



INTERVALO DE CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO

William Nilson de Amorim⁽¹⁾

Doutor em Estatística pelo Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo (IME-USP). Sócio-fundador da R6 Estatística e Treinamentos LTDA.

Marcos Tadeu Pereira⁽²⁾

Doutor em Engenharia Mecânica, Professor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Área de concentração: medição de vazão, escoamento de fluidos, eficiência de bombeamento.

Danyllo Guedes⁽³⁾

Engenheiro Naval, danylloguedes@gmail.com

Olavo Alberto Prates Sachs⁽⁴⁾

Engenheiro Sanitarista, osachs@sabesp.com.br

Adauto Luiz de Souza da Silva⁽⁵⁾

Técnico Mecânico, adautosilva@sabesp.com.br

André Luiz dos Santos⁽⁶⁾

Engenheiro Elétrico, santosal@sabesp.com.br

Endereço⁽¹⁾: Rua da Consolação, 393, apto 14 - Consolação – São Paulo - SP - CEP: 01302-00 - Brasil - Tel: +55 (11) 9 7585-6537 - e-mail: wamorim@rseis.com.br.

RESUMO

O artigo mostra um estudo sobre a aplicação de métodos estatísticos e de engenharia para a definição de intervalos de calibração de medidores de vazão de grande porte, que são normalmente calibrados em campo por meio de tubos de Pitot do tipo Cole. A base de dados envolveu cerca de 200 medidores ativos, em média calibrados anualmente, no período de 2006 a 2019, e foi construída a partir da extração dos dados de calibração (data, vazão, incerteza, desvios de medição, diâmetros, marca e tipo de medidor) de relatórios eletrônicos. O resultado final, além da base histórica de calibrações, que permitiu diversas análises exploratórias sobre as medições, foi o desenvolvimento de um método eficiente para a estimativa de intervalos de calibração em função das características metrológicas de cada medidor. Todos os resultados foram disponibilizados em um painel analítico, uma ferramenta de gestão única para a análise metrológica de empresa de saneamento.

PALAVRAS-CHAVE: intervalo de calibração de medidores de vazão; incerteza de medição e intervalo de calibração; gestão metrológica.

INTRODUÇÃO

Um dos problemas de empresas de saneamento básico refere-se à garantia de qualidade de suas medições. No caso de São Paulo a rede de adutoras é bastante complexa e existem cerca de 400 medidores de vazão de grande porte instalados na região. Estes medidores têm que ser calibrados sempre que há solicitações internas dos vários setores da empresa, e também precisam ser verificados regularmente quanto aos desvios e incertezas de medição.

Os medidores representam um importante fator de qualidade e de imagem da empresa: servem para medir as transferências internas entre setores produtores e setores distribuidores, são usados na avaliação das perdas de produto (importante fator ambiental e de qualidade) e são também usados na venda para outras empresas e municípios. Todos estes medidores (com diâmetros variando entre 400mm e 2350mm) são calibrados em campo, contra a integração de velocidades por meio de Tubos de Pitot tipo Cole.

Essas calibrações envolvem ida a campo de viaturas equipadas com três operadores com instrumentos, logística de acertos de vazões estáveis com o setor operador do ramal, e frequentemente envolvem problemas de perturbação do tráfego de veículos. Ou seja, possui um custo e uma logística que não permitem a realização indiscriminada de calibrações.

A análise realizada possibilitará a otimização dos intervalos de calibração de forma a aumentar a eficiência do uso dos recursos da empresa, minimizando o risco de existir medidores desregulados em operação. Com o sistema

adotado para a visualização de todos os dados de calibração, um *dashboard*, criou-se uma ferramenta de nível gerencial que permite a qualquer dirigente acesso aos dados de qualidade destas medições e discussões baseadas em fatos e análises disponíveis instantaneamente.

OBJETIVO

O objetivo deste projeto de dois anos foi desenvolver uma metodologia que possibilitasse definir, dentro de critérios de engenharia e estatísticos, o intervalo de calibração ótimo para os medidores de vazão de grande porte da SABESP, com base tanto na utilização de recursos quanto na conformidade dos medidores, e que fornecesse uma ferramenta gerencial eficiente para a avaliação constante da qualidade das medições realizadas.

METODOLOGIA UTILIZADA

O estabelecimento de intervalos de calibração é mencionado explicitamente em diversas normas que tratam de qualidade e de laboratórios.

A ISO 17025, por exemplo, estabelece que um certificado de calibração não deva conter qualquer recomendação sobre o intervalo de calibração, exceto quando acordado com o consumidor ou imposto por restrições legais (como é o caso de instrumentos utilizados em transferência de custódia).

A ISO 9001 apenas afirma que onde for necessário validar resultados, os equipamentos de medição devem ser calibrados ou verificados em intervalos especificados.

ILAC-G24 estabelece que não é responsabilidade de organismos de certificação ensinar laboratórios como conduzir seus assuntos, sendo responsabilidade de cada laboratório escolher implementar qualquer, ou nenhum método, baseado em suas necessidades e sua avaliação dos riscos associados à sua decisão. Mas também aponta que é responsabilidade do laboratório avaliar a efetividade do método que escolheu implementar e aceitar as responsabilidades e consequências das decisões tomadas a partir do método escolhido.

No caso de macromedidores, as condições de campo e de operação tendem a ser bastante impactantes, e analisar os dados de que se dispõem parece ser muito mais rico e correto que adotar períodos arbitrários para a calibração.

Não há um texto normativo que explicita regras para estabelecer um intervalo de calibração de tipos genéricos de instrumentos e é razoável que assim seja, dada a imensa variedade de tipos de instrumentos, de variáveis medidas, de condições de utilização, de condições ambientais, tempo de uso, de princípios de operação. Uma regra geral é claramente impossível, abrindo-se então a perspectiva de inovação neste assunto.

O assunto reveste-se de importância em diversas situações, como por exemplo, em transações comerciais (transferência de custódia), onde a autoridade metrológica legal pode determinar arbitrariamente intervalos de calibração, ou em uma empresa que precise garantir qualidade de seus produtos e precise se assegurar da confiabilidade daquilo que está colocando no mercado.

Tomando o caso da empresa que precisa garantir a qualidade de seus processos, como as empresas de saneamento necessitam, é necessário controlar e executar a calibração de seus instrumentos. Uma questão importante é a definição do melhor intervalo de calibração de seus instrumentos, que assegure a confiabilidade de seu processo. Este intervalo não pode ser curto a ponto de acrescentar custos ou aumentar problemas de logística, mas também não pode ser longo a ponto de impactar a confiabilidade dos resultados e gerar prejuízos devido a medições erradas.

Deve-se ter em mente que um intervalo de calibração adequado é o que estabelece um equilíbrio entre o custo e a quantidade de trabalho que o processo de calibração demanda, dentro das especificações necessárias do instrumento. Existe a percepção de que os custos de calibração podem ser reduzidos com a extensão do intervalo de calibração, e a questão chave é encontrar um intervalo que considere riscos ao invés de usar um intervalo apenas pré-fixado.

Montagem da base de dados – uso de dashboard

A primeira etapa deste projeto foi a coleta das informações disponíveis sobre as calibrações de macromedidores de vazão realizadas pela SABESP de 2006 a 2019. As informações foram extraídas (na maior parte automaticamente) de relatórios eletrônicos (arquivos Word e PDF), validadas e estruturadas em uma base de dados, sendo cada linha



uma medição realizada em uma certa data e em um certo medidor. A construção dessa base histórica de calibrações foi o primeiro produto da análise.

O grande desafio dessa etapa foi tabular sem perda de informação o grande volume de dados não estruturados correspondendo ao histórico de calibrações dos 245 medidores. A solução foi a construção de um algoritmo em linguagem de programação R (2019, R Core Team) que lia os relatórios de calibração e extraía deles as informações de interesse: data da calibração, tipo do medidor (Venturi, Eletromagnético, Ultrassônico e medidores de inserção eletromagnético e ultrassônico), diâmetro, marca do medidor, vazão medida, desvio de medição e incerteza de medição.

Terminada a construção da base histórica, para auxiliar a análise, foi montado um painel analítico (*dashboard*), que permite a construção de diversas visualizações (e.g., gráficos e tabelas) para entender como o erro e a incerteza se comportam ao longo de tempo e como estão relacionadas com algumas características dos macromedidores (tipo e diâmetro).

Inicialmente, o dashboard foi alimentado com os dados referentes à base original, ou seja, com todos os dados disponíveis. Foi verificado que havia quantidade expressiva de erros grandes de medição (*outliers*), provenientes de situações que não são de interesse da análise de intervalos de calibração e cujos processos devem ser estudados de maneira separada, como queda de raios, vandalismo, roubo de fiação, defeitos em equipamentos secundários etc.

Foi decidido então realizar uma limpeza de dados pela análise de cada resultado de calibração, em cada data, em cada ponto de medição. Identificados estes pontos no dashboard, por meio de reuniões com os técnicos da SABESP foram identificadas medições nas quais a razão (ou razões) do alto valor de desvio de medição não é de interesse para a análise. Esses pontos, conseqüentemente, não foram incluídos na análise de intervalo de calibração.

Testes de modelos estatísticos

Finalizada a construção da base, passou-se a avaliar o melhor método estatístico para estimação dos intervalos de calibração dos macromedidores de vazão da SABESP.

Como existem vários métodos de abordagem para a análise de intervalos de calibração, foi feito um estudo de adequação de cada método aos dados disponibilizados pela SABESP, e às condições reais de utilização e implementação de um programa que definisse os intervalos de calibração dos macromedidores da empresa.

A definição do método mais adequado deve seguir alguns critérios de seleção, como apontados no documento *RPI (Recommended Practice for Establishment and Adjustment of Calibration Laboratories)*, do *International Calibration Intervals Committee* da *NCSL (National Conference of Standards Laboratories)*.

Foi utilizada inicialmente uma abordagem estatística ampla, sendo elaborados e testados diversos procedimentos citados na *RPI* para tratamento dos dados, visando verificar a adequabilidade dos modelos matemáticos à natureza dos dados disponíveis. Por motivos de espaço serão apenas mencionados sem maiores detalhes.

Os procedimentos da *RPI* descrevem modelos de confiabilidade, definida como a probabilidade de um instrumento estar conforme em um determinado instante do tempo. O modelo de confiabilidade mais tradicional, conhecido como método binomial, supõe a existência de um processo de desgaste do equipamento que provoca, no caso dos medidores de vazão, o aumento constante do desvio de medição ao longo do tempo (ou a diminuição constante da confiabilidade ao longo do tempo). Essa suposição, no entanto, não foi satisfeita pelos dados de calibração da Sabesp. Como se pode ver nas figuras a seguir para os medidores do tipo Eletromagnético e Venturi, a confiabilidade não é monótona decrescente ou nem mesmo decrescente.

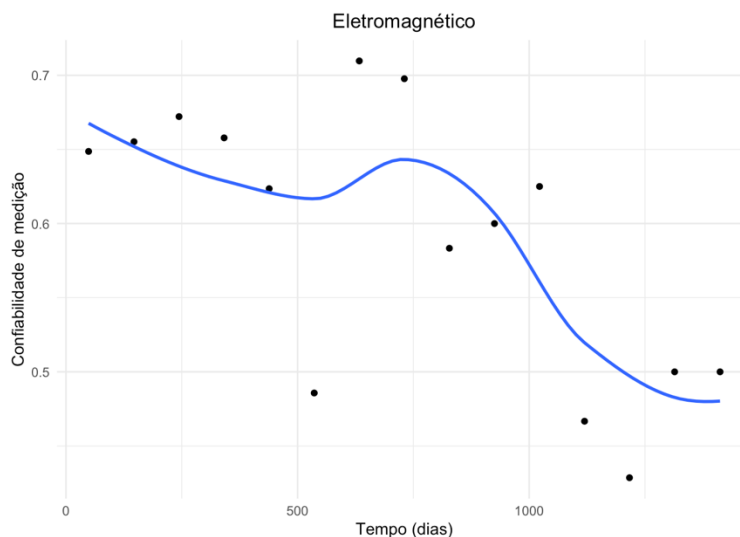


Figura 1 – Confiabilidade de medidores eletromagnéticos instalados

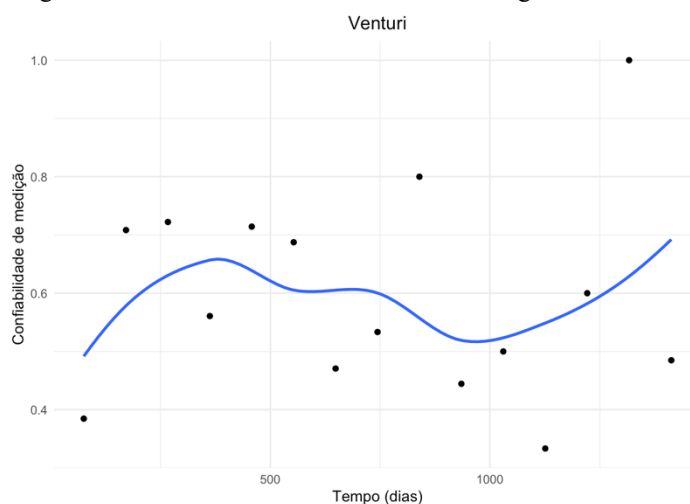


Figura 2 – Confiabilidade de medidores Venturi instalados

Embora tenha sido possível aplicar o método binomial para alguns tipos de medidores, os resultados obtidos não foram adequados, pois, dada a natureza das curvas de conformidade, sugeriam que calibrações deveriam ser feitas a cada 1 ou 2 meses.

Uma outra tentativa foi modelar diretamente o desvio de medição (em vez de modelar a confiabilidade). Esse método foi denominado como análise do desvio de medição, sendo avaliados três modelos estatísticos: Regressão Linear, Aditivo Generalizado e Floresta Aleatória (An Introduction to Statistical Learning, Springer, 2009). Mais uma vez, devido à natureza dos dados (o desvio de medição não decresce monotonamente com o passar do tempo), esses modelos não produziram resultados interessantes.

Os resultados destes modelos mostraram que a natureza dos dados não permite nenhuma abordagem clássica. Há muitas variáveis não controladas (incertezas aumentadas sem causa identificada, manutenção de instrumentos, queima de circuitos elétricos, inundações, roubo de cabos, queda de raios, derivas inexplicáveis de desvios de medição, mudanças de operação que impactam em medição de vazões fora das faixas de operação boas dos equipamentos, etc.), que influenciaram o desvio de medição e que não se conseguem introduzir nos modelos.

Mesmo os modelos estatísticos mais complexos considerados na análise não foram capazes de explicar uma proporção razoável da variabilidade do desvio de medição. Em termos mais práticos, sabe-se que diversos fatores influenciam o desvio de medição e aqueles considerados nos modelos (tipo do medidor, diâmetro do medidor e tempo entre calibrações) não foram suficientes para explicar o fenômeno gerador do desvio.



Além disso, como a base de calibrações não foi gerada a partir de um desenho amostral balanceado, isto é, com todos os possíveis intervalos de calibração sendo aplicados a todos os tipos de medidores, existem partes do fenômeno de desgaste dos macromedidores que não estão sendo observados.

Mais especificamente, os medidores que costumam apresentar desvios maiores tendem a ser calibrados com maior frequência e os medidores que dificilmente apresentam desvios altos tendem a ser calibrados com menor frequência. Como a base de calibrações foi construída com essa dinâmica, não foram observados medidores que tendem a ficar mais desajustados em intervalos de calibração grandes e medidores mais regulares em intervalos de calibração pequenos. Esse viés de seleção provavelmente foi o maior responsável para a inadequação dos modelos estatísticos testados.

Algoritmo de cálculo

Com a inadequação dos métodos estatísticos, foi aplicada então uma análise com critérios de engenharia conforme mencionados no artigo *Simplified Calibration Interval Analysis*, de Allen Bare, da *Savannah River National Laboratory*, que é uma generalização do *método reativo* mencionado pela *NCSL*.

O método de Bare representa uma modificação de algoritmos existentes na publicação citada do *NCSL*, e é muito conveniente pois adapta-se perfeitamente ao tipo de dados de calibração existentes na amostra, e possibilita uma abordagem lastreada nas informações existentes de resultados de calibração e na experiência de operação destes medidores por parte das equipes da SABESP.

O método de Bare menciona a importância das peculiaridades de cada processo metrológico e, conseqüentemente, de sua calibração, que podem impactar o desempenho do medidor. Em suma, o conhecimento local não deve ser ignorado e deve alimentar as decisões de aplicação do algoritmo.

O algoritmo de Bare parte do pressuposto que **“uma revisão da história de calibração do instrumento revela algo sobre como se pode esperar que o instrumento vá se comportar no futuro”**. Esta é a base do algoritmo. Assim, se um instrumento apresentou na história um comportamento errático ou uma deriva do erro de medição, é de se esperar que ele continue com essa tendência. Ou, se um instrumento consistentemente permanece dentro de tolerâncias adequadas, é de se supor que ele mantenha esse padrão no futuro.

Também se assume que, se o instrumento foi ajustado, ele tem uma maior probabilidade de se manter dentro da tolerância desejada.

Sendo assim, se os registros de calibração de um medidor indicarem um histórico de conformidade, então se espera que o instrumento tenha alta probabilidade de permanecer em conformidade para um intervalo de calibração igual ou um pouco maior do que os aplicados anteriormente. Em contrapartida, se os registros indicarem um histórico de não conformidade, espera-se que o medidor, com alta probabilidade, se encontre fora de conformidade na próxima calibração se o intervalo não for reduzido. Trata-se da aplicação do bom senso em engenharia.

A principal vantagem deste método em relação ao método reativo descrito na RP1 é a possibilidade de (1) usar o histórico de calibração (e não apenas a última calibração) e (2) estabelecer níveis de não conformidade (no caso aqui estudado, se for encontrado um erro de medição fora do limite aceitável, quanto maior for esse erro, maior será a diminuição do intervalo de calibração).

Foi adotado neste trabalho as mesmas premissas que Bare utilizou em relação aos dados históricos: as calibrações mais recentes possuem um peso maior e calibrações anteriores recebem pesos menores, já que é razoável supor que as medições recentes trazem informações mais precisas sobre o atual desvio de medição do que resultados mais antigos. Ainda assim é conveniente utilizar medições antigas, pois trazem informação sobre o quanto medições não conformes são frequentes para cada medidor.

Com estas hipóteses, o algoritmo foi desenvolvido para calcular intervalos de calibração baseados no resultado da calibração e com um sistema de ponderação para os dados históricos. O novo intervalo de calibração pode ser calculado utilizando, por exemplo, a seguinte expressão:

$$NI = CI \times (W1 \times R1 + W2 \times R2 + W3 \times R3)$$



sendo

- NI o novo intervalo de calibração;
- CI o intervalo de calibração antigo;
- W1, W2 e W3 os pesos aplicados aos resultados das três últimas calibrações, sendo W1 a mais recente e W3 a mais antiga.
- e R1, R2 e R3 os resultados das três últimas calibrações, sendo R1 a mais recente e R3 a mais antiga.

Repare que o algoritmo considera na construção do novo intervalo de confiança o resultado das calibrações passadas e a ponderação dependente do tempo. Essa expressão considera um histórico de apenas três calibrações, mas o método pode ser generalizado de forma direta para qualquer tamanho de histórico.

Os valores R1, R2 e R3 representam o nível de não conformidade do instrumento (status), sendo que instrumentos conformes geralmente recebem o valor 1 e, quanto maior a não conformidade, mais próximo do zero será esse valor.

Na prática, os status e seus valores devem ser escolhidos de tal forma que atendam às necessidades metrológicas da empresa. Além disso, devem ser tomados os seguintes cuidados:

- não alterar ciclos de calibração que não precisam ser ajustados;
- avaliar se alguns instrumentos devem possuir um intervalo máximo de calibração;
- avaliar se alguns instrumentos devem possuir um intervalo mínimo de calibração.

Para aplicar o método, foi montada uma tabela com informações selecionadas diretamente da base de calibrações, com as seguintes variáveis:

- data da calibração
- ponto de medição
- número da medição (cada calibração pode ter 1, 2 ou 3 medições)
- desvio de medição
- incerteza da medição

Para cada calibração, foi calculado um parâmetro de comparação M:

$$M = D + I,$$

sendo D a média dos desvios absolutos de cada calibração, isto é,

$$D = \frac{|D_1| + \dots + |D_n|}{n}$$

onde n é o número de calibrações realizadas (1, 2 ou 3) e

I a incerteza expandida média de cada calibração, isto é,

$$I = \frac{|I_1| + \dots + |I_n|}{n}$$

Ao se somar a incerteza expandida média I ao desvio absoluto médio, cria-se um intervalo de confiança de 95% para o desvio de cada calibração, incorporando ao problema as fontes de variabilidade inerentes ao processo de calibração.

Com base no histórico de calibrações disponível, foi decidido usar três níveis de status para o valor de M acima definido:

- Status A (resultado conforme): se M entre 0 e 5.
- Status B (resultado insatisfatório): se M entre 5 e 8.
- Status C (resultado não conforme): se M maior que 8.

Esses valores foram escolhidos em conjunto com a equipe técnica de calibração, com base no histórico de calibrações dos medidores de vazão e nas políticas metrológicas da empresa.



O peso (R) de cada status e os pesos W_1, W_2, \dots referentes ao histórico foram definidos de tal forma que o algoritmo nunca permita um intervalo de calibração aumentar mais do que o 50% — se o intervalo antigo for de 1 ano, o intervalo novo será, na melhor das hipóteses, 1 ano e 6 meses — e também para que o algoritmo nunca permita um intervalo de calibração diminuir mais do que 50% — se o intervalo antigo for de 1 ano, o intervalo novo será, na pior das hipóteses, 6 meses. Em resumo, um intervalo nunca sofrerá uma variação maior que 50%. Esses valores podem ser obviamente modificados, a depender das peculiaridades de cada processo metrológico, em cada medidor analisado.

Assim, foram adotados os seguintes valores para os status A, B e C:

- Status A - $R = 1.000$
- Status B - $R = 0.500$
- Status C - $R = 0.333$

Também é preciso definir para cada macro medidor, qual será a janela de observação. A janela corresponde ao tamanho h do histórico de calibrações a ser utilizado. Uma janela igual a $h = 3$, por exemplo, corresponde a usar as 3 últimas calibrações de um PM. Na implementação do método, **foi utilizado todo o histórico disponível de cada PM como janela**.

Os pesos W_1, W_2, \dots, W_h vão depender sempre do tamanho do histórico utilizado, mas terão sempre as seguintes propriedades:

$$W_1 \geq W_2 \geq \dots \geq W_h$$

$$W_1 + W_2 + \dots + W_h = 1,5$$

Usando a segunda propriedade é fácil verificar que, no melhor dos casos, em que todas as calibrações receberam status A, se teria:

$$\begin{aligned} NI &= CI \times (W_1 \times R_1 + W_2 \times R_2 + \dots + W_h \times R_h) \\ NI &= CI \times (W_1 \times 1 + W_2 \times 1 + \dots + W_h \times 1) \\ NI &= CI \times (W_1 + W_2 + \dots + W_h) \\ NI &= CI \times 1,5 \end{aligned}$$

isto é, o intervalo novo será 50% maior que o antigo. Já no pior dos casos, quando todas as calibrações receberem status C, teremos:

$$\begin{aligned} NI &= CI \times (W_1 \times R_1 + W_2 \times R_2 + \dots + W_h \times R_h) \\ NI &= CI \times (W_1 \times 0,333 + W_2 \times 0,333 + \dots + W_h \times 0,333) \\ NI &= CI \times 0,333 \times (W_1 + W_2 + \dots + W_h) \\ NI &= CI \times 0,333 \times 1,5 \\ NI &\approx CI \times 0,5 \end{aligned}$$

isto é, o intervalo novo será 50% menor que o antigo.

Na prática, para estabelecer os pesos W_1, W_2, \dots, W_h , respeitando as duas propriedades, foi utilizado o seguinte resultado:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \dots = 1,5$$

E então, para $j=2, \dots, h$,

$$W_1 = \frac{1}{2} + \left(1 - \sum_{i=1}^h \frac{1}{2^i}\right)$$

$$W_j = \frac{1}{2^{j-1}}$$

O peso do Status B pode ser visto como um peso para a importância do macro medidor. Valores mais próximos de 1 indicariam um menor rigor e uma maior propensão a intervalos de calibração maiores. Valores mais próximos de 0,333 indicariam um maior rigor e uma maior propensão a intervalos de calibração menores. Por padrão, esse peso está ajustado em 0,5 para todos os macromedidores.

Um último ponto da implementação está nos limites mínimo e máximo de calibração. O algoritmo não permite nenhum intervalo ser menor que 6 meses e nem maior que 3 anos. Esses valores, assim como o peso do Status B, são padrão e podem ser ajustados diferentemente para cada macro medidor conforme algum critério de importância.

Aplicando o algoritmo, foram obtidos resultados para todos os medidores, conforme mostra a tabela da figura seguinte para alguns pontos de medição.

Tabela 1 – Exemplo de aplicação do algoritmo

PM	Local	Última calibração	Próxima calibração	Varição no Intervalo de calibração (dias)
5	Entrada Barueri	03/01/2019	29/03/2020	-67
40	Gopuva	03/01/2018	13/05/2019	131
54	Bras Cubas	24/07/2019	09/12/2020	162
59	Osasco Bela Vista	24/01/2019	23/01/2022	-99
62	Entrada Osasco Vila Iracema	10/01/2019	10/01/2020	59
85	Santo Andre (Chamine)	18/06/2009	18/06/2010	-21
87	Entrada Itaim	10/07/2019	09/07/2020	35
88	Entrada Itaquera	10/01/2019	18/05/2020	158
93	Entrada Jaguará	17/01/2019	14/02/2021	-11

RESULTADOS OBTIDOS

A aplicação dos conceitos descritos no artigo de Bare permitiu uma solução bastante robusta e consistente, como mostrado em alguns exemplos a seguir.

Adicionalmente à solução para a definição de intervalos de calibração, a operação do dashboard oferece várias abordagens que permitem um melhor entendimento da situação de confiabilidade de cada medidor em particular ou do conjunto de medidores, permite o planejamento técnico do calendário de calibrações e o gerenciamento metrológico inovador, pelo controle que oferece sobre todo o conjunto de medidores.

Assim, pode-se ver o gráfico com a evolução do número de calibrações realizadas pela equipe ao longo dos anos:

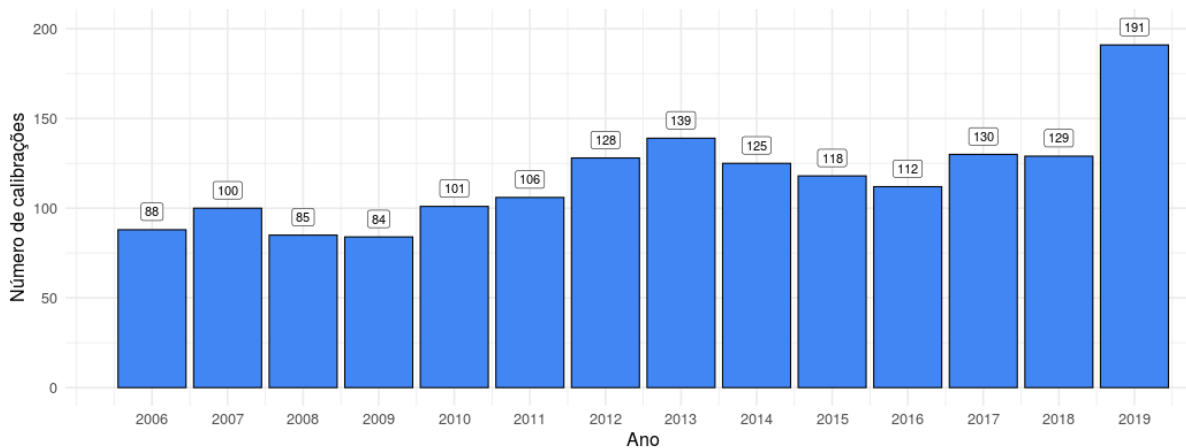


Figura 3 - Número de calibrações de macromedidores.

As barras de erro correspondem a duas vezes o desvio-padrão das incertezas em cada ano, para cima e para baixo.

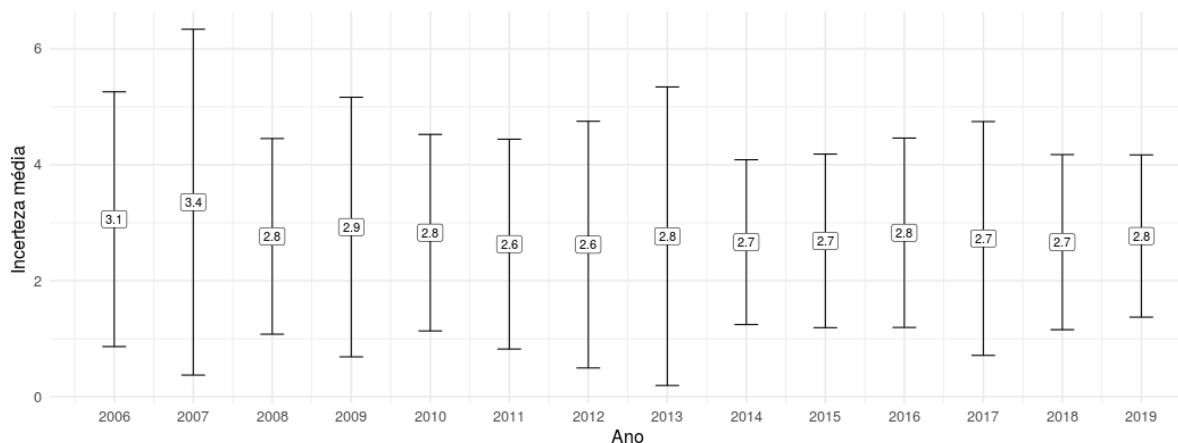


Figura 4 - Incerteza média e variância para todos os medidores.

As barras de erro correspondem a duas vezes o desvio-padrão dos desvios de medição em cada ano, para cima e para baixo.

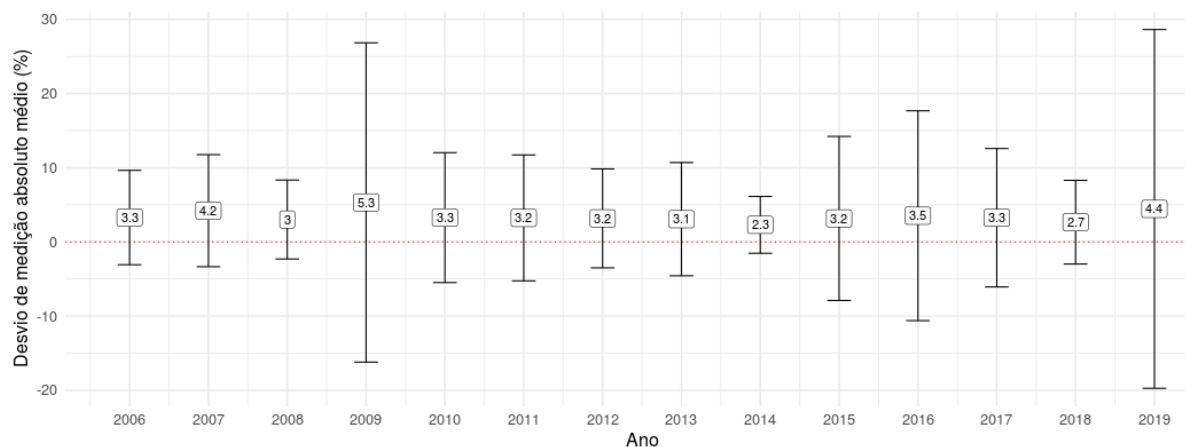


Figura 5 - Erros de medição em relação ao Pitot para todos os medidores.

A seguir são apresentadas algumas figuras para ilustrar a aplicação do método. A grande maioria dos medidores seguem padrões e soluções razoáveis, e aqui são mostrados diversos casos mais complicados, para mostrar a eficácia do método.

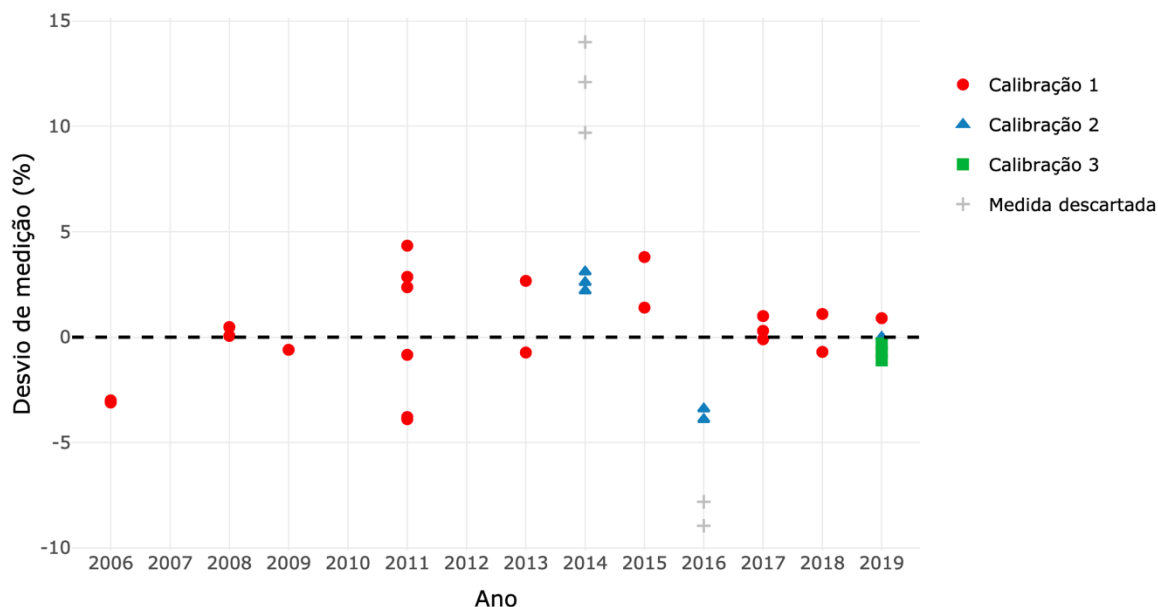


Figura 6 - Representação dos desvios de medição de medidor eletromagnético de 600 mm de diâmetro em relação ao levantamento com tubo de Pitot tipo Cole. Medidas acima para PM 54 - Brás Cubas, segundo a denominação SABESP. Observar que num mesmo ano se pode ter mais de um conjunto de calibração, realizada quando a análise dos resultados mostrou algum problema. Por exemplo, no ano de 2014 foi realizada uma calibração em janeiro e se encontraram desvios de 14%, 12,1% e 9,7% para três vazões distintas, assinalados como cruces na cor cinza. Foi acionado o grupo de instrumentação, que corrigiu um problema elétrico e novas medições realizadas em fevereiro, onde foram encontrados valores de 3,1%, 2,6% e 2,2%. As medidas de janeiro foram descartadas e não entraram nos cálculos do intervalo de calibração.

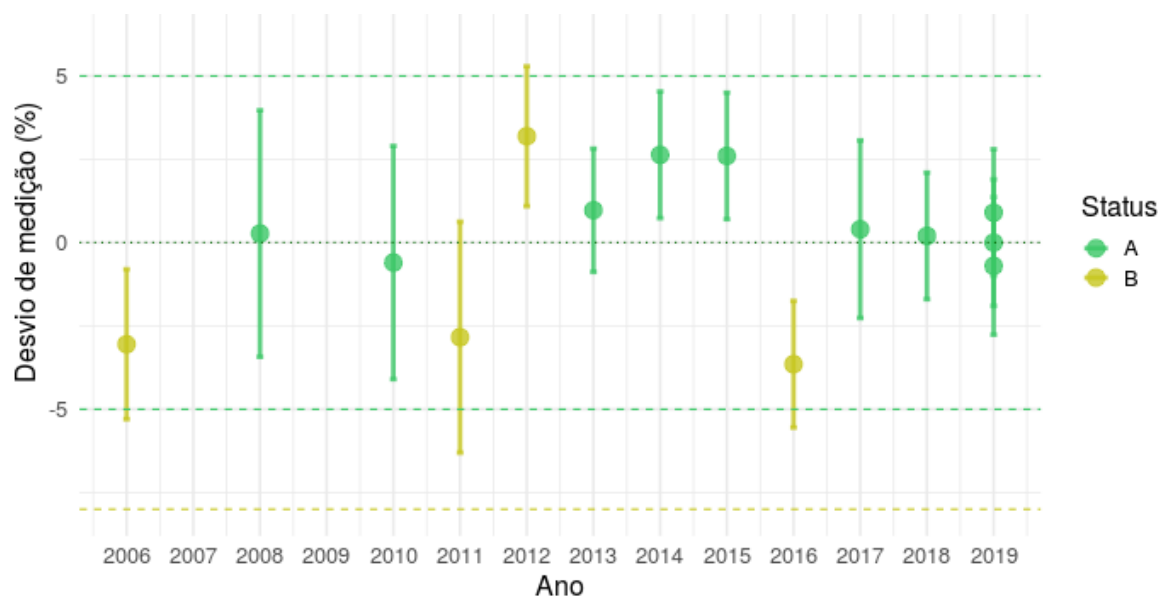


Figura 7 - Mesmos resultados do medidor descrito na figura anterior, após a aplicação dos critérios para cálculo do intervalo de calibração. Os pontos representam o erro médio de calibração de cada ano e as barras representam a incerteza média expandida. No cálculo foram consideradas 13 calibrações, estimado como intervalo de calibração antigo 311 dias (critérios estabelecidos no item método) e o novo intervalo sugerido é de 461 dias, ou seja pode haver um acréscimo de 150 dias no intervalo de calibração, sem prejuízo da confiabilidade segundo os critérios adotados.

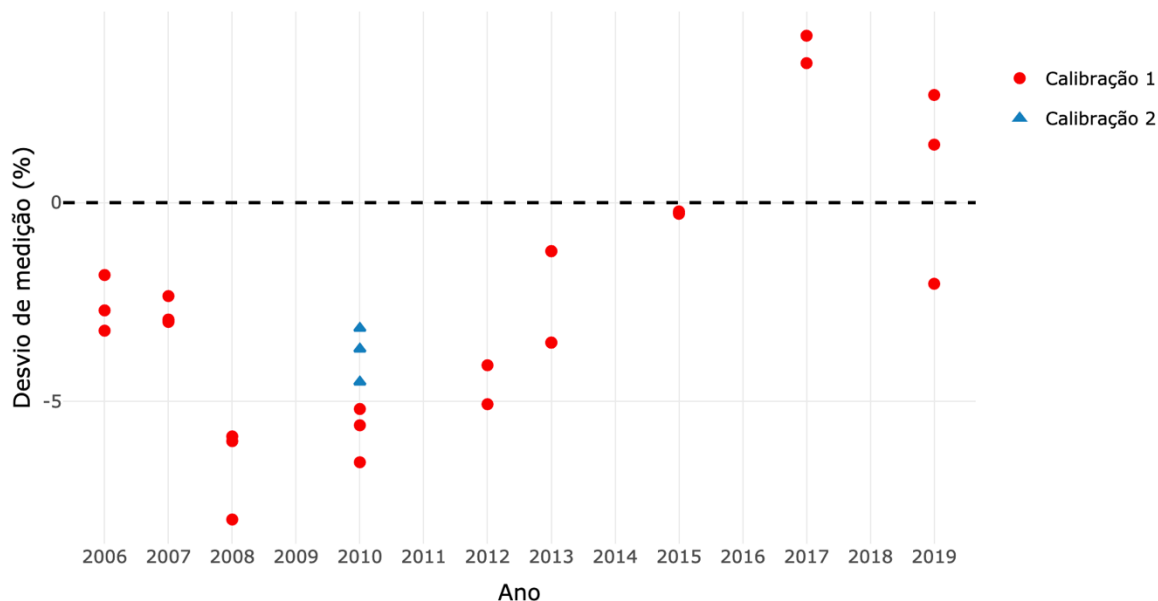


Figura 8 - Representação dos desvios de medição de medidor Venturi com 300 mm de diâmetro. Medidas acima para PM 208 - Entrada Caiciras, segundo a denominação SABESP. Aqui pode ser observado uma deriva dos valores desde 2008 até 2017, constantemente alterando o valor dos desvios, o que precisa ser estudado.

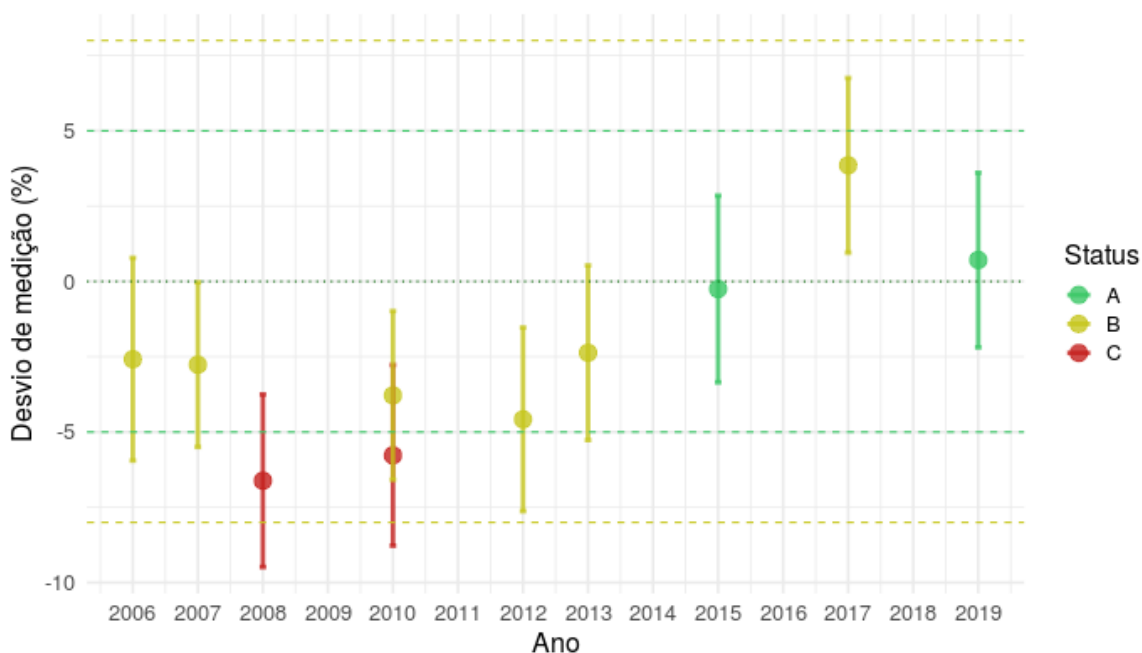


Figura 9 - Mesmos resultados do medidor descrito na figura anterior, após a aplicação dos critérios para cálculo do intervalo de calibração. No cálculo foram consideradas 10 calibrações, intervalo de calibração antigo estimado como 687 dias com novo intervalo sugerido de 771 dias, ou seja pode haver um acréscimo de 84 dias no intervalo de calibração, sem prejuízo da confiabilidade segundo os critérios adotados.

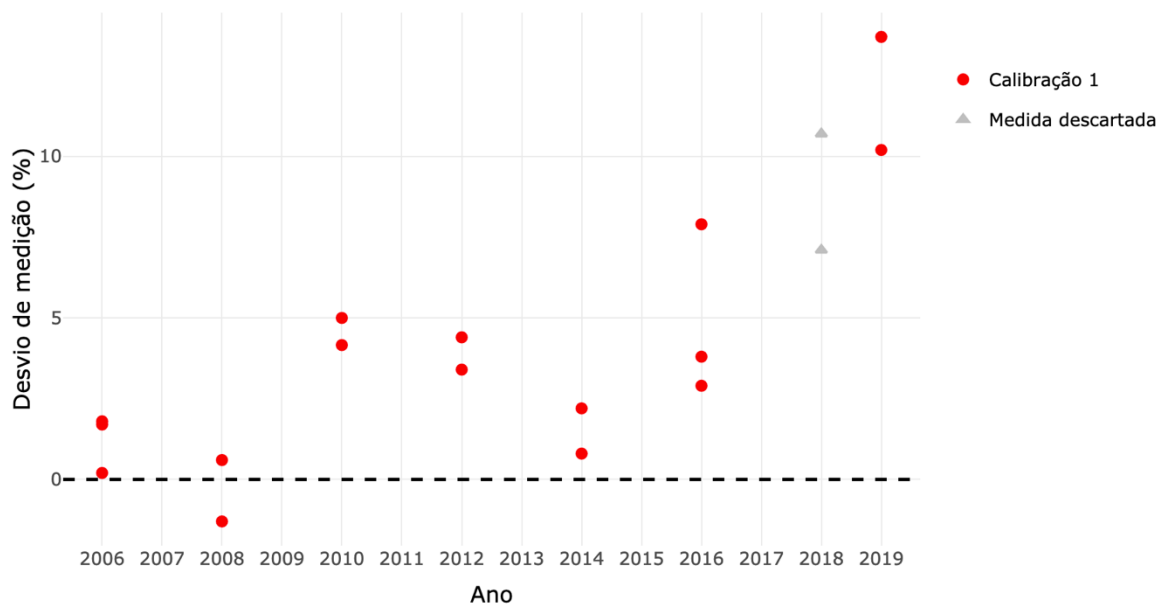


Figura 10 - Representação dos desvios de medição de medidor eletromagnético com 450 mm de diâmetro. Medidas para PM 137 - Entrada Mussolini. Pode ser observado uma forte deriva dos valores desde 2014 até 2019, constantemente aumentando o valor dos desvios.

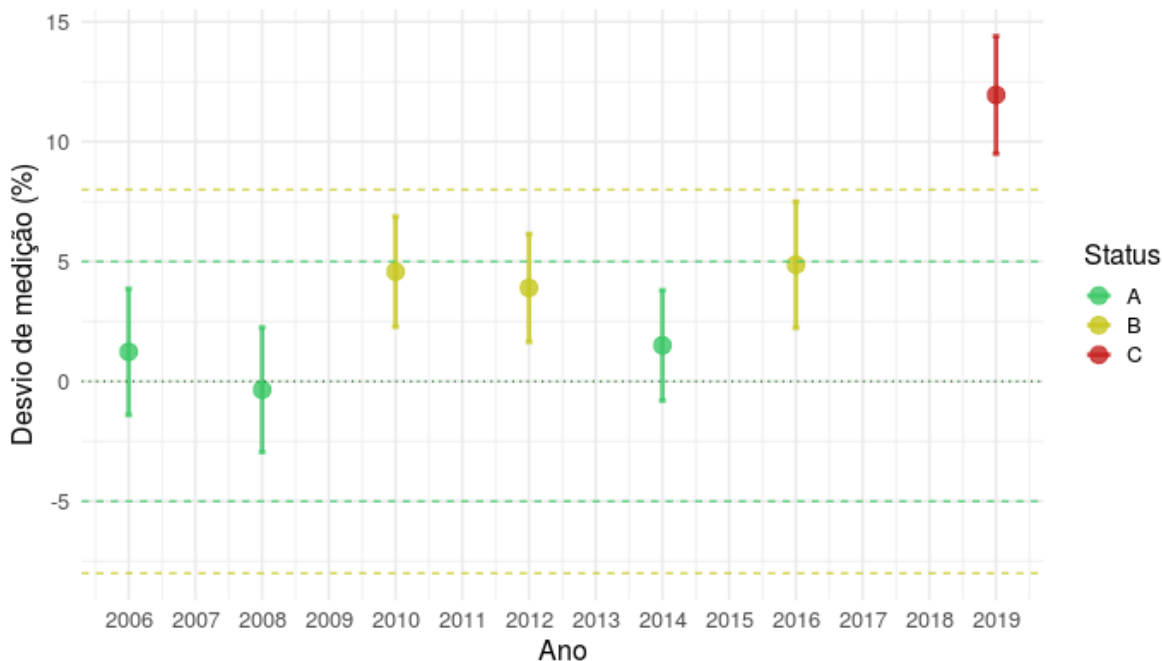


Figura 11 - Mesmos resultados para medidor descrito na figura anterior, após a aplicação dos critérios para cálculo do intervalo de calibração. No cálculo foram consideradas 7 calibrações, intervalo de calibração antigo estimado como 853 dias, com novo intervalo sugerido de 700 dias, ou seja deve haver uma diminuição de 153 dias no intervalo de calibração, para não haver prejuízo da confiabilidade segundo os critérios adotados.

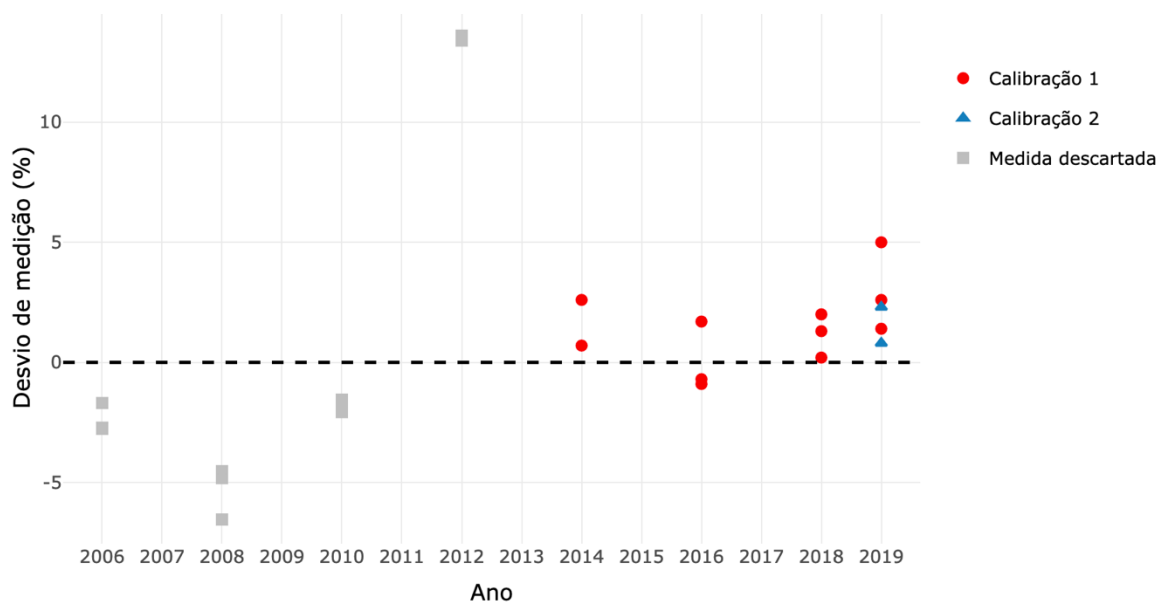


Figura 12 - Representação dos desvios de medição de medidor ultrassônico com 400 mm de diâmetro. Medidas acima para PM 167 - Entrada Pirajussara. Antes de 2010 havia um medidor tipo Venturi instalado, substituído em 2014 por um ultrassônico. Em 2019 pode ser observado que foram realizados dois conjuntos de medição, o primeiro em fevereiro com desvios maiores e o segundo em outubro, com valores menores. Ambos foram utilizados nos cálculos.

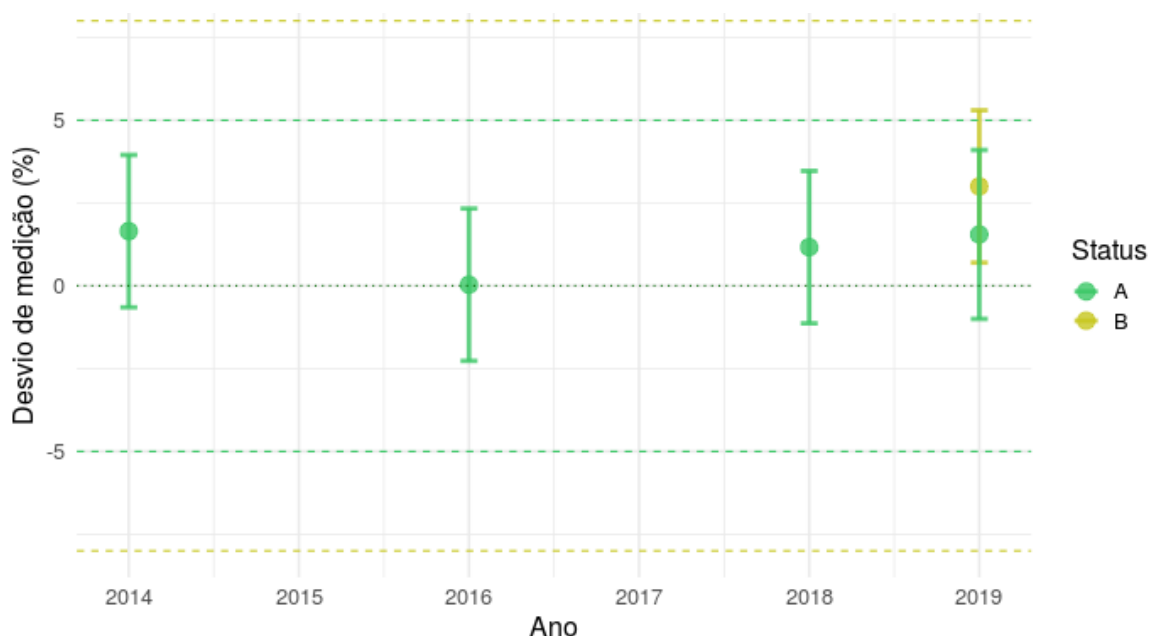


Figura 13 - Mesmos resultados para medidor descrito na figura anterior, após a aplicação dos critérios para cálculo do intervalo de calibração. No cálculo foram consideradas 5 calibrações, intervalo de calibração antigo estimado como 532 dias, com novo intervalo sugerido de 665 dias, ou seja pode haver um aumento de 133 dias no intervalo de calibração, sem prejuízo da confiabilidade segundo os critérios adotados.

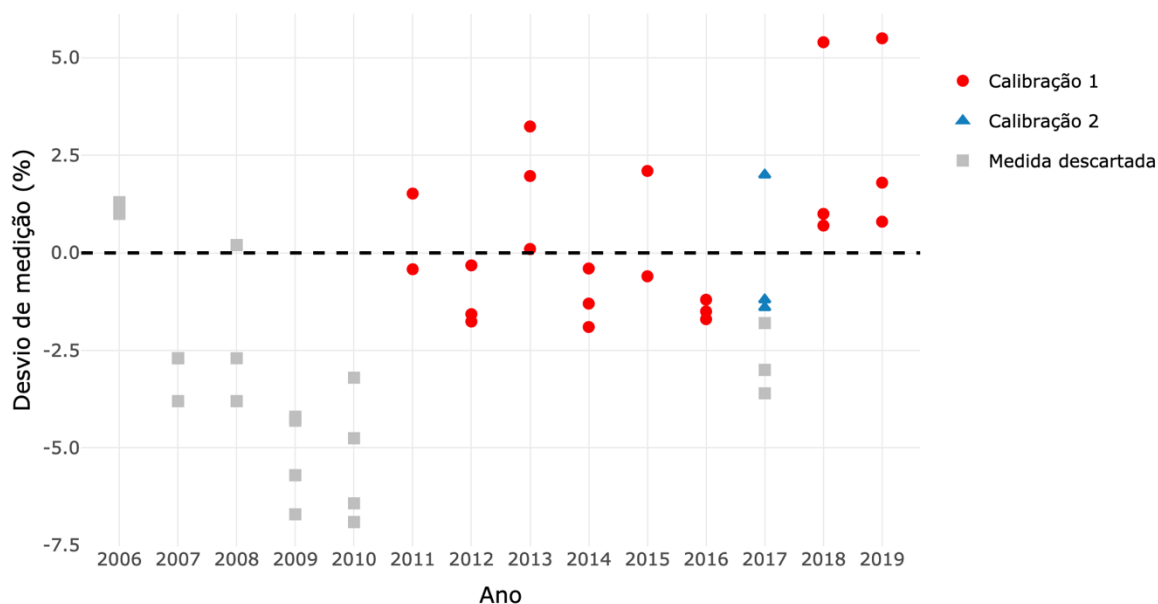


Figura 14 - Representação dos desvios de medição de medidor eletromagnético com 400 mm de diâmetro. Medidas para PM 193 – Oswaldo Cruz. Observar que as medidas entre 2006 e 2010 foram descartadas por troca de medidor. Também foram descartadas medições realizadas em janeiro de 2017 e utilizadas as realizadas em fevereiro de 2017, após correção de problemas com o medidor. Deve ser observado que os dois maiores desvios de medição em 2018 e 2019 referem se a medições com vazões muito baixas.

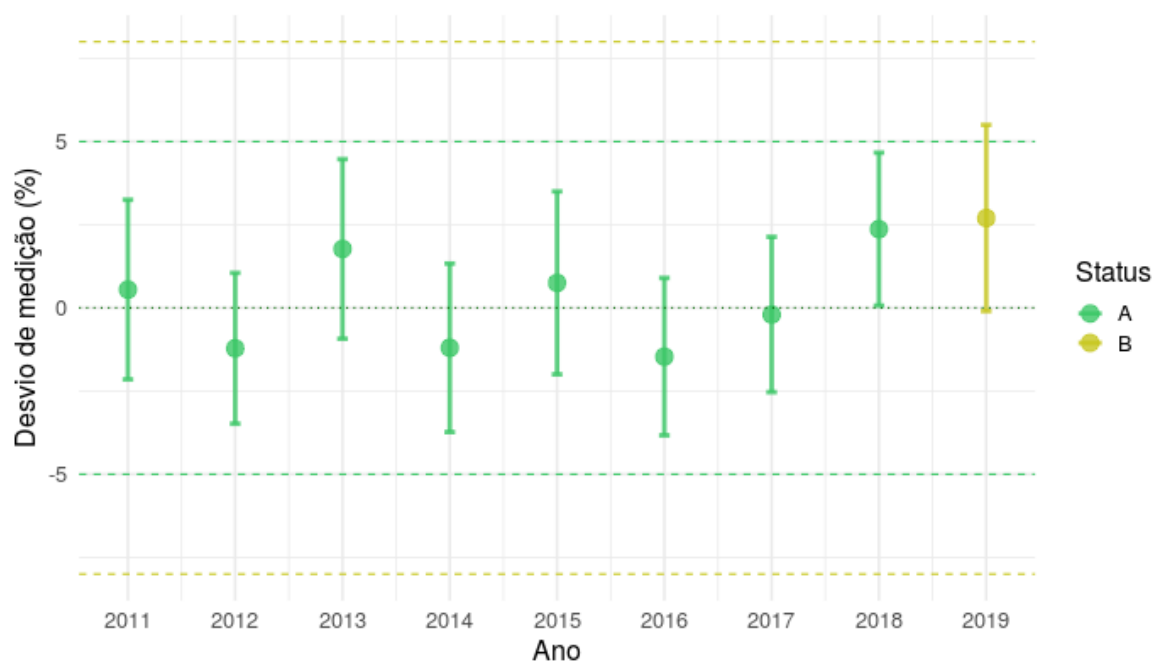


Figura 15 - Mesmos resultados para medidor descrito na figura anterior, após a aplicação dos critérios para cálculo do intervalo de calibração. No cálculo foram consideradas 9 calibrações, intervalo de calibração antigo estimado como 388 dias, com novo intervalo sugerido de 484 dias, ou seja pode haver um aumento de 96 dias no intervalo de calibração, sem prejuízo da confiabilidade segundo os critérios adotados.

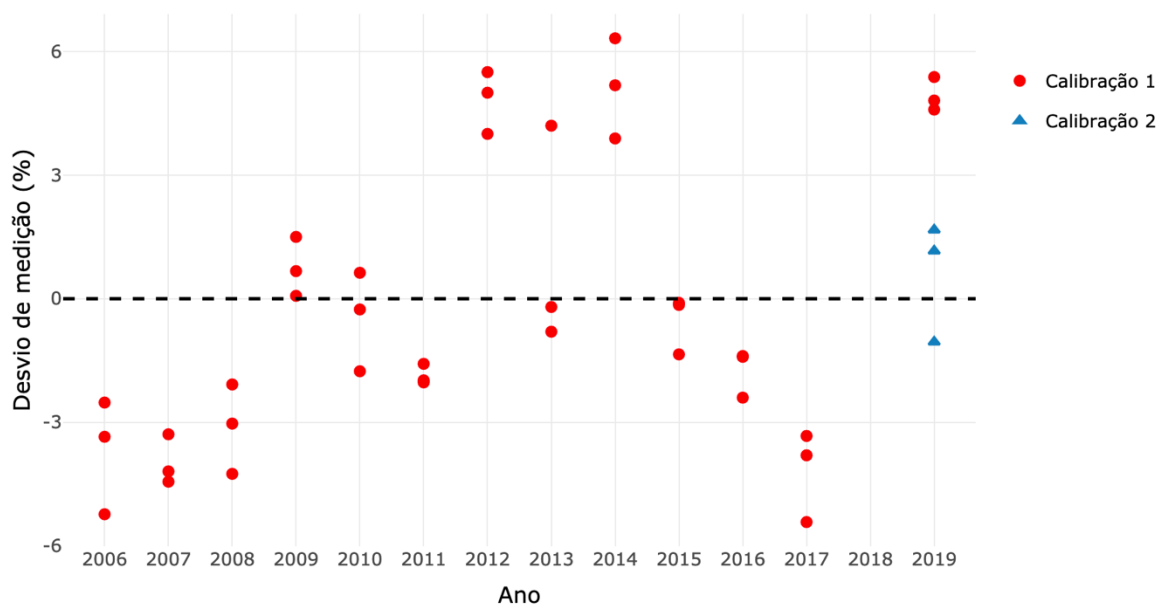


Figura 16 - Representação dos desvios de medição de medidor Venturi com 1050 mm de diâmetro. Medidas para PM 244 – Campo Belo. Observar que os resultados deste medidor apresentam três períodos distintos: de 2006 a 2011, com tendência de diminuição dos valores de desvios; de 2012 a 2017 inicialmente com uma forte subida dos desvios, seguido por um período de deriva constante aumentando os desvios e finalmente, com correções em 2018, com duas séries de valores em fevereiro de 2019 (4,59%, 4,81% e 5,38%) e em outubro (-1,05%, 1,16% e 1,67%).

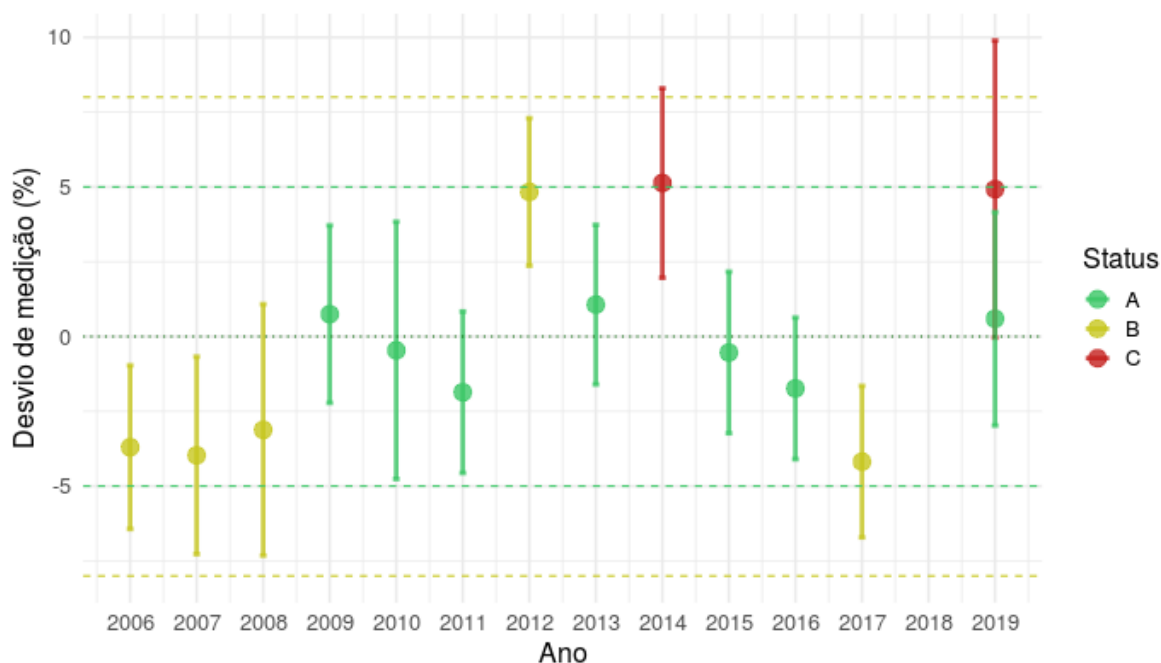


Figura 17 - Mesmos resultados para medidor descrito na figura anterior, após a aplicação dos critérios para cálculo do intervalo de calibração. No cálculo foram consideradas 14 calibrações, intervalo de calibração antigo estimado como 469 dias, com novo intervalo sugerido de 480 dias, ou seja pode haver um aumento de 11 dias no intervalo de calibração, sem prejuízo da confiabilidade segundo os critérios adotados.

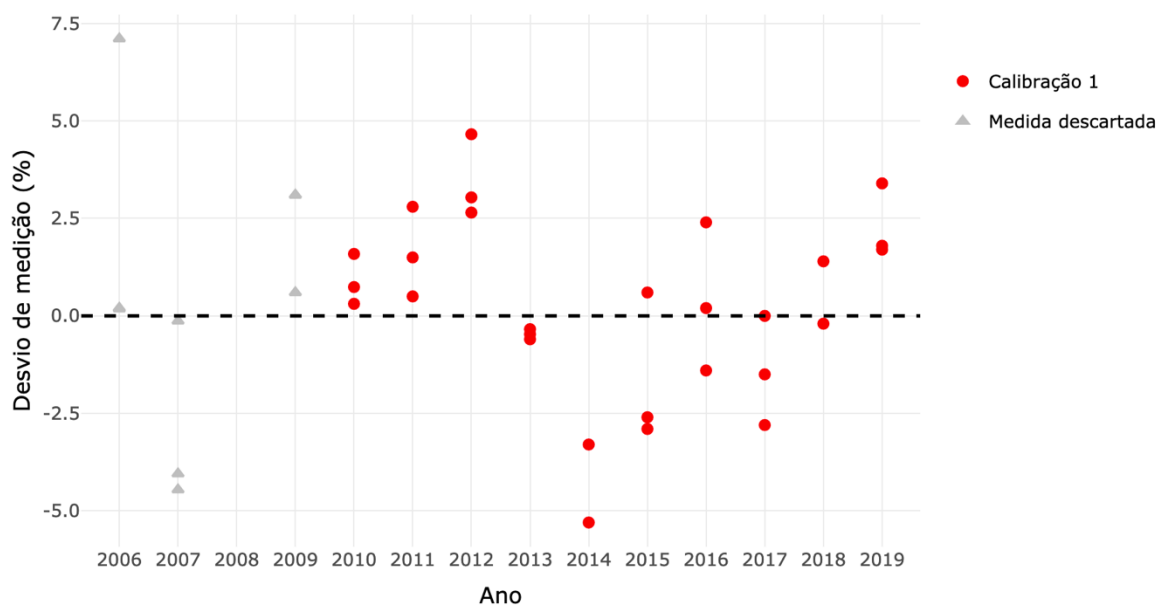


Figura 18 - Representação dos desvios de medição de medidor ultrassônico com 750 mm de diâmetro. Medidas para PM 427 – entrada de Suzano. Observar que os resultados deste medidor apresentam dois períodos distintos: de 2006 a 2009, quando o medidor era um Venturi, e de 2010 em diante, substituído por um ultrassônico. À exceção das medições 2007 e em 2014, os resultados apresentam desvios pequenos seja para o Venturi ou para o ultrassônico.

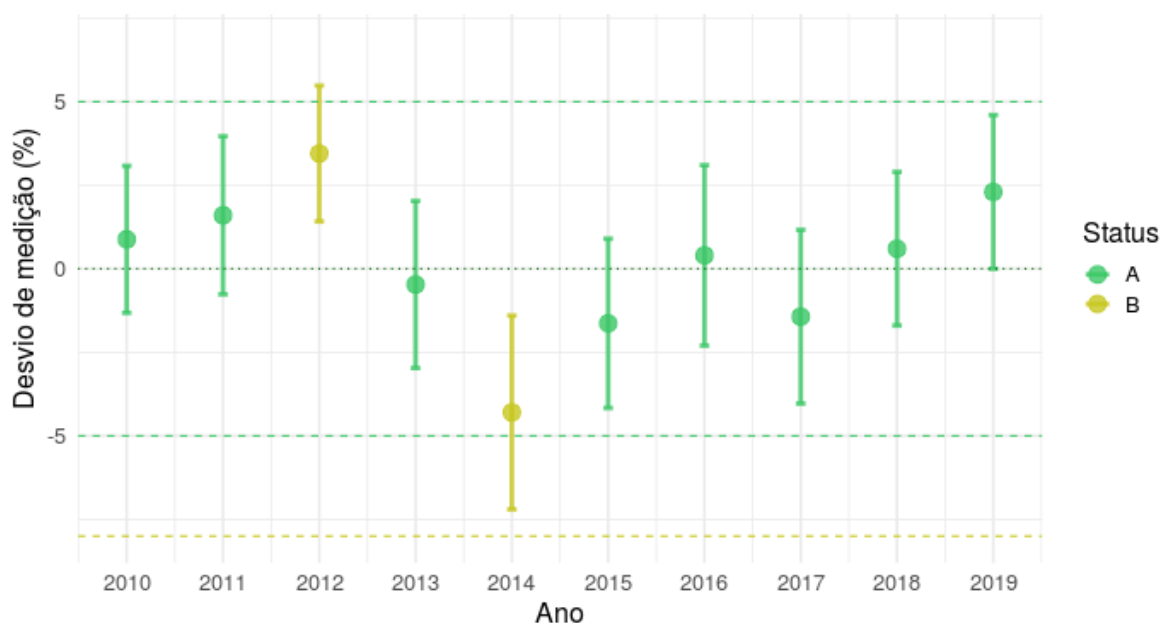


Figura 19 - Mesmos resultados para medidor descrito na figura anterior, após a aplicação dos critérios para cálculo do intervalo de calibração. No cálculo foram consideradas 10 calibrações, intervalo de calibração antigo estimado como 385 dias, com novo intervalo sugerido de 570 dias, ou seja pode haver um aumento de 185 dias no intervalo de calibração, sem prejuízo da confiabilidade segundo os critérios adotados.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A ILAC-G24 aponta que “o processo de determinação de intervalos de calibração é um processo matemático e estatístico complexo, que requer dados suficientes e acurados tomados no processo de calibração. Não parece

haver um processo único universalmente aplicável para estabelecer e ajustar intervalos de calibração, havendo, entretanto, alguns métodos sugeridos.”

Deve ser observado que a frase em **negrito** representa um problema para os dados de calibração disponíveis para medidores de vazão, sempre com incertezas elevadas frente a medidores de outras variáveis que não vazão, contando se ainda as dificuldades inerentes ao uso em campo, sujeitos a inundações, descarga de raios, vandalismo e à natureza de escoamentos, que são dinâmicos, e possuem a turbulência e perfis de velocidade deformados como um problema sempre presente para os medidores de vazão.

O maior desafio da análise estatística é encontrar uma modelo ou uma técnica que responda à pergunta de interesse e melhor se ajuste à natureza dos dados disponíveis. Neste trabalho, foi verificado que a natureza dos dados não permitiu a aplicação dos métodos tradicionais para estimação de intervalos de calibração. Portanto, tornou-se necessário explorar uma nova técnica, que permitisse a utilização da rica informação contida nos dados para dar uma resposta satisfatória ao problema de determinação de intervalos de calibração.

A solução encontrada foi a do modelo de Bare, que faz hipóteses razoáveis no contexto de calibração de medidores de vazão, leva em conta a experiência de engenharia envolvida no caso e faz uso de um modelo simples e de fácil implementação.

Ao fim, como apresentado pelos exemplos da seção anterior, chegou-se a um modelo de definição de intervalo de calibração satisfatório, coerente com a natureza dos dados da SABESP e capaz de produzir estimativas úteis para a equipe de calibração, todas baseadas na base histórica, no conhecimento dos técnicos sobre as peculiaridades dos macromedidores de vazão da SABESP e nas normas da empresa.

CONCLUSÕES

O modelo de algoritmo utilizado mostrou-se até o momento viável, seguro, robusto, flexível e preciso para todos os pontos analisados. A sua implantação em um *dashboard* forneceu possibilidades gerenciais inovadoras para análise do comportamento de todos os medidores em conjunto, ou de cada um em particular, de forma extremamente rápida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NATIONAL CONFERENCE OF STANDARDS LABORATORIES - NCSL: *RPI (Recommended Practice for Establishment and Adjustment of Calibration Laboratories, do International Calibration Intervals Committee)*
2. ALLEN BARE, *Simplified Calibration Interval Analysis*, Savannah River National Laboratory
3. GARETH J., DANIELA W., TREVOR H., ROBERT T., *An Introduction to Statistical Learning : with Applications in R*. New York: Springer, 2013.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 9001:2008: *Sistemas de gestão da qualidade - requisitos*. Rio de Janeiro, 2008.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO/IEC 17025: *Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaios e calibração*. Rio de Janeiro, 2017
6. INTERNATIONAL LABORATORY ACCREDITATION COOPERATION ILAC-G24 and ORGANISATION INTERNATIONALE DE METROLOGIE LEGALE OIML D 10 SERIES- *Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments, Edition 2007*