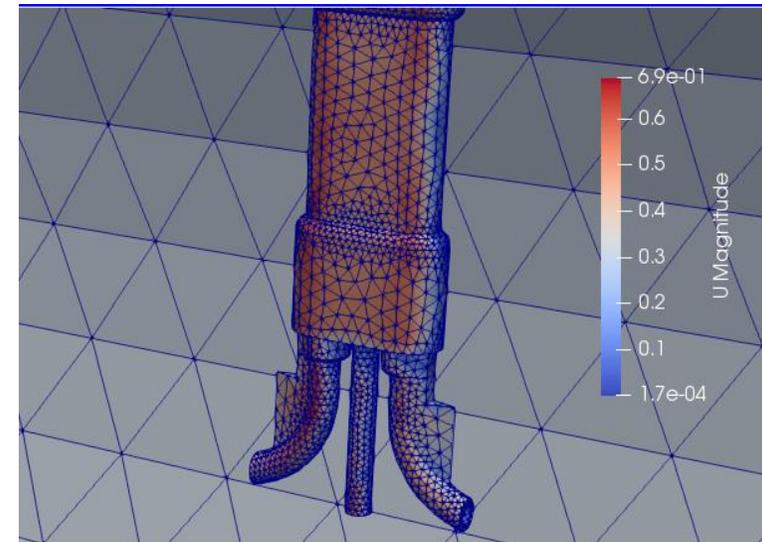
Calibração Numérica do tubo Pitot Cole

Modelagem de geometria de Pitot Cole



a) Imagem obtida por scanner b) grid do scanner c) imagem refinada

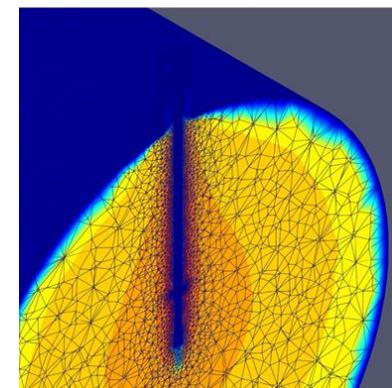
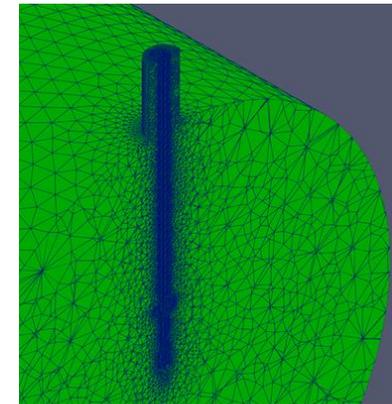
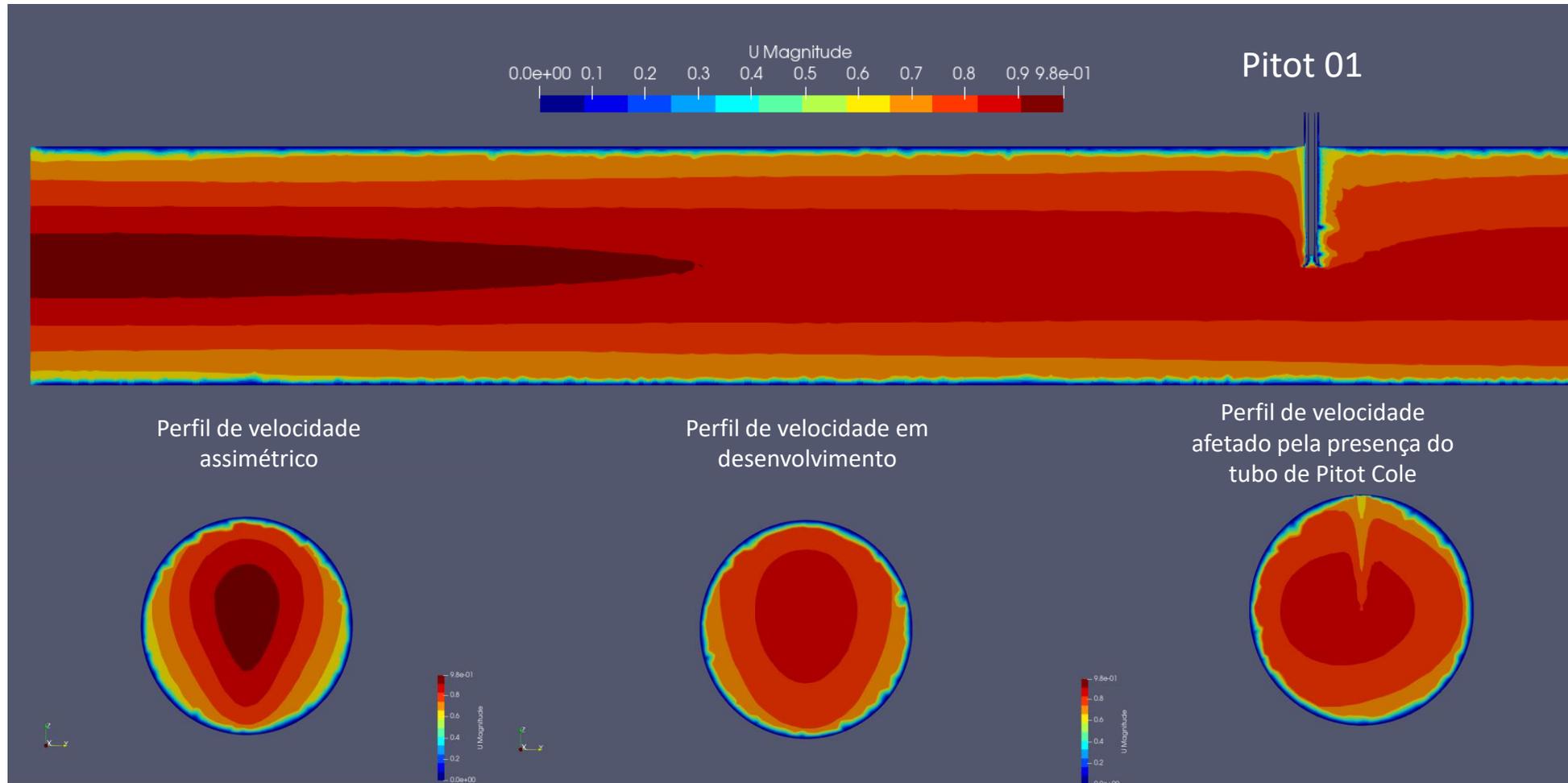
“Calibração” do Pitot Cole por CFD



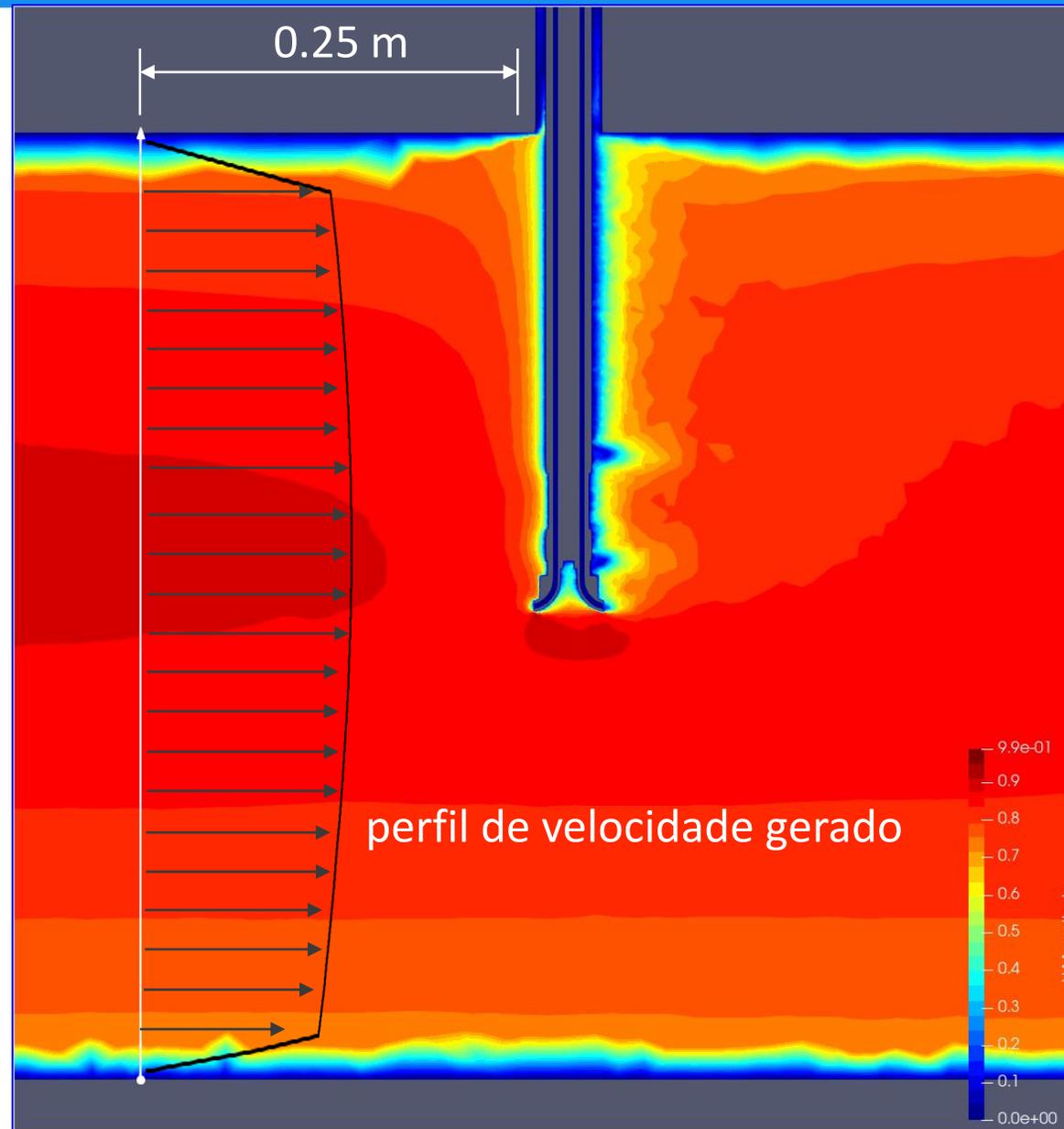
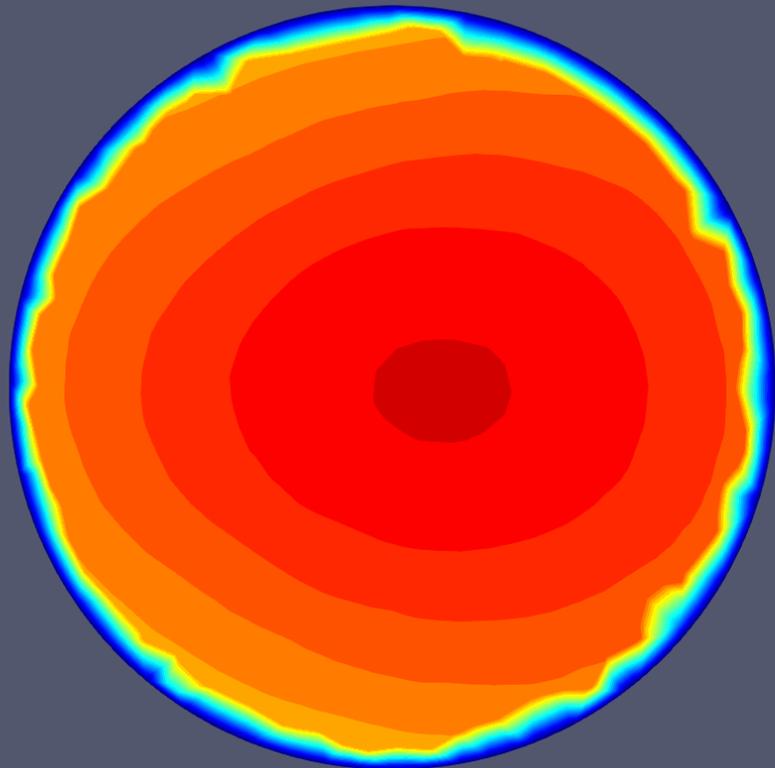
vel	Re/L	Cd experimental	Cd CFD	desvio
0.5	5.00E+05	0.884	0.875	-1.0%
1	1.00E+06	0.875	0.876	0.1%
2	2.00E+06	0.866	0.867	0.1%
3	3.00E+06	0.861	0.887	3.1%
4	4.00E+06	0.857	0.894	4.3%



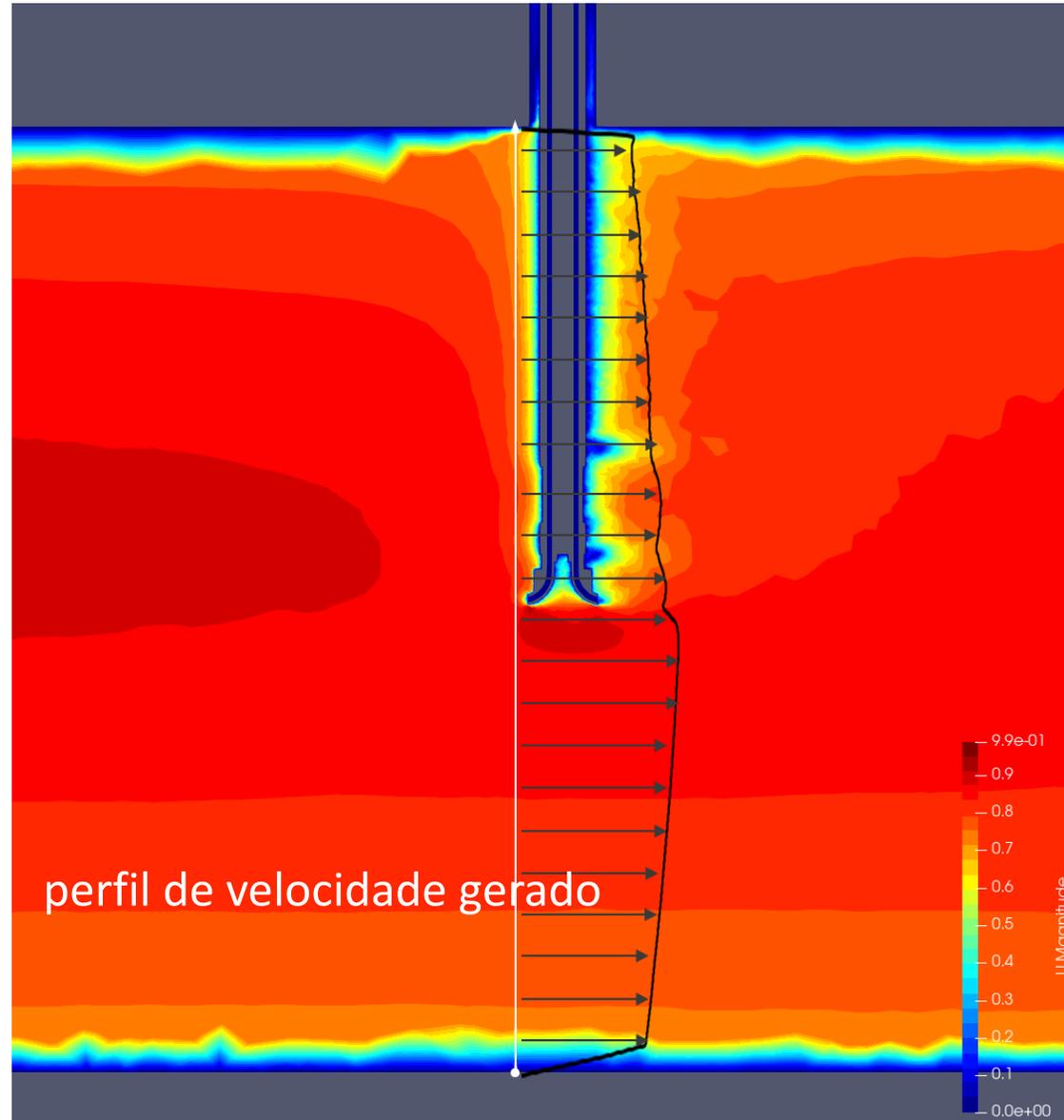
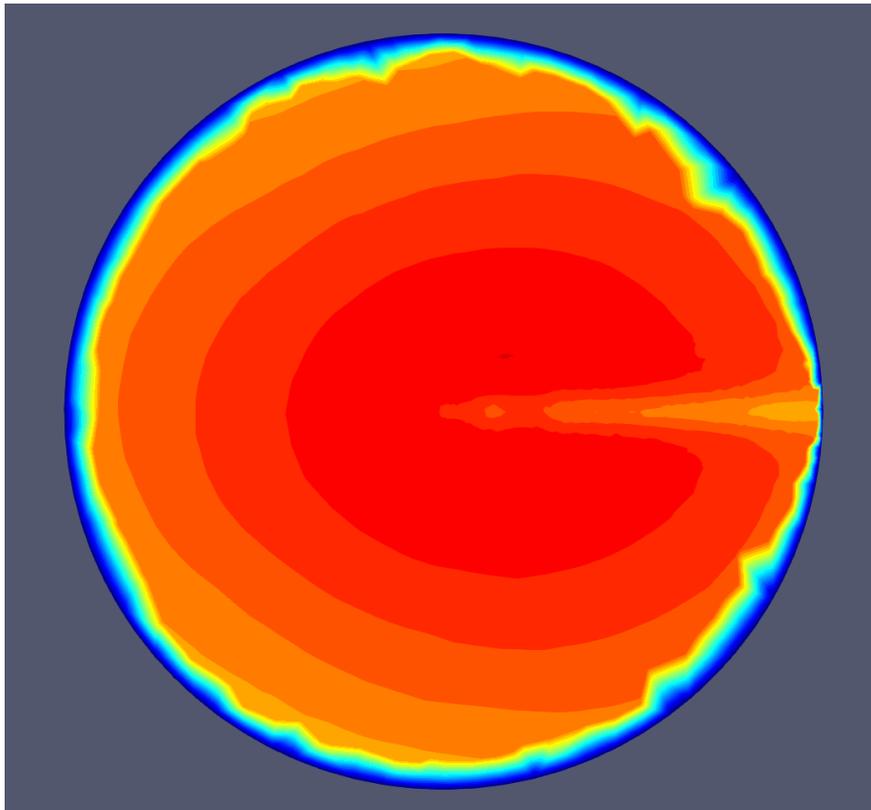
Gêmeo Digital de Pitometria



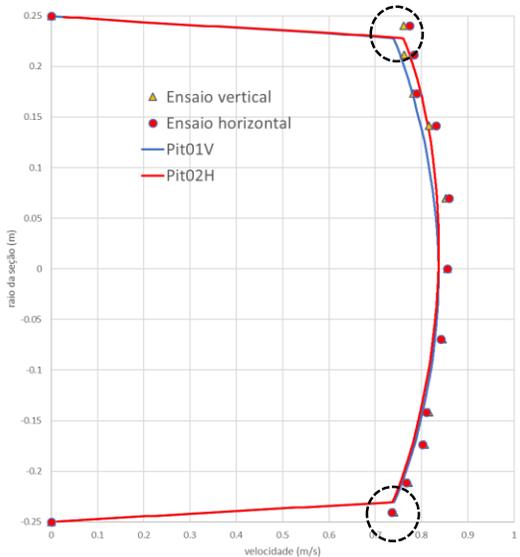
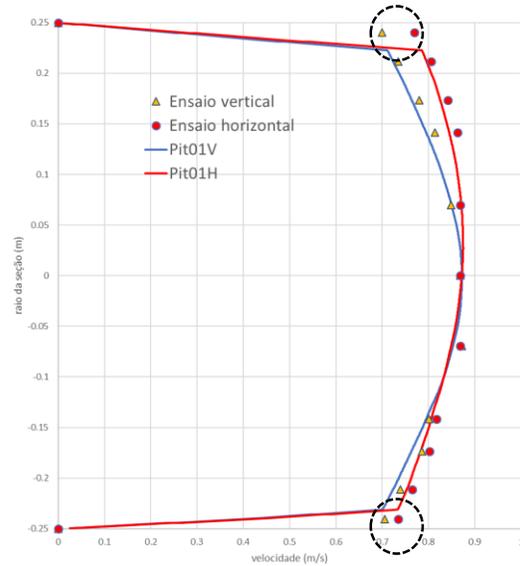
Linhas de isovelocidades “ao longe”



Linhas de isovelocidades próximas Pitot



Gêmeo Digital de Pitometria - Resultado



pitot01				
Caso	Vazão Simulação (L/s)	Vazão calculada (L/s)	desvio (%)	Incerteza (%)
ISO vertical	154.0	152.6	0.92	1.8
ISO horizontal		159.6	-3.5	1.8
ISO vert + horiz		156.1	-1.3	3.1
Manual vertical	154.0	156.0	-1.3	ND
Manual horizontal		162.0	-4.9	ND

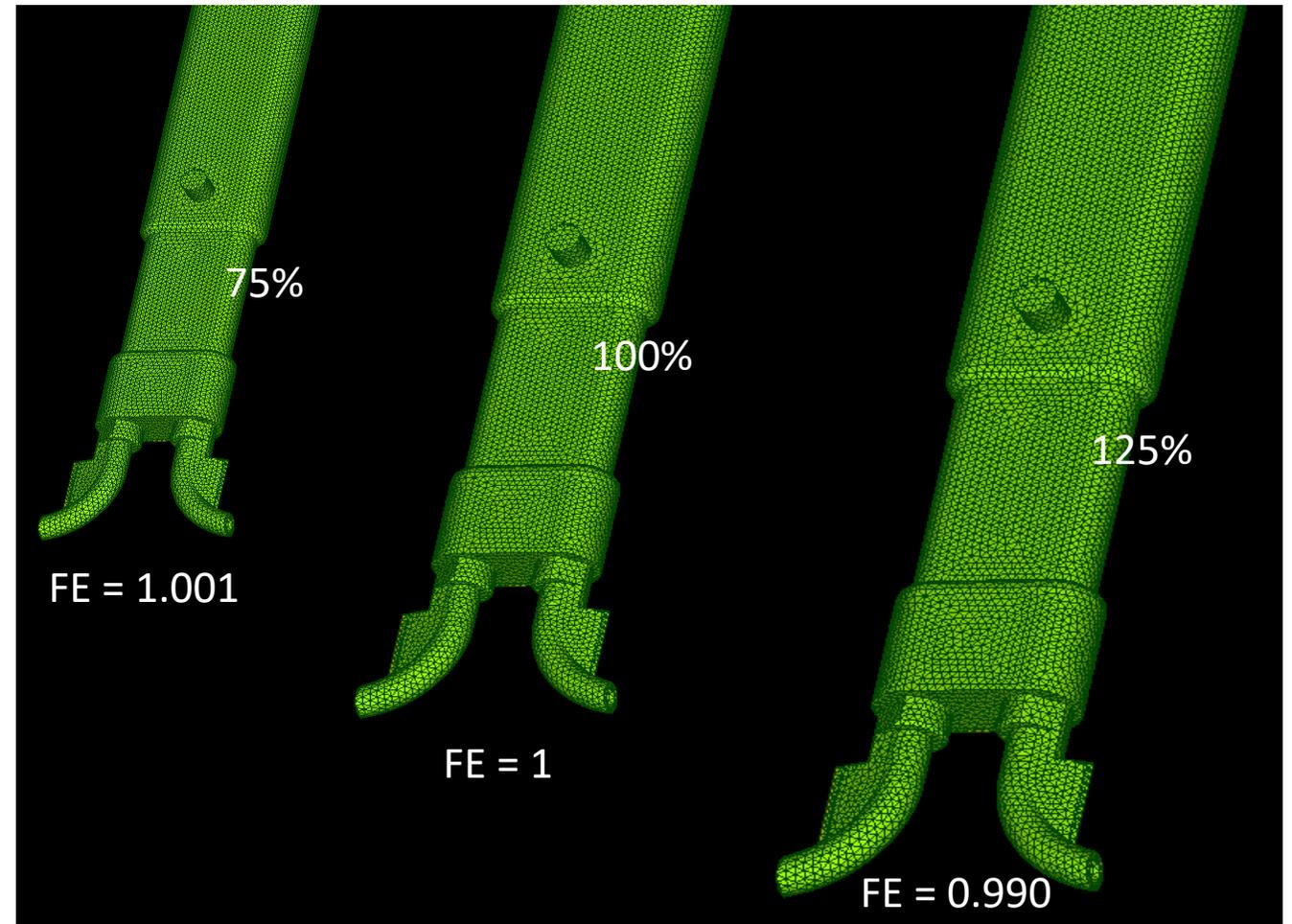
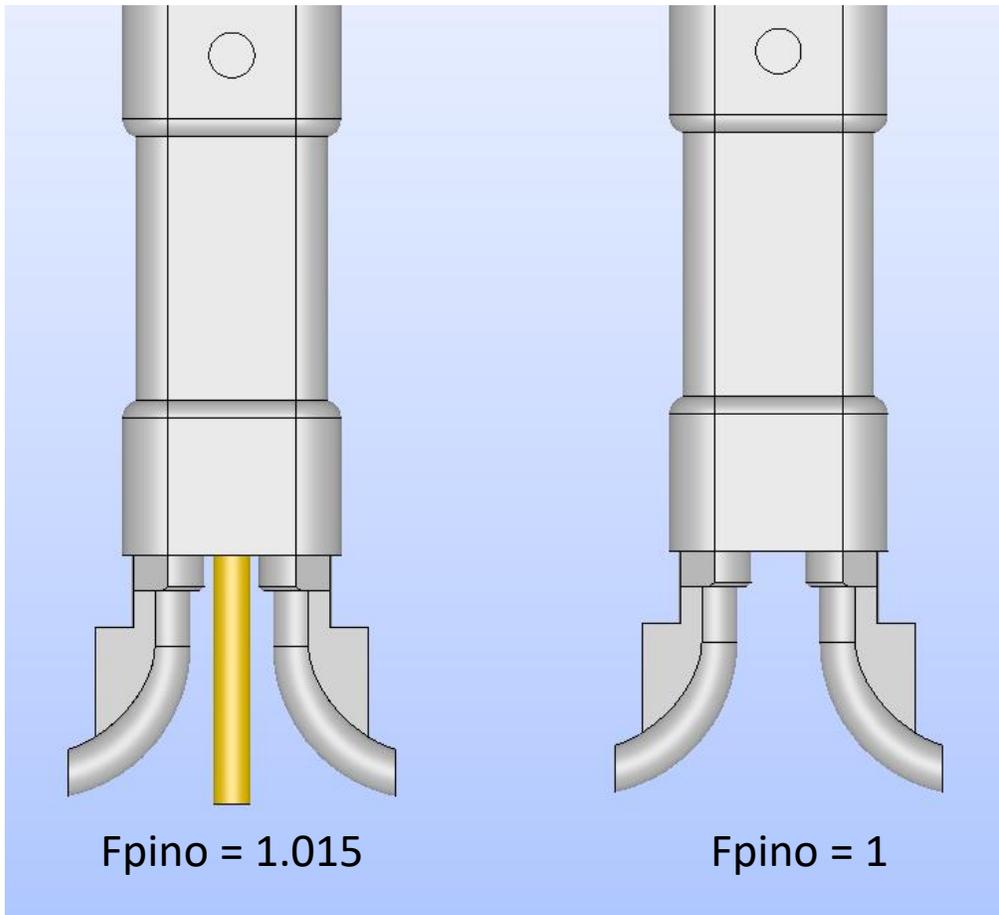
pitot02				
Caso	Vazão Simulação (L/s)	Vazão calculada (L/s)	desvio (%)	Incerteza (%)
ISO vertical	154.0	156.1	-1.3	1.8
ISO horizontal		156.9	-1.8	1.8
ISO vert + horiz		156.5	-1.6	1.9
Manual vertical	154.0	157.1	-2.0	ND
Manual horizontal		158.2	-2.7	ND

Perfis de velocidades para condição de Pitot na posição central

Camada Limite precisa ser melhorada

Pino → proteção do tip

FE → Fator de escala das dimensões do Pitot Cole

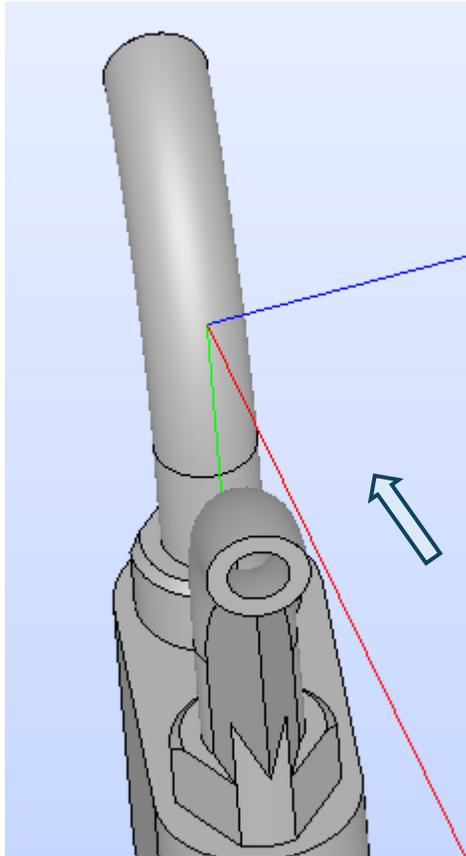


Validado experimentalmente

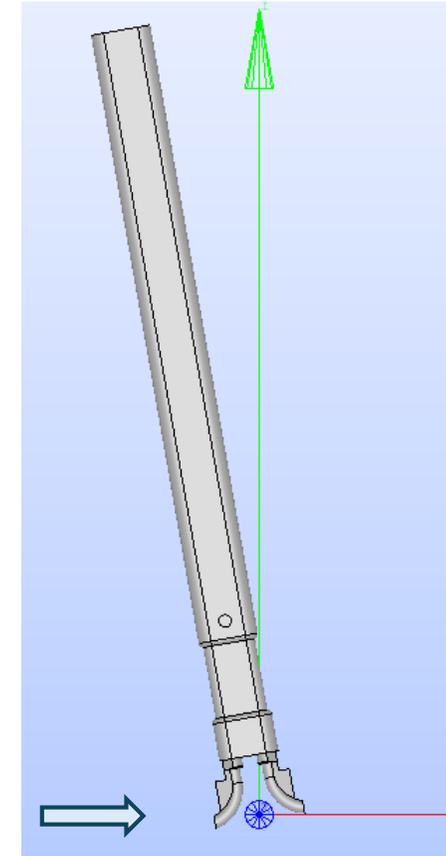
Não validado experimentalmente

FY → Efeito da rotação 10° (*yaw*) do tip

FY = 0.962



Validado experimentalmente

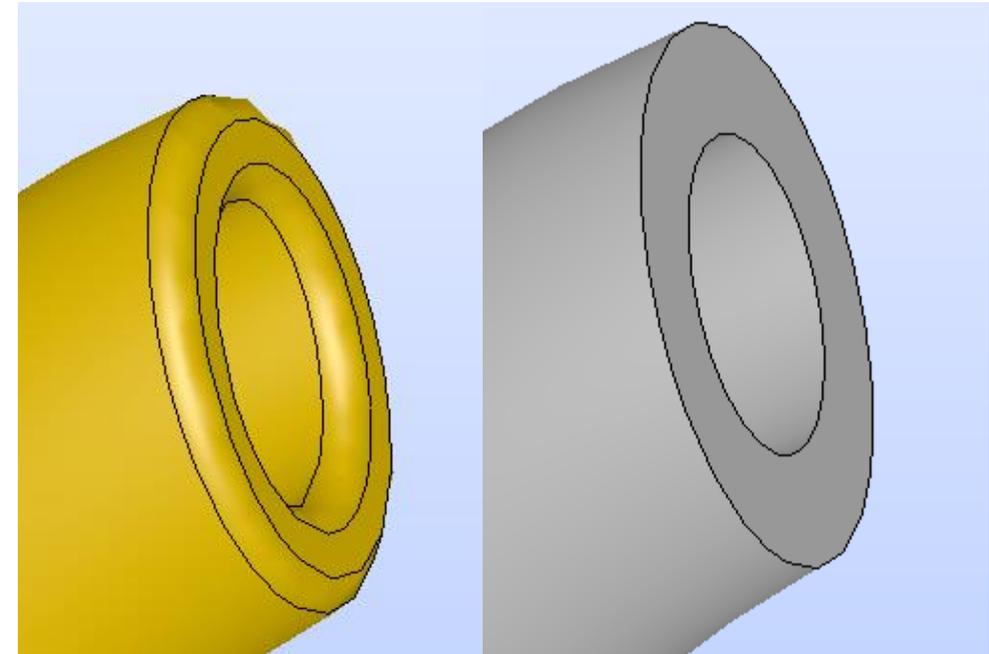
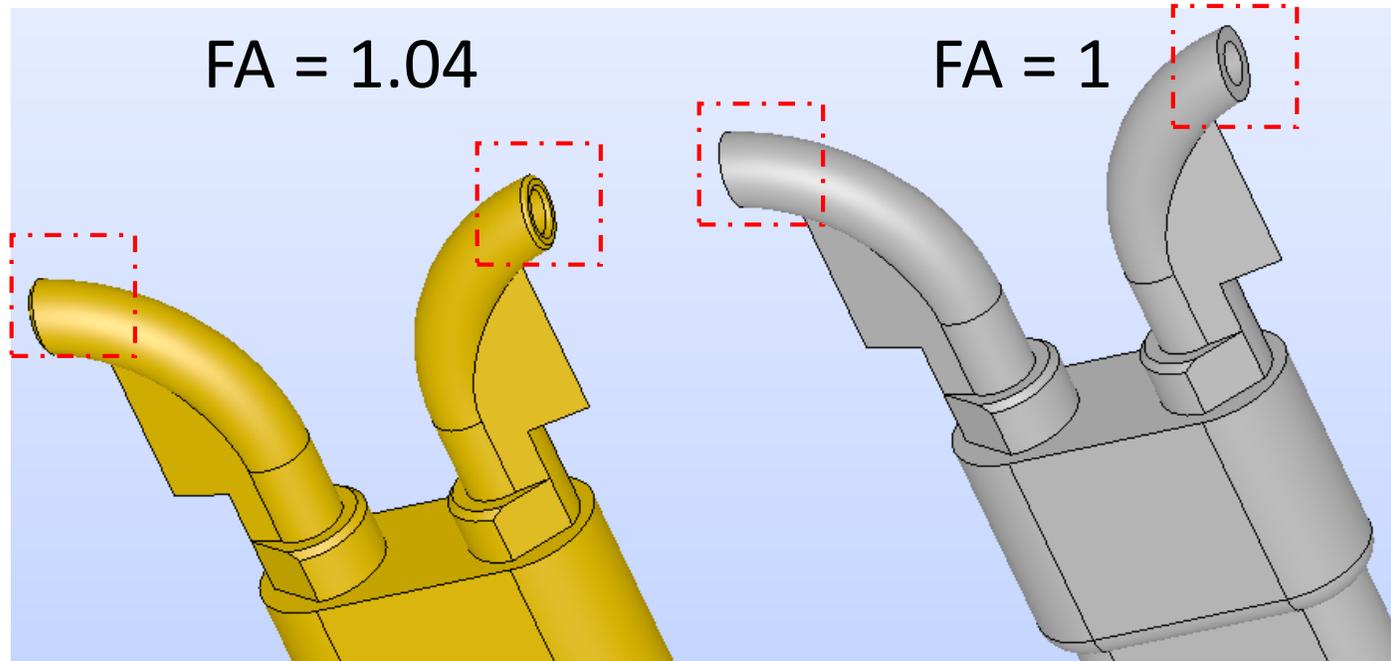


FR = 1.027

FR → Efeito da inclinação 10° (*roll*) do tip

Validado experimentalmente

FA → Efeito arredondamento do bordo do tip



Não validado experimentalmente

METODOLOGIA DE CÁLCULO DA VAZÃO SEGUNDO O MANUAL DE PITOMETRIA

$$FV_{\text{médio}} = \frac{\sum \sqrt{h_i}}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{h_c}}$$

Constante pitométrica

$$Q = V_c \cdot K_{ep} \cdot C_{dens}$$

$$K_{ep} = C_{diâmetro} \cdot C_{proj} \cdot S_{corrigida} \cdot FV_{\text{médio}}$$

Pino central
 Fator de escala do Pitot

$$K_{ep}^* = C_{diâmetro} \cdot C_{proj} \cdot S_{corrigida} \cdot FV_{\text{médio}} \cdot F_{pino} \cdot FE \cdot FY \cdot FR \cdot FA$$

Fator de arredondamento dos tips
 Fator de inclinação do Pitot
 Fator de rotação do tip