



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) BR 112016022187-7 B1



(22) Data do Depósito: 26/03/2015

(45) Data de Concessão: 13/09/2022

(54) Título: MÉTODO, EQUIPAMENTO E SISTEMA PARA ESTIMAR SE UM VALOR MEDIDO POR UM SENSOR DE PARÂMETRO FÍSICO DE UM DISPOSITIVO É NORMAL PARA UM VALOR DE PARÂMETRO DE OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO E MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR

(51) Int.Cl.: G01M 15/14.

(30) Prioridade Unionista: 27/03/2014 FR 1452650.

(73) Titular(es): SAFRAN AIRCRAFT ENGINES.

(72) Inventor(es): AURÉLIE GOUBY; VALERIO GEREZ.

(86) Pedido PCT: PCT FR2015050785 de 26/03/2015

(87) Publicação PCT: WO 2015/145085 de 01/10/2015

(85) Data do Início da Fase Nacional: 26/09/2016

(57) Resumo: MÉTODO, EQUIPAMENTO E SISTEMA PARA ESTIMAR SE UM VALOR MEDIDO POR UM SENSOR DE PARÂMETRO FÍSICO DE UM DISPOSITIVO É NORMAL PARA UM VALOR DE PARÂMETRO DE OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO, E PRODUTO DE PROGRAMA DE COMPUTADOR E MEIO DE ARMAZENAMENTO LEGÍVEIS POR UM EQUIPAMENTO DE COMPUTAÇÃO. A presente invenção se refere a um método para avaliar se o caráter de um valor (y_{exec}), medido por um sensor (20), de um parâmetro físico de um dispositivo (1) é ou não normal para um valor (x_{exec}) de um parâmetro de operação do dito dispositivo (1). O dito método é distinguido em que inclui implantar as etapas de: (a) calcular, com base em um modelo de regressão associado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in \{1, n\}}$, um valor estimado (y_{exec}) do parâmetro físico; (b) calcular um restante relacionado (res_{exec}); (c) calcular, com base em um modelo de variância relacionado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in \{1, n\}}$, um valor estimado (v_{arexec}) de uma variância no parâmetro físico; (d) calcular uma pontuação de anomalia (Z_{score}) do valor medido (v_{exec}) com base no restante (res_{exec}), calcular o valor estimado (v_{arexec}) da variância, e calcular um valor restante médio (média) para a dita pluralidade de pares $(x_i; \dots)$.

“MÉTODO, EQUIPAMENTO E SISTEMA PARA ESTIMAR SE UM VALOR MEDIDO POR UM SENSOR DE PARÂMETRO FÍSICO DE UM DISPOSITIVO É NORMAL PARA UM VALOR DE PARÂMETRO DE OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO E MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR”

CAMPO DA INVENÇÃO

[001] A presente invenção refere-se ao campo de testes de equipamento aeronáutico. Mais precisamente, a mesma se refere a um método para estimar se um valor medido de um parâmetro físico de um dispositivo, em particular, de um motor de aeronave, é ou não normal.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

[002] Uma bancada de teste é uma plataforma para medir o desempenho de uma máquina de teste (tipicamente um motor de aeronave) durante testes sob condições controladas a fim de observar seu comportamento. Muitos dados são adquiridos durante tais testes por sensores que equipam a bancada e/ou a máquina de teste para serem transferidos para um banco de dados dedicado, também denominado um banco de dados de teste e denominado uma base de teste doravante. Por questão de simplicidade, isso será denominado sensores de bancada, incluindo, portanto, os sensores que equipam o motor dentro do escopo de testes.

[003] Uma máquina de teste é, em geral, um protótipo que é desenvolvido que deseja-se que seja testado (os dados adquiridos são usados conseqüentemente, por departamentos de pesquisa para aperfeiçoar as máquinas e desenvolver as mesmas), ou um produto acabado para o qual deseja-se verificar as especificações e confiabilidade (os dados adquiridos são usados conseqüentemente pelas equipes de qualidade). Alternativamente, a máquina de teste pode ser tanto um motor completo, tanto um componente de um motor para testes parciais.

[004] Entretanto, como resultado de defeitos de um ou mais

sensores de uma bancada e/ou a máquina de teste, conforme acontece com frequência, os dados adquiridos têm valores anormais ou aberrantes. O banco de dados de teste é, então, constatado estar “poluído” por esses dados obtidos durante uma aquisição “com falhas”.

[005] Isso faz surgir um problema para os usuários da base (em particular, os departamentos de pesquisa), que usam todos os dados armazenados para realizar, em particular, comparações de desempenho. Esses dados também podem ser usados para reajustar modelos numéricos do motor na bancada.

[006] Além disso, durante o teste em si, é importante detectar rapidamente qualquer sensor defeituoso, na medida em que a decisão de interromper o teste pode ser feita dependendo da gravidade da anomalia. De fato, os testes são muito dispendiosos e é, desse modo, importante otimizar os mesmos e, em particular, a saída dos mesmos.

[007] A patente nº FR2965915 descreve um método exemplificativo para monitorar, em tempo real, sensores de uma bancada de teste que possibilita que uma pane de sensor seja sinalizada, mas isso é incapaz de detectar um desvio na qualidade de medição em si. Além disso, os métodos conhecidos são inseparavelmente ligados à bancada de teste e não possibilitam que medições anormais sejam identificadas a posteriori entre as medições armazenadas na base de teste.

[008] Portanto, seria desejável controlar, de modo confiável, eficiente e reproduzível, as medições de parâmetros relacionados a um motor para identificar com facilidade uma medição aberrante em um conjunto de medições.

DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO

[009] De acordo com um primeiro aspecto, a presente invenção fornece um método para estimar se um valor medido por um sensor de um parâmetro físico de um dispositivo é normal para um valor de um parâmetro de operação do dito dispositivo, sendo que uma pluralidade de pares define um

valor de referência do parâmetro físico para um valor do parâmetro de operação que é armazenado em um banco de dados armazenado em meios de armazenamento de dados, sendo que o método é distinguido em que compreende implantar por meios de processamento de dados as etapas de:

(a) calcular, com base em um modelo de regressão relacionado à dita pluralidade de pares, um valor estimado do parâmetro físico para o valor do parâmetro de operação;

(b) calcular um resíduo relacionado;

(c) calcular, com base em um modelo de variância relacionado à dita pluralidade de pares, um valor estimado de uma variância do parâmetro físico para o valor do parâmetro de operação;

(d) calcular uma pontuação de anomalia do valor medido com base no resíduo, no valor estimado da variância e em um valor residual médio para a dita pluralidade de pares;

(e) comparar a pontuação de anomalia do valor medido com um limite de desvio padrão;

(f) se a pontuação de anomalia for maior do que o dito limite, sinalizar a medição como anormal nos meios de interface.

[010] A estimação da variância com base no parâmetro de operação possibilita que uma variação na incerteza de medição (dependendo do contexto de uso) seja descartada. O intervalo de confiança formado (tolerância no Z_{score}) em relação ao modelo de regressão é, desse modo, mais realístico do que uma variância constante e a detecção de pontos anormais é completamente mais precisa. O modelo de alarme é, desse modo, mais eficiente.

[011] De acordo com outras características vantajosas e não limitantes:

- o método compreende uma fase anterior de processamento da

dita pluralidade de pares do banco de dados, que compreende implantar por meios de processamento de dados as etapas de:

(a0) determinar o dito modelo de regressão relacionado à dita pluralidade de pares por uma regressão que modela o valor do parâmetro físico com base no valor x do parâmetro de operação a partir do conjunto $\{x_i; y_i\}_{i \in \mathbf{1}, n}$, em que $x_i; y_i$ indica os valores de um par armazenado no banco de dados;

(a1) para cada um dos pares, calcular um valor estimado do parâmetro físico e um resíduo relacionado;

(a2) calcular a média dos ditos resíduos;

(a3) calcular, em uma janela deslizante dimensionada w , um conjunto de valores de variância residual sendo que cada um está relacionado a um valor do parâmetro de operação de um par;

(a4) determinar o dito modelo de variância relacionado à dita pluralidade de pares por uma regressão que modela o valor var da variância residual com base no valor x do parâmetro de operação a partir do conjunto $\{x_j; var_j\}_{j \in \mathbf{1}, n-w+1}$, em que var_j indica um valor residual de variância calculado e x_j o valor do parâmetro de operação relacionado;

- a fase anterior compreende uma etapa (a5) de determinar, com base no dito modelo de variância determinado, uma região de confiança em relação ao dito modelo de regressão determinado, e exibir nos meios de interface a dita região de confiança;

- a região de confiança é definida por uma delimitação superior da fórmula $f(x) + \sigma \times \sqrt{g(x)}$, e uma delimitação inferior da fórmula $f(x) - \sigma \times \sqrt{g(x)}$, em que f representa o modelo de regressão e g representa o modelo de variância;

- a pontuação de anomalia é obtida pela fórmula

$Z_{score} = \left| \frac{res_{exec} - mean}{\sqrt{\widehat{var}_{exec}}} \right|$, em que res_{exec} é o resíduo relacionado ao valor medido do parâmetro físico, \widehat{var}_{exec} o valor estimado da variância, e $mean$ é o valor residual médio para a dita pluralidade de pares;

- o dito dispositivo é um motor de aeronave;
- o dito parâmetro físico é escolhido a partir de uma pressão, uma temperatura, uma taxa de fluxo de fluido e um nível de ruído, relacionado ao motor;
- o dito parâmetro de operação é escolhido a partir de uma velocidade e uma taxa de fluxo de combustível relacionado ao motor;
- o motor é disposto em uma bancada de teste que compreende o sensor, sendo que a etapa (e) compreende desligar a bancada de teste se a medição for sinalizada como anormal;
- a etapa (e) compreende adicionar o par formado pelo valor medido do parâmetro físico e pelo valor do parâmetro de operação relacionado ao dito banco de dados de pares se a medição não for sinalizada como anormal.

[012] De acordo com um segundo aspecto, a invenção se refere a um equipamento para estimar se um valor medido por um sensor de um parâmetro físico de um dispositivo é normal para um valor de um parâmetro de operação do dito dispositivo, que compreende meios de processamento de dados, meios de armazenamento de dados que armazenam em um banco de dados uma pluralidade de pares que definem, cada um, um valor de referência do parâmetro físico para um valor de um parâmetro de operação, e meios de interface, sendo que o equipamento é distinguido em que os meios de processamento de dados são configurados para implantar:

- um módulo para calcular, com base em um modelo de regressão relacionado à dita pluralidade de pares, um valor estimado do parâmetro físico

para o valor do parâmetro de operação;

- um módulo para calcular um resíduo relacionado;

- um módulo para calcular, com base em um modelo de variância relacionado à dita pluralidade de pares, um valor estimado de uma variância do parâmetro físico para o valor do parâmetro de operação;

- um módulo para calcular uma pontuação de anomalia do valor medido com base no resíduo, no valor de variância estimado, e em um valor residual médio para a dita pluralidade de pares;

- um módulo para comparar a pontuação de anomalia do valor medido com um limite de desvio padrão;

- um módulo para transmitir um sinal de alarme nos meios de interface que sinaliza a medição como anormal se a pontuação de anomalia for maior do que o dito limite σ .

[013] De acordo com outras características vantajosas e não limitantes:

- o módulo de processamento de dados é configurado adicionalmente para implantar:

- um módulo para determinar o dito modelo de regressão relacionado à dita pluralidade de pares por uma regressão que modela o valor do parâmetro físico com base no valor x do parâmetro de operação a partir do conjunto $\{x_i: y_i\}_{i \in [1, m]}$ em que $x_i: y_i$ indica os valores de um par armazenado no banco de dados;

- um módulo para calcular para cada um dentre os pares um valor estimado relacionado do parâmetro físico e um resíduo relacionado;

- um módulo para calcular a média dos ditos resíduos;

- um módulo para calcular, em uma janela deslizante dimensionada w , um conjunto de valores de variância residual, sendo que cada um está relacionado a um valor do parâmetro de operação de um par;

- um módulo para determinar o dito modelo de variância relacionado à dita pluralidade de pares por uma regressão que modela o valor *var* da variância residual com base no valor *x* de um parâmetro de operação a partir do conjunto $\{x_j; var_j\}_{j \in \mathbb{1}, n-w+1}$, em que *var_j* indica um valor residual de variância calculado e *x_j* o valor do parâmetro de operação relacionado.

[014] De acordo com um terceiro aspecto, a invenção se refere a um sistema que compreende:

- uma bancada de teste que compreende um sensor e adaptada para receber um dispositivo;

- um equipamento de acordo com o segundo aspecto da invenção para estimar se um valor medido pelo sensor de um parâmetro físico do dito dispositivo é normal ou não para um valor de um parâmetro de operação do dito dispositivo.

[015] De acordo com um quarto e um quinto aspecto, a invenção se refere a um produto de programa de computador que compreende instruções de código para realizar um método de acordo com o primeiro aspecto da invenção para estimar se um valor medido por um sensor de um parâmetro físico de um dispositivo é ou não normal para um valor de um parâmetro de operação do dito dispositivo; e um meio de armazenamento legível por um equipamento de computação no qual um produto de programa de computador compreende instruções de código para realizar um método de acordo com o primeiro aspecto da invenção para estimar se um valor medido por um sensor de um parâmetro físico de um dispositivo é ou não normal para um valor de um parâmetro de operação do dito dispositivo.

BREVE DESCRIÇÃO DOS FIGURAS

[016] As características e as vantagens adicionais da presente invenção aparecerão mediante leitura da descrição a seguir de uma realização preferencial. Essa descrição será fornecida em referência aos desenhos

anexos, em que:

- A Figura 1 representa um ambiente exemplificativo em que o método, de acordo com a invenção, é implantado;

- As Figuras 2a e 2b ilustram as etapas de duas fases de um método exemplificativo de acordo com a invenção;

- As Figuras 3a a 3f representam áreas exibidas em uma interface de dados obtida durante etapas diferentes do método de acordo com a invenção.

DESCRIÇÃO DE REALIZAÇÕES DA INVENÇÃO

[017] Referindo-se à Figura 1, o presente método é um método para estimar se um valor y_{exec} medido por um sensor 20 de um parâmetro físico de um dispositivo controlado 1 é ou não normal para um valor x_{exec} de um parâmetro de operação do dito motor 1. O dispositivo controlado 1 é, em particular, um motor de aeronave 1, tipicamente todo ou parte de uma turbomáquina, em particular, uma turbomáquina de fluxo duplo.

[018] Embora a presente descrição assuma a seguir o exemplo preferencial de uma turbomáquina (em voo ou em uma bancada de teste), será, entretanto, entendido que a invenção não é limitada ao mesmo, e por “dispositivo”, entende-se qualquer sistema físico que receba pelo menos um parâmetro de operação como uma “entrada”, que é necessário para monitorar com o uso de sensores e o comportamento do qual pode ser complexo de modelar diretamente. O significado de máquina de teste é fornecido quando o dispositivo está sendo testado, por exemplo, em uma bancada (e não em uso real).

[019] O presente método pode ser, desse modo, implantado por qualquer dispositivo de propulsão, que é terrestre ou não.

[020] Além de sistemas de propulsão, será prontamente entendido que o presente método pode constatar outras aplicações em

aeronáutica, em particular, em sistemas de trem de pouso ou qualquer outro dispositivo de equipamento complexo cuja operação apropriada precisa ser monitorada.

[021] Em outro campo, por exemplo, no campo ferroviário, os sistemas de frenagem de trem ou qualquer outro membro seguro de um veículo pode ser mencionado.

[022] Outros sistemas de fabricação ou experimentação também podem ser abrangidos pela invenção.

[023] O presente método é aplicável a qualquer monitoramento de medição (incluindo durante a vida do dispositivo), mas preferencialmente, o exemplo de medições de teste será fornecido: o motor 1 (ou outro dispositivo) é disposto em uma bancada de teste 2 à qual o sensor 20 é conectado. A bancada de teste 2 é projetada para simular uma operação do motor 1 em condições reais. O propósito da presente invenção é validar ou não uma medição realizada durante um teste. Desse modo, se uma medição é normal ou não está diretamente relacionado à sua validade. Uma medição declarada inválida será considerada anormal.

[024] O parâmetro de operação (valor x) é uma variável “explanatória” ou “previsível”, em oposição ao parâmetro físico medido (valor y) que é uma variável “para explicar” ou “para prever”. Em outras palavras, o valor x do parâmetro de operação é a causa, enquanto o valor y do parâmetro físico é a consequência.

[025] Mais precisamente, o parâmetro de operação é um valor controlado relacionado ao motor 1 no qual tanto um usuário pode atuar, ou o ambiente tem uma influência. Em outras palavras, esse é um comando de entrada. Em seguida na presente descrição, a velocidade de motor (que é o número de revoluções realizadas por um rotor do motor 1 por unidade de tempo, frequentemente denominado diretamente “rpm de motor” quando a

unidade de tempo é um minuto) será obtida, mas será entendido que muitos outros parâmetros de operação, tais como a taxa de fluxo de combustível injetado no motor 1, uma temperatura de combustível injetado no motor 1, uma pressão ambiente ao redor do motor 1 e uma temperatura ambiente ao redor do motor 1, podem ser monitorados. Esse parâmetro é um parâmetro de entrada escolhido para o motor.

[026] O parâmetro físico é representativo de uma quantidade física característica de um comportamento esperado do motor 1 em resposta à aplicação do parâmetro de operação, ao qual quantidade física é adaptada ao sensor 20. Entende-se que uma pluralidade de sensores 20 adaptados para quantidades físicas diferentes pode ser fornecida. Em particular, esse parâmetro físico pode ser uma pressão em um ponto do motor 1, uma temperatura interna em um ponto do motor 1, a taxa de fluxo de fluido em um ponto do motor 1, um nível de ruído gerado pelo motor 1, uma densidade de combustível no motor 1, etc. Técnicos no assunto escolherão o tipo de quantidade física a ser medido como uma função dos propósitos de teste. Em seguida na presente descrição, uma pressão medida por um sensor de pressão 20 será obtida conforme um exemplo.

[027] Um par $(x; y)$ indica um ponto aquisição: para um valor do parâmetro de operação, um valor y do parâmetro físico é medido pelo sensor 20.

[028] Uma pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, m]}$ sendo que cada um define um valor de referência do parâmetro físico para um valor x_i do parâmetro de operação é armazenada em um banco de dados (que constitui o banco de dados de teste previamente discutido) por si armazenado em meios de armazenamento de dados 32. Por valores de “referência”, entende-se que os mesmos são adquiridos durante fases de teste estabilizadas, ou seja, que os mesmos podem ser considerados normais. Os valores anormais possíveis já

foram removidos da base.

[029] Os meios de armazenamento de dados 32 (que são tipicamente um disco rígido) e meios de processamento de dados 31 (por exemplo, um processador) são tanto aqueles de um equipamento 3 conectado ao sensor 20 (conforme representado na Figura 1) ou integrados diretamente à bancada de teste 2. O equipamento 3 (ou outro equipamento) é equipado com meios de interface 33 (tal como um teclado e uma tela) para interagir com o banco de dados e, em particular, para exibir os resultados (consulte abaixo).

[030] O par (x_{exec} ;) indica a medição “monitorada”, ou seja, aquela para a qual tenta-se determinar se o valor medido é normal ou não.

[031] Essa medição monitorada pode ser tanto uma medição obtida em tempo real (em particular, em uma operação durante a vida do motor) ou até mesmo uma medição em tempo atrasado (par (x_{exec} ;) já armazenado no banco de dados e em espera).

[032] Pode haver um sistema para averiguar e analisar o banco de dados de teste em tempo real implantado pelos meios de processamento de dados 31.

FASE DE APRENDIZADO

[033] O presente método compreende duas fases. A primeira é uma fase de aprendizado e a segunda é uma fase de execução. Preferencialmente, a fase de aprendizado é implantada previamente de modo a criar modelos que serão descritos abaixo (e possivelmente armazenar os mesmos nos meios de armazenamento de dados 32), e a fase de execução é, então, implantada em cada nova aquisição de uma medição. É a fase de execução que torna possível estimar se um valor medido y_{exec} é normal ou não, que é o objetivo da invenção. A fase de aprendizado pode ser retomada de tempo em tempo para atualizar os modelos.

[034] Alternativamente, é um tanto possível não realizar um

aprendizado anterior e determinar os modelos em tempo real em cada implantação da fase de execução.

[035] Ambas as fases serão descritas a seguir na presente descrição.

[036] A fase de aprendizado pode ser vista como um conjunto de etapas de processamento apenas dos dados da base (isto é, independentemente do par (;)).

[037] Referindo-se à Figura 2a (que usa o exemplo dos parâmetros de velocidade/pressão), a fase de aprendizado é iniciada com uma etapa (a0) de determinação de um modelo de regressão relacionado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, m]}$ por uma regressão que modela y como uma função de x no conjunto dos valores dos pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, m]}$. Esse modelo de regressão será usado na fase de execução.

[038] A regressão indica um conjunto de métodos estatísticos bem conhecidos pelos técnicos no assunto para analisar a relação de uma variável (no presente documento) relativa a uma ou mais dentre outras (no presente documento). A etapa (a0) consiste, em outras palavras, em determinar uma função que possibilita que os valores y_i sejam mais bem aproximados com base em valores x_i , para um determinado tipo de ligação. As regressões lineares, polinomiais, exponenciais, logarítmicas, etc. também são conhecidas.

[039] A escolha do tipo de ligação usado é realizada vantajosamente como uma função do formato de curva e pode ser feita automaticamente através de otimização maximizando-se um coeficiente de determinação, por exemplo, do modo descrito no pedido de patente nº FR2939928.

[040] A Figura 3a ilustra a plotagem de dispersão formada pelos pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, m]}$ e o modelo obtido por regressão.

[041] Em uma segunda etapa (a1), a fase de aprendizado compreende calcular, para cada um dos pares, um valor estimado \hat{y}_i do parâmetro físico e um resíduo res_i que é relacionado um ao outro. O resíduo é a diferença entre um valor estimado e um valor medido. A partir do modelo de regressão, esses valores são simplesmente obtidos pelas fórmulas $\hat{y}_i = [f(x)]_i$, e , para $i \in [1, n]$. A Figura 3b ilustra os resíduos obtidos para o modelo.

[042] Em uma etapa (a2), a média dos ditos resíduos é calculada:

$$mean = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n res_i .$$

[043] Uma vez que o modelo de regressão estiver criado, os meios de processamento de dados 31 determinam outro modelo usado na fase de execução: esse é o modelo de variância.

[044] Esse modelo também relacionado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ é tipicamente calculado em duas etapas consecutivas. Em uma etapa (a3), um conjunto de valores $(var_j)_{j \in [1, n-w+1]}$ de variância residual é calculado, cujo conjunto de valores possibilitará que uma regressão na etapa (a4) seja implantada a fim de obter o modelo de variância.

[045] De um modo conhecido, a variância é calculada como a média residual quadrada. A obtenção de uma pluralidade de valores de variância é feita em virtude de uma "janela deslizante" dimensionada (é um parâmetro predeterminado do algoritmo, é preferencialmente escolhido de um tamanho suficiente para evitar um problema de alargamento do tubo de confiança, consulte abaixo. A título de exemplo, 10% do número de amostras pode ser obtido). Mais precisamente, para cada valor de variância var_j , é calculado um subconjunto (índices para) do conjunto de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$.

Em particular,

$$var_j = \frac{1}{w-2} \sum_{i=j}^{j+w-1} (res_i)^2 .$$

[046] De modo similar ao que é realizado na etapa (a0), o

modelo de variância relacionado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in \mathbb{1}, n}$ é determinado na etapa (a4) por uma regressão que modela var como uma função de x . Em outras palavras, nessa etapa, os meios de processamento de dados 31 determinam a função g de modo que $\widehat{var}_j = g(x_j)$, para $j \in \mathbb{1}, n - w + 1$.

[047] A Figura 3c ilustra a plotagem de dispersão formada pelos $n - w + 1$ pares $\{x_j; var_j\}_{j \in \mathbb{1}, n - w + 1}$ e o modelo obtido por regressão.

[048] Em uma etapa opcional (a5), a fase de aprendizado pode compreender a definição de um “tubo de confiança” (isto é, uma região de confiança) ao redor do modelo de regressão. Esse tubo consiste em uma delimitação superior e uma delimitação inferior. Entre ambas essas delimitações, um ponto relacionado a um par $(x; y)$ é considerado como normal, e não externo, conforme será visto abaixo.

[049] O tubo de confiança é definido por um desvio de amplitude $|\sigma \times \sqrt{g}|$ em relação ao modelo de regressão, ou um limite de desvio padrão (consulte abaixo). Conforme explicado anteriormente, esse tubo define um intervalo de confiança que é uma função da variância, que aumenta o realismo dos resultados: o número de falsos negativos e falsos positivos é substancialmente reduzido.

[050] A equação da delimitação superior é fornecida pela fórmula $f(x) + \sigma \times \sqrt{g(x)}$, e aquela da delimitação inferior pela fórmula $f(x) - \sigma \times \sqrt{g(x)}$.

[051] O tubo de confiança é adicionado preferencialmente a uma representação da plotagem de dispersão formada pelos pares $(x_i; y_i)_{i \in \mathbb{1}, n}$ e o modelo obtido por regressão (do tipo da Figura 3a) de modo a proporcionar a Figura 3d. Conforme será visto abaixo, esse tubo possibilita que o resultado da fase de execução seja antecipado e se uma medição é ou não normal seja ilustrado de um modo muito visual (e compreensivo que inclui aqueles não técnicos no assunto).

[052] Será observado que a distribuição dos pontos $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ não é igual dependendo do parâmetro x . No exemplo em que o parâmetro de operação é a velocidade, há, de fato, muito mais medições em uma velocidade alta do que em uma velocidade baixa. Essa distribuição desigual pode causar um alargamento do tubo de confiança em sua origem, conforme representado no exemplo da Figura 3e, se o parâmetro w não for bem escolhido.

[053] Preferencialmente, o parâmetro w é escolhido de modo suficientemente alto de modo que a função g seja crescente. Para isso, as etapas (a3) depois (a4) podem ser repetidas de modo iterativo com valores crescentes de w até que essa condição seja satisfeita.

FASE DE EXECUÇÃO

[054] Conforme explicado previamente, a fase de aprendizado representa um trabalho preparatório para acelerar a fase de execução (que corresponde ao núcleo do presente método de acordo com a invenção). A fase de aprendizado pode ser realizada alternativamente “ao mesmo tempo” que a fase de execução. Na descrição dessa parte, referência será feita a todas as fórmulas relacionadas descritas previamente.

[055] Essa fase torna possível estimar se um valor medido y_{exec} do parâmetro físico para um valor x_{exec} do parâmetro de operação é ou não normal.

[056] Essa fase é ilustrada pela Figura 2b. Se a fase de aprendizado tiver sido implantada previamente, os modelos podem ser carregados a partir dos meios de armazenamento de dados 32, conforme ilustrado nessa Figura.

[057] Em uma etapa (a), um valor estimado \hat{y}_{exec} do parâmetro físico é calculado para o valor x_{exec} do parâmetro de operação com base no modelo de regressão relacionado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ (modelo possivelmente determinado na fase de aprendizado). Esse cálculo é

feito conforme previamente explicado pela fórmula $\hat{y}_{exec} = \llbracket f(x) \rrbracket_{exec}$.

[058] Na etapa a seguir (b), o resíduo relacionado Res_{exec} é calculado: $res_{exec} = y_{exec} - \hat{y}_{exec}$.

[059] Na etapa (c) (que pode ser realizada com qualquer uma ou ambas as etapas (a) e (b)), um valor estimado \hat{var}_{exec} da variância do parâmetro físico é calculado para o valor x_{exec} do parâmetro de operação com base no modelo de variância relacionado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$ (modelo possivelmente determinado na fase de aprendizado). Esse cálculo é feito conforme explicado previamente pela fórmula $\hat{var}_{exec} = \llbracket g(x) \rrbracket_{exec}$.

[060] O resíduo, o valor estimado \hat{var}_{exec} da variância e o valor médio residual $mean$ (calculado opcionalmente durante a fase de aprendizado) para a dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in \llbracket 1, n \rrbracket}$ possibilitam que os meios de processamento de dados calculem em uma etapa (d) uma pontuação de anomalia (também denominada pontuação de confiança) Z_{score} do valor medido y_{exec} . Preferencialmente, a pontuação de anomalia é fornecida pela fórmula $Z_{score} = \left| \frac{res_{exec} - mean}{\sqrt{\hat{var}_{exec}}} \right|$. Quanto mais alta essa pontuação, maior a probabilidade de que a medição seja anormal.

[061] Em uma etapa (e), a pontuação de anomalia (Z_{score}) do valor medido y_{exec} é comparada ao limite previamente discutido σ (um limite expresso como um número de desvios padrão, por exemplo, três a seis desvios padrão).

[062] Se a pontuação de anomalia Z_{score} for maior do que o dito limite σ , a medição é sinalizada como anormal na interface 33 em uma etapa (f). Um alarme pode ser disparado se for um teste em tempo real em uma bancada de teste 2, e o último é interrompido (o teste atual não é válido e a anomalia deve ser analisada antes de a bancada de teste poder ser reusada).

O par $(x_{exec}; y_{exec})$, então, não é adicionado ao banco de dados, (ou excluído se tivesse esperando para verificação).

[063] No caso contrário, a medição é considerada normal, e o par $(x_{exec}; y_{exec})$ se une aos valores de referência do banco de dados. A fase de aprendizado pode ser possivelmente retomada para atualizar os modelos.

[064] Preferencialmente, um relatório de síntese (por exemplo, para o departamento de pesquisa) é, então, emitido automaticamente.

[065] Deve-se observar que uma medição anormal será representada fora do tubo de confiança previamente discutido, conforme, por exemplo, mostrado na Figura 3f.

[066] Em particular, se $Z_{score} > \sigma$, então, $|res_{exec} (= y_{exec} - \hat{y}_{exec}) - mean| > \sigma \times \hat{var}_{exec}$ (= o meio diâmetro do tubo de confiança), que significa que o ponto relacionado está fora do tubo de confiança.

[067] De fato, os resíduos obedecem a uma lei normal com uma média $mean$. O teste (comparação com o Z_{score}) consiste em determinar se é possível que a observação atual se origine da mesma lei.

[068] Se a distribuição da lei normal for retirada, pode ser visto que além desses seis desvios padrão, a localização está na cauda de distribuição. A probabilidade de observar algo normal além desse limite de desvio padrão está na ordem de 10^{-9} .

EQUIPAMENTO E SISTEMA

[069] O equipamento 3 (representado na Figura 1) para a implantação do método que acabou de ser descrito (estimar se um valor y_{exec} medido por um sensor 20 de um parâmetro físico de um dispositivo 1 tal como um motor de aeronave é ou não normal para um valor x_{exec} de um parâmetro de operação do dito dispositivo 1) compreende meios de processamento de dados 31, meios de armazenamento de dados 32 e meios de interface 33.

[070] Os meios de armazenamento de dados 32 armazenam, em um banco de dados, a pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ que define, cada um, um valor de referência do parâmetro físico para um valor x_i de um parâmetro de operação.

[071] Os meios de processamento de dados 31 são configurados para implantar:

- um módulo para calcular, com base em um modelo de regressão relacionado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$, um valor estimado \hat{y}_{exec} do parâmetro físico para o valor x_{exec} do parâmetro de operação;

- um módulo para calcular um resíduo relacionado res_{exec} ;

- um módulo para calcular, com base em um modelo de variância relacionado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ um valor estimado \hat{var}_{exec} de uma variância do parâmetro físico para o valor x_{exec} do parâmetro de operação;

- um módulo para calcular uma pontuação de anomalia Z_{score} do valor medido y_{exec} com base no resíduo res_{exec} , o valor de variância estimado \hat{var}_{exec} , e um valor residual médio para a dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$;

- um módulo para comparar a pontuação de anomalia Z_{score} do valor medido y_{exec} com um limite de desvio padrão σ ;

- um módulo para transmitir um sinal de alarme nos meios de interface 33 que sinaliza a medição como anormal se a pontuação de anomalia Z_{score} for maior do que o dito limite σ .

[072] Se o equipamento 3 também implantar a fase de aprendizado, então, o módulo de processamento de dados 31 é configurado adicionalmente para implantar:

- um módulo para determinar o dito modelo de regressão relacionado à dita pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ por uma regressão que

modela o valor com base no valor x a partir do conjunto $\{x_i; y_i\}_{i \in \mathbb{I}, n}$ (esse módulo é possivelmente configurado para armazenar o modelo de variância nos meios de armazenamento de dados 32 para um uso futuro);

- um módulo para calcular, para cada um dentre os pares $\{x_i; y_i\}_{i \in \mathbb{I}, n}$, um valor estimado \hat{y}_i do parâmetro físico e um resíduo res_i que é relacionado um ao outro;

- um módulo para calcular a média dos ditos resíduos res_i ;

- um módulo para calcular, em uma janela deslizante dimensionada w um conjunto de valores $(var_j)_{j \in \mathbb{I}, n-w+1}$ de variância residual;

- um módulo para determinar o dito modelo de variância relacionado à dita pluralidade de pares $\{x_i; y_i\}_{i \in \mathbb{I}, n}$ por uma regressão que modela var , com base em x a partir do conjunto $\{x_j; var_j\}_{j \in \mathbb{I}, n-w+1}$ (esse módulo é possivelmente configurado para armazenar o modelo de variância nos meios de armazenamento de dados 32 para um uso futuro).

[073] O equipamento 3 é, conforme explicado de modo preferencial, incluído em um sistema que compreende adicionalmente uma bancada de teste 2 que compreende o sensor 20 que mede o valor y_{exec} do parâmetro físico e adaptado para receber o dispositivo 1.

PRODUTO DE PROGRAMA DE COMPUTADOR

[074] De acordo com um quarto e um quinto aspectos, a invenção se refere a um produto de programa de computador que compreende instruções de código para realizar (em meios de processamento de dados 31, em particular aqueles do equipamento 3) um método de acordo com o primeiro aspecto da invenção para estimar se um valor y_{exec} medido por um sensor 20 de um parâmetro físico de um dispositivo 1 é ou não normal para um valor x_{exec} de um parâmetro de operação do dito dispositivo 1, bem como meios de armazenamento legíveis por um equipamento de computação (por exemplo, os

meios de armazenamento de dados 32 desse equipamento 3) no qual esse produto de programa de computador é encontrado.

REIVINDICAÇÕES

1. MÉTODO PARA ESTIMAR SE UM VALOR (y_{exec}) MEDIDO POR UM SENSOR (20) DE UM PARÂMETRO FÍSICO DE UM DISPOSITIVO (1) É NORMAL PARA UM VALOR (x_{exec}) DE UM PARÂMETRO DE OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO (1), uma pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ sendo que cada um define um valor de referência (y_i) do parâmetro físico para um valor (x_i) do parâmetro de operação que é armazenado em um banco de dados armazenado em meios de armazenamento de dados (32), sendo que o método é caracterizado por compreender implantar através de meios de processamento de dados (31) as etapas de:

(a) calcular, com base em um modelo de regressão relacionado à pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$, um valor estimado (\hat{y}_{exec}) do parâmetro físico para o valor (x_{exec}) do parâmetro de operação;

(b) calcular um resíduo relacionado (res_{exec});

(c) calcular, com base em um modelo de variância relacionado à pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$, um valor estimado (\hat{var}_{exec}) de uma variância do parâmetro físico para o valor (x_{exec}) do parâmetro de operação;

(d) calcular uma pontuação de anomalia (Z_{score}) do valor medido (y_{exec}) com base no resíduo (res_{exec}), o valor estimado (\hat{var}_{exec}) da variância, e um valor residual médio ($mean$) para a pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$;

(e) comparar a pontuação de anomalia (Z_{score}) do valor medido (y_{exec}) com um limite de desvio padrão (σ);

(f) se a pontuação de anomalia (Z_{score}) for maior do que o limite (σ), sinalizar a medição como anormal em meios de interface (33).

2. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por compreender uma fase anterior de processar a pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ do banco de dados, que compreende implantar através de

meios de processamento de dados (31) as etapas de:

(a0) determinar o modelo de regressão relacionado à pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ por uma regressão que modela o valor do parâmetro físico com base no valor x do parâmetro de operação a partir do conjunto $\{x_i; y_i\}_{i \in [1, n]}$, em que $x_i; y_i$ indica os valores de um par armazenado no banco de dados;

(a1) para cada um dentre os pares $\{x_i; y_i\}_{i \in [1, n]}$ calcular um valor estimado (\hat{y}_i) do parâmetro físico e um resíduo relacionado (res_i);

(a2) calcular a média (*mean*) dos resíduos (res_i);

(a3) calcular, em uma janela deslizante dimensionada w , um conjunto de valores

$(var_j)_{j \in [1, n-w+1]}$ de variância residual sendo que cada um está relacionado a um valor (x_j) do parâmetro de operação de um par $(x_j; y_j)_{j \in [1, n-w+1]}$;

(a4) determinar o modelo de variância relacionado à pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ por uma regressão que modela o valor *var* da variância residual com base no valor x do parâmetro de operação a partir do conjunto

$\{x_j; var_j\}_{j \in [1, n-w+1]}$, em que var_j indica um valor residual de variância calculado e x_j o valor do parâmetro de operação relacionado.

3. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pela fase anterior compreender uma etapa (a5) de determinar, com base no modelo de variância determinado, uma região de confiança ao redor do modelo de regressão determinado, e exibir nos meios de interface (33) a região de confiança.

4. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pela região de confiança ser definida por uma delimitação superior da fórmula

$f(x) + \sigma \times \sqrt{g(x)}$, e uma delimitação inferior da fórmula $f(x) - \sigma \times \sqrt{g(x)}$, em que f representa o modelo de regressão e g representa o modelo de variância.

5. MÉTODO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pela pontuação de anomalia (Z_{score}) ser obtida pela fórmula

$$Z_{score} = \left| \frac{res_{exec} - mean}{\sqrt{\widehat{var}_{exec}}} \right|$$

em que res_{exec} é o resíduo relacionado ao valor medido do parâmetro físico, \widehat{var}_{exec} o valor estimado da variância e $mean$ é o valor residual médio para a pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$.

6. MÉTODO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado pelo dispositivo (1) ser um motor de aeronave.

7. MÉTODO, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo parâmetro físico ser escolhido a partir de uma pressão, uma temperatura interna, uma taxa de fluxo de fluido, um nível de ruído e uma densidade de combustível, relacionado ao motor (1).

8. MÉTODO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 6 a 7, caracterizado pelo parâmetro de operação ser escolhido a partir de uma velocidade, uma taxa de fluxo de combustível, uma temperatura de combustível, uma pressão ambiente e uma temperatura ambiente, relacionado ao motor (1).

9. MÉTODO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 6 a 8, caracterizado pelo motor (1) ser disposto em uma bancada de teste (2) que compreende o sensor (20), sendo que a etapa (e) compreende desligar a bancada de teste (2) se a medição for sinalizada como anormal.

10. MÉTODO, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pela etapa (e) compreender adicionar o par $(x_{exec}; y_{exec})$ formado pelo valor medido do parâmetro físico e pelo valor do parâmetro de

operação relacionado ao banco de dados de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ se a medição não for sinalizada como anormal.

11. EQUIPAMENTO (3) PARA ESTIMAR SE UM VALOR (y_{exec}) MEDIDO POR UM SENSOR (20) DE UM PARÂMETRO FÍSICO DE UM DISPOSITIVO (1) É NORMAL PARA UM VALOR (x_{exec}) DE UM PARÂMETRO DE OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO (1) que compreende meios de processamento de dados (31), meios de armazenamento de dados (32) que armazenam em um banco de dados uma pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ sendo que cada um define um valor de referência y_i do parâmetro físico para um valor x_i de um parâmetro de operação e meios de interface (33), sendo que o equipamento (3) é caracterizado pelos meios de processamento de dados (31) serem configurados para implantar:

- um módulo para calcular, com base em um modelo de regressão relacionado à pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$, um valor estimado \hat{y}_{exec} do parâmetro físico para o valor x_{exec} do parâmetro de operação;

- um módulo para calcular um resíduo relacionado (res_{exec});

- um módulo para calcular, com base em um modelo de variância relacionado à pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$, um valor estimado (\hat{var}_{exec}) de uma variância do parâmetro físico para o valor (x_{exec}) do parâmetro de operação;

- um módulo para calcular uma pontuação de anomalia (Z_{score}) do valor medido (y_{exec}) com base no resíduo (res_{exec}), no valor de variância estimado (\hat{var}_{exec}), e em um valor residual médio ($mean$) para a pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$;

- um módulo para comparar a pontuação de anomalia (Z_{score}) do valor medido (y_{exec}) com um limite de desvio padrão (σ);

- um módulo para transmitir um sinal de alarme nos meios de interface (33) que sinaliza a medição como anormal se a pontuação de

anomalia (Z_{score}) for maior do que o limite (σ).

12. EQUIPAMENTO, de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo módulo de processamento de dados (31) ser configurado adicionalmente para implantar:

- um módulo para determinar o modelo de regressão relacionado à pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ por uma regressão que modela o valor do parâmetro físico com base no valor x do parâmetro de operação a partir do conjunto $\{x_i; y_i\}_{i \in [1, n]}$, em que $x_i; y_i$ indica os valores de um par armazenado no banco de dados;

- um módulo para calcular, para cada um dentre os pares $\{x_i; y_i\}_{i \in [1, n]}$, um valor estimado (\hat{y}_i) do parâmetro físico e um resíduo (res_i) que é relacionado um ao outro;

- um módulo para calcular a média ($mean$) dos resíduos (res_i);

- um módulo para calcular, em uma janela deslizante dimensionada w , um conjunto de valores

$$(var_j)_{j \in [1, n-w+1]}$$

de variância residual, sendo que cada um está relacionado a um valor (x_j) do parâmetro de operação de um par

$$(x_j; y_j)_{j \in [1, n-w+1]};$$

- um módulo para determinar o modelo de variância relacionado à pluralidade de pares $(x_i; y_i)_{i \in [1, n]}$ por uma regressão que modela var , com base em x a partir do conjunto

$$\{x_j; var_j\}_{j \in [1, n-w+1]},$$

em que var_j indica um valor residual de variância calculado e x_j o valor do parâmetro de operação relacionado.

13. SISTEMA PARA ESTIMAR SE UM VALOR (y_{exec}) MEDIDO POR UM SENSOR (20) DE UM PARÂMETRO FÍSICO DE UM

DISPOSITIVO (1) É NORMAL PARA UM VALOR (x_{exec}) DE UM PARÂMETRO DE OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO (1) caracterizado por compreender:

- uma bancada de teste (2) que compreende um sensor (20) e adaptada para receber um dispositivo (1);

- um equipamento (3), conforme definido em qualquer uma das reivindicações 11 a 12, para estimar se um valor (y_{exec}) medido pelo sensor (20) de um parâmetro físico do dispositivo (1) é ou não normal para um valor (x_{exec}) de um parâmetro de operação do dispositivo (1).

14. MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR que armazena instruções executáveis por computador, caracterizado por compreender instruções para realizar um método, conforme definido em qualquer uma das reivindicações 1 a 10 que, quando executadas por um processador, fazem com que o processador estime se um valor y_{exec} medido por um sensor (20) de um parâmetro físico de um dispositivo (1) é normal ou não para um valor x_{exec} de um parâmetro de operação do dispositivo (1).

FIG. 1

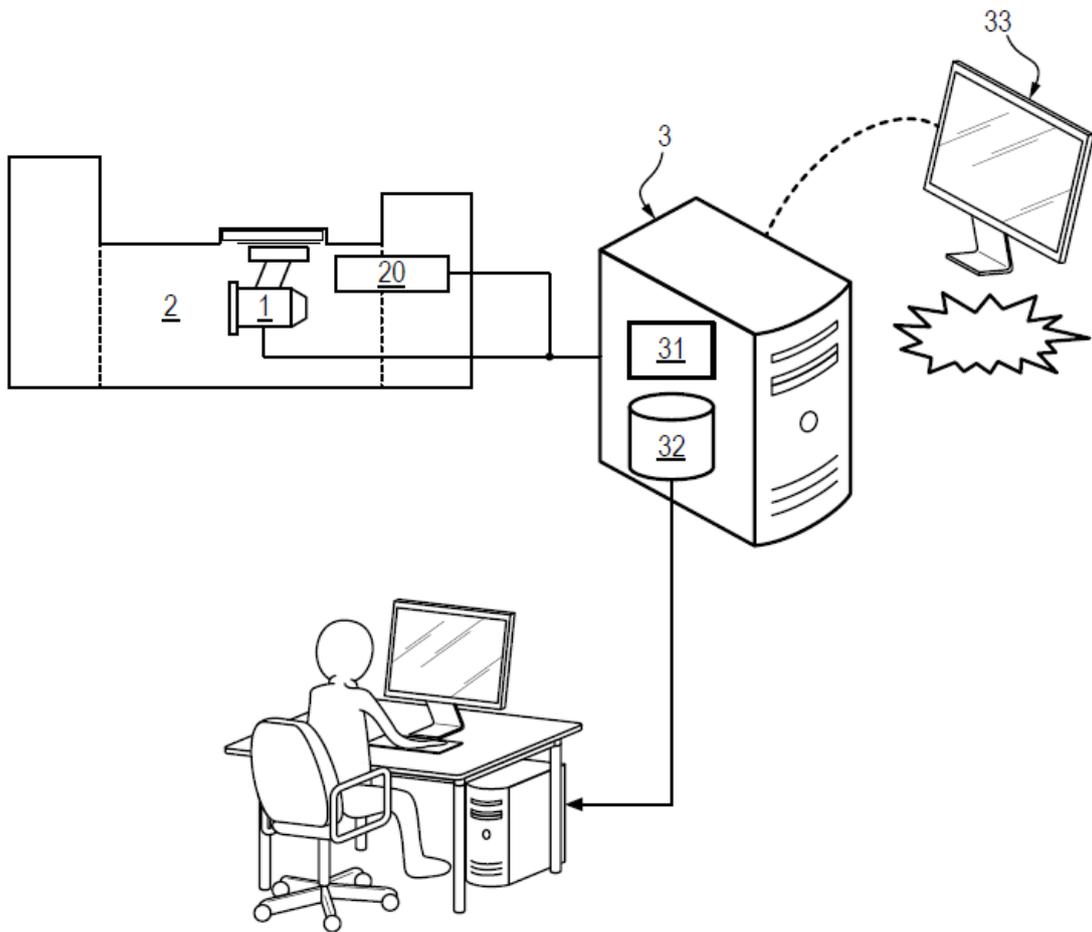


FIG. 2a

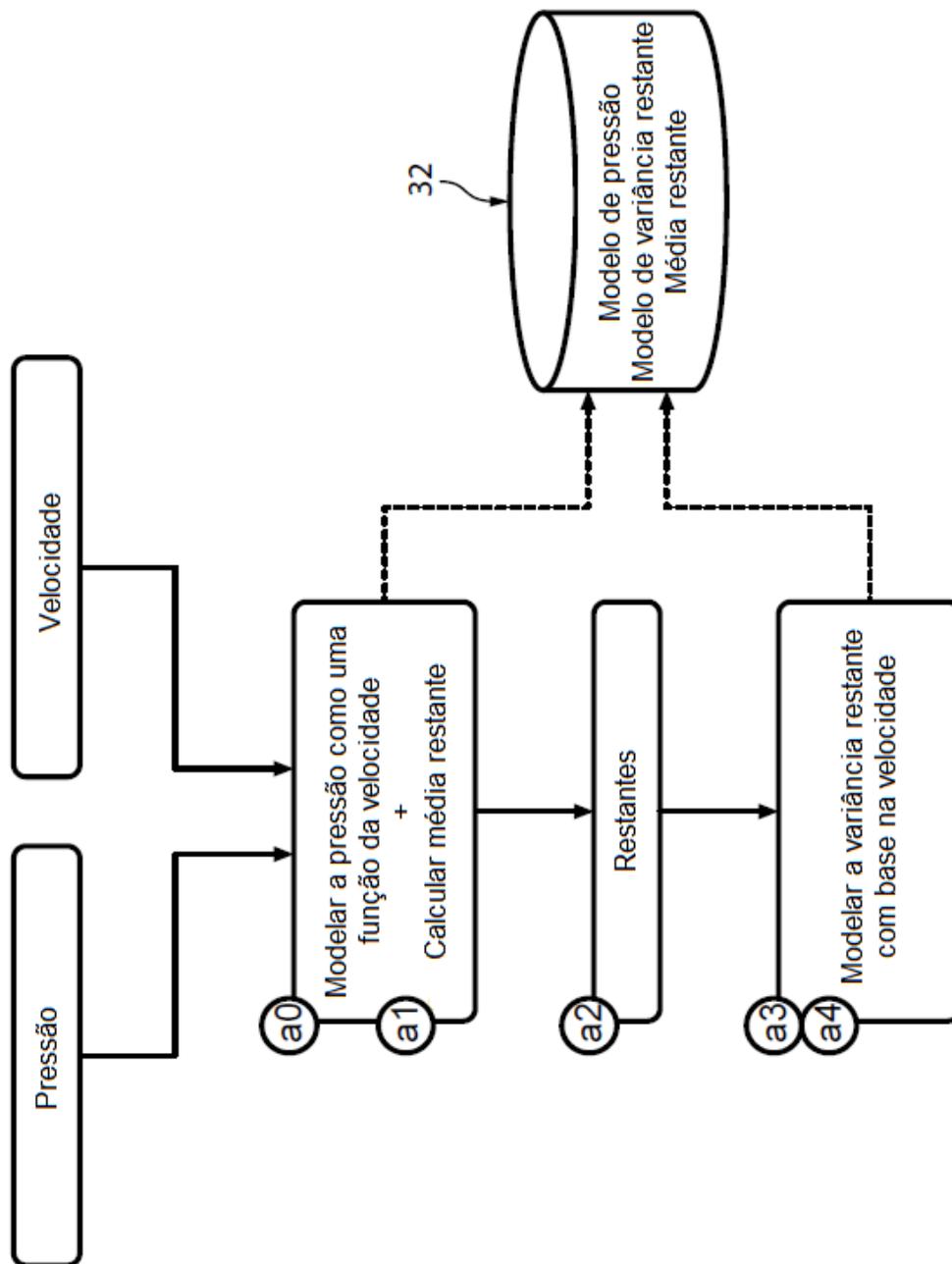


FIG. 2b

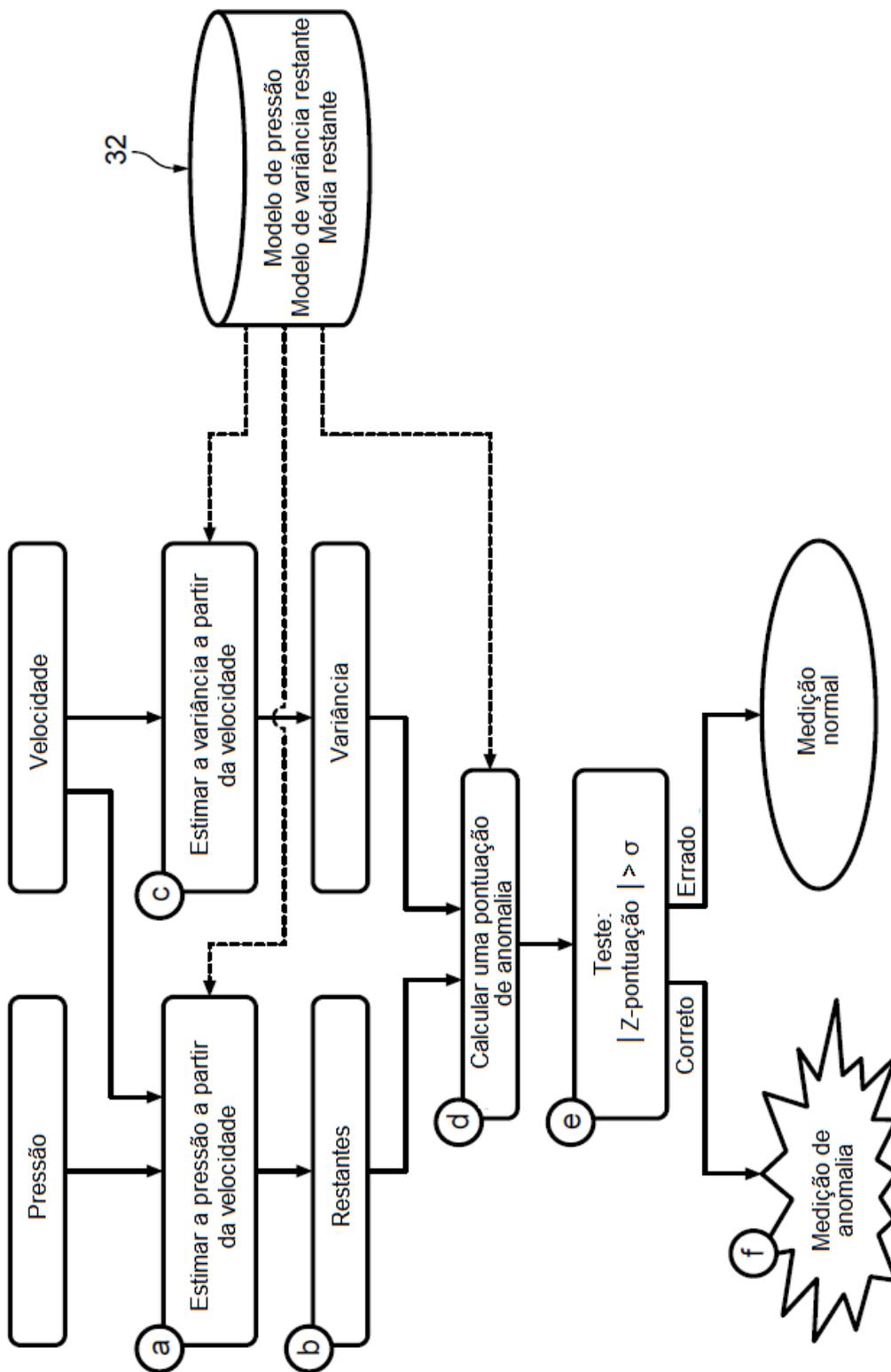


FIG. 3a

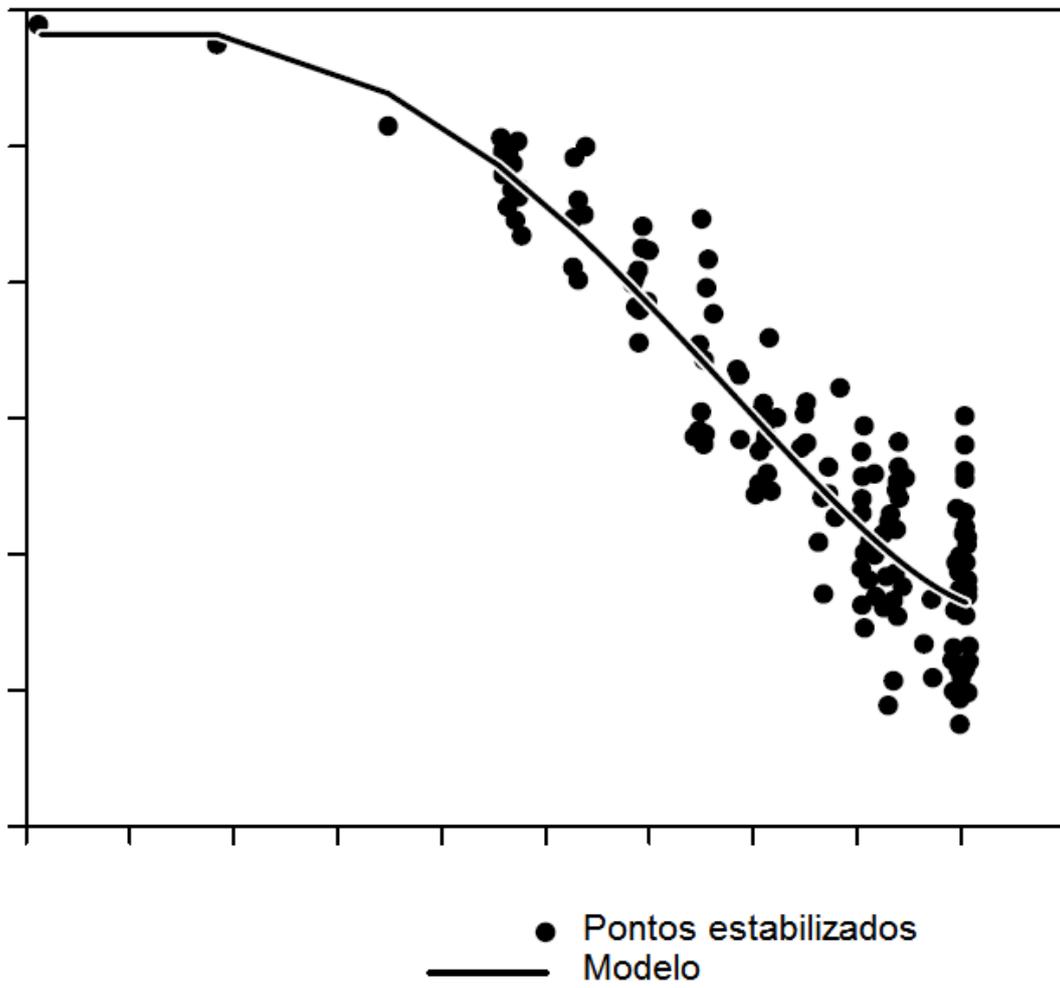
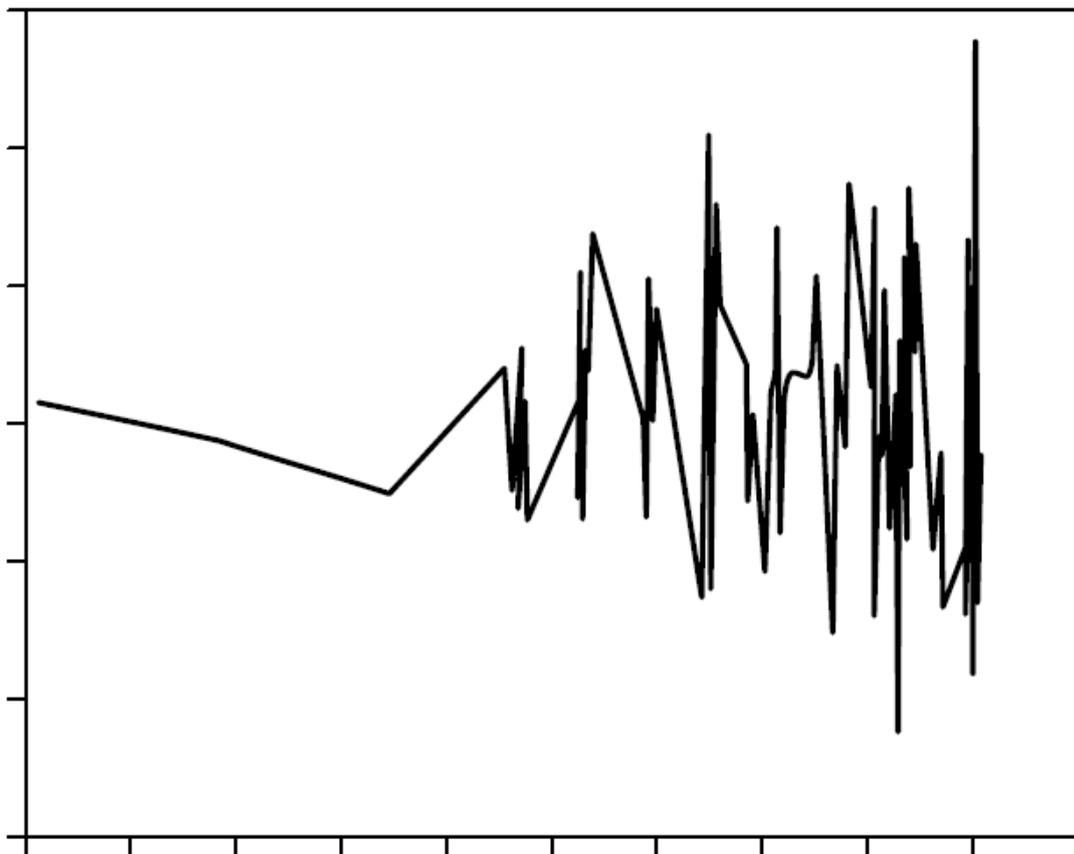


FIG. 3b



— Restantes

FIG. 3c

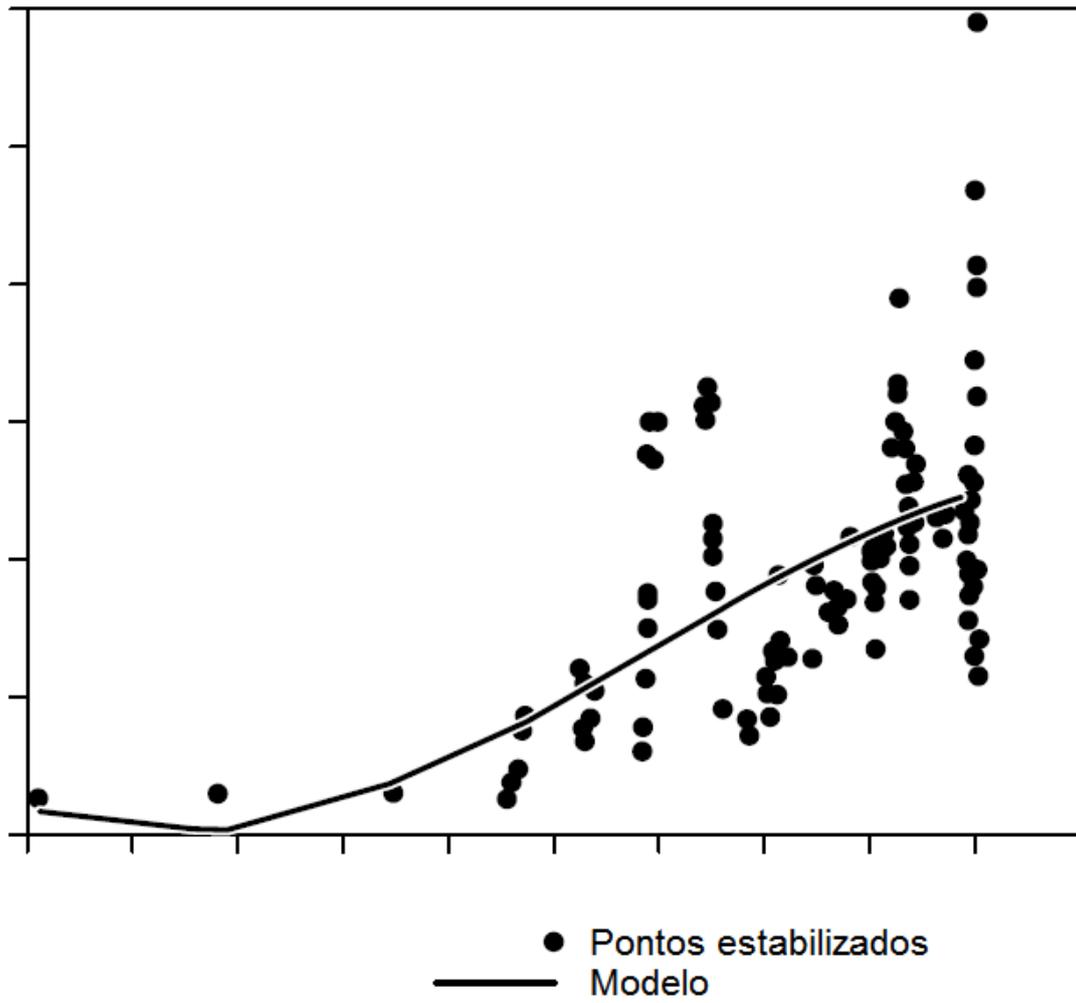
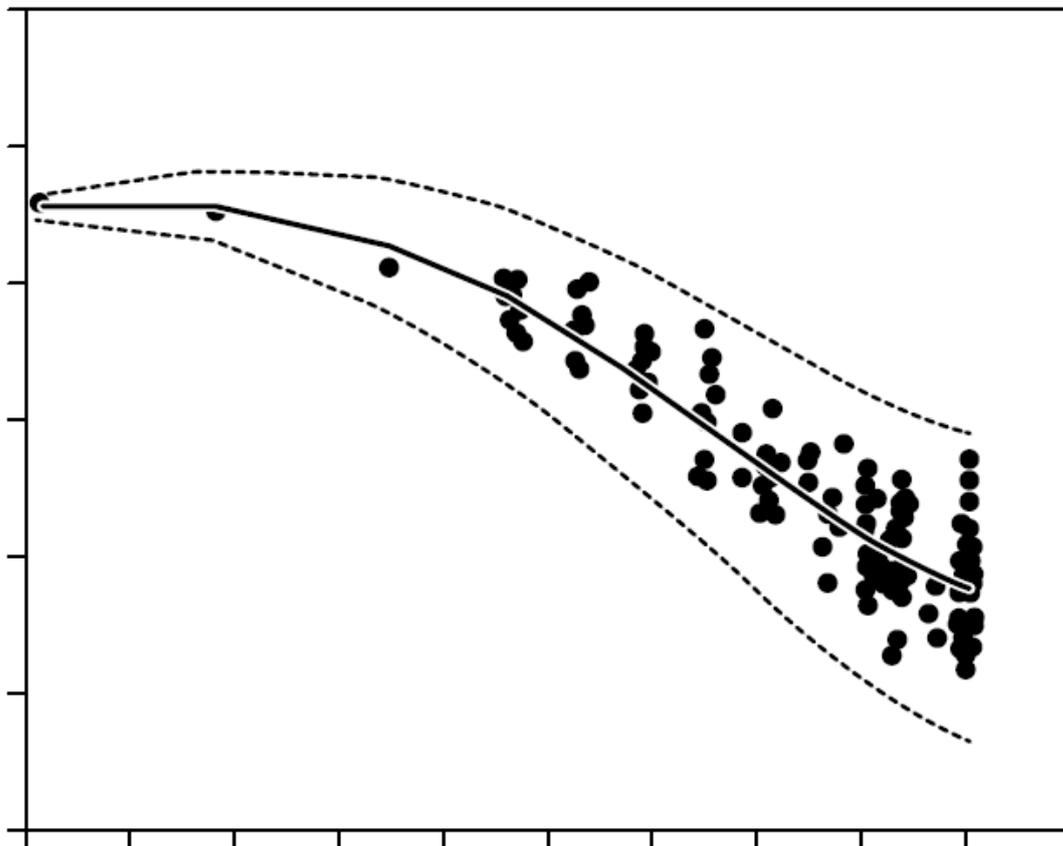


FIG. 3d



- Pontos estabilizados
- Modelo
- - - - - Tubo de confiança

FIG. 3e

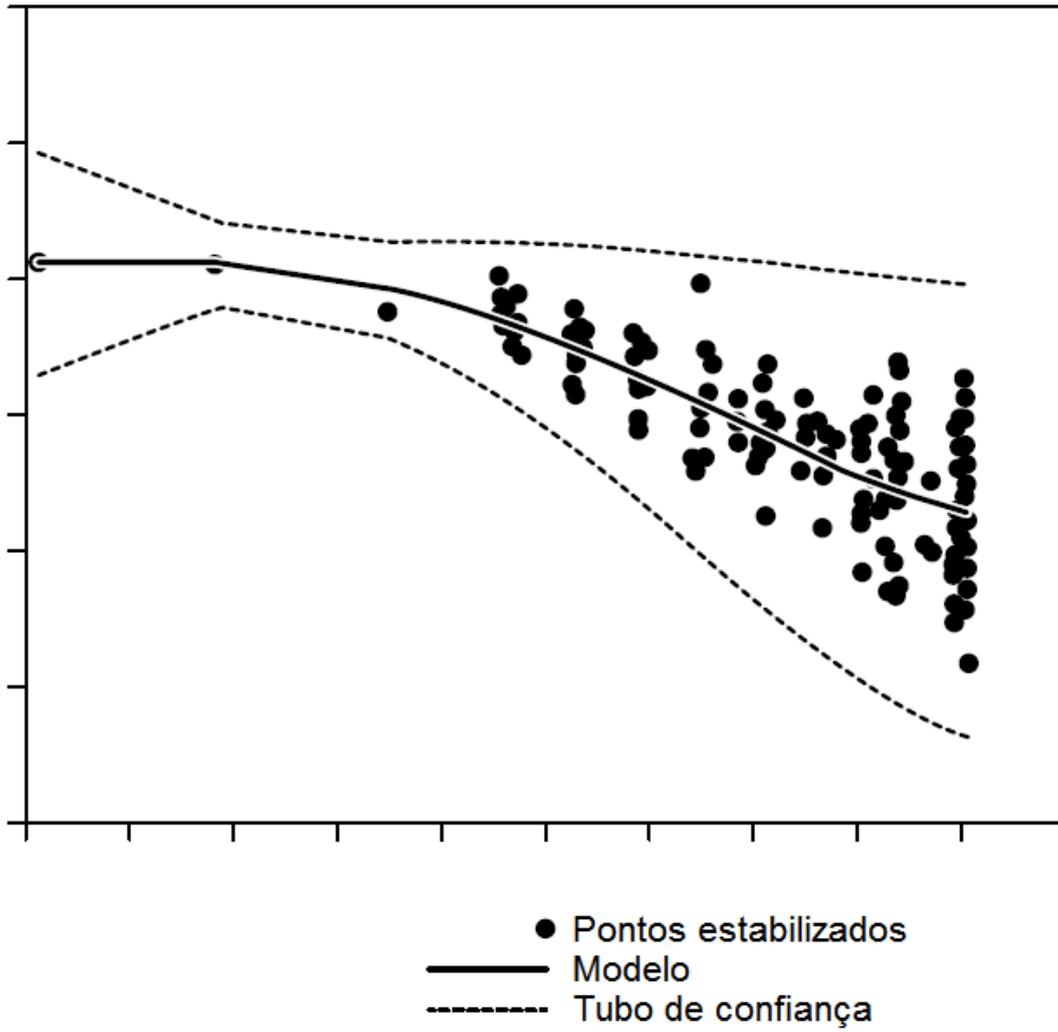
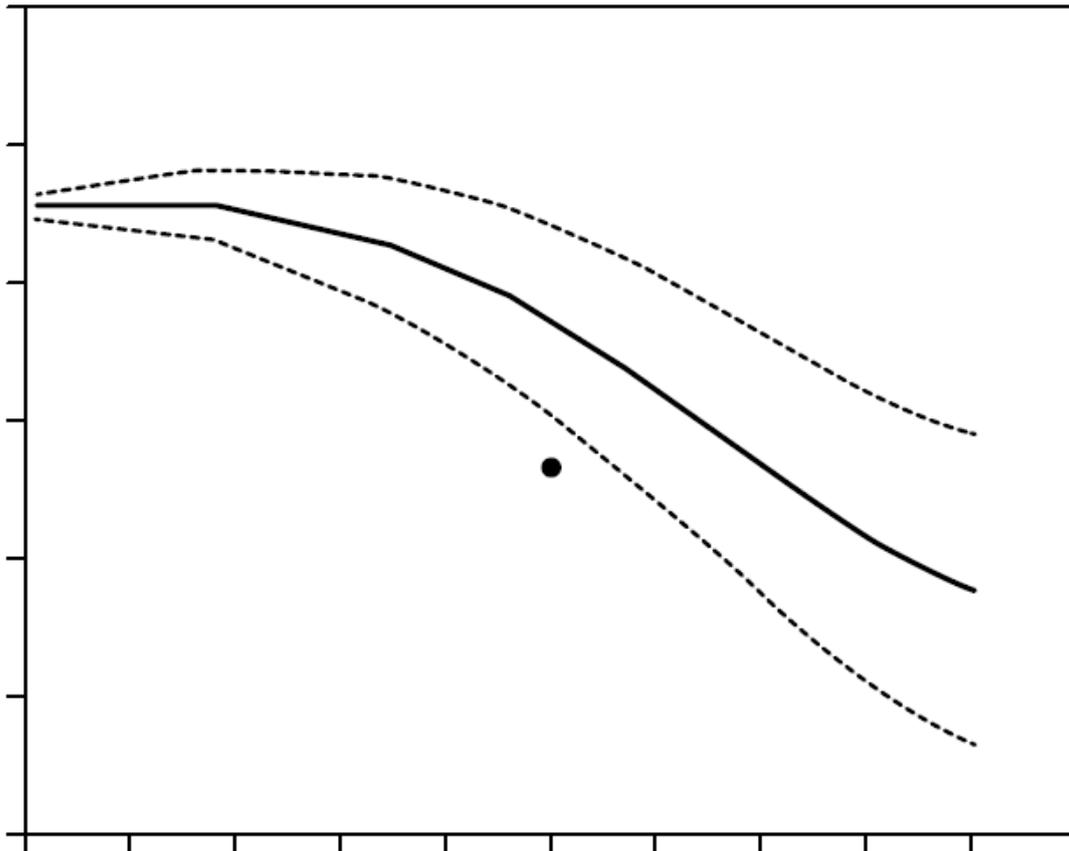


FIG. 3f



- Ponto estabelecido anormal
- Modelo
- - - - - Tubo de confiança