



Universidade Federal da Bahia  
Instituto de Matemática

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**APLICANDO REDES DE FUNÇÃO DE BASE  
RADIAL PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS  
DE CONCEITO EM FLUXOS CONTÍNUOS  
DE DADOS**

Ruivaldo Azevedo Lobão Neto

QUALIFICAÇÃO DE MESTRADO

Salvador  
03 de Abril de 2019



RUIVALDO AZEVEDO LOBÃO NETO

**APLICANDO REDES DE FUNÇÃO DE BASE RADIAL PARA  
DETECÇÃO DE MUDANÇAS DE CONCEITO EM FLUXOS  
CONTÍNUOS DE DADOS**

Esta Qualificação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Ricardo Araújo Rios

Salvador  
03 de Abril de 2019

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**RUIVALDO AZEVEDO LOBÃO NETO**

### **APLICANDO REDES DE FUNÇÃO DE BASE RADIAL PARA DETECÇÃO DE MUDANÇAS DE CONCEITO EM FLUXOS CONTÍNUOS DE DADOS**

Esta Qualificação de Mestrado foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal da Bahia.

Salvador, 03 de Abril de 2019

---

Prof. Dr. Ricardo Araújo Rios  
UFBA

## RESUMO

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

**Palavras-chave:** Aprendizado de Máquina, Fluxos Contínuos de Dados, Mudanças de Conceito, Redes de Função de Base Radial, Não supervisionado



## ABSTRACT

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

**Keywords:** Machine Learning, Data Streams, Concept Drift, Radial Basis Function Networks, Unlabeled





# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1—Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto e Motivação . . . . .	1
1.2 Hipótese e Objetivo . . . . .	3
<b>Capítulo 2—Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 Considerações Iniciais . . . . .	5
2.2 Fluxos Contínuos de Dados . . . . .	5
2.3 Mudança de Conceito . . . . .	9
2.3.1 Algoritmos para Detecção de Mudança de Conceito . . . . .	12
2.3.2 Ferramentas . . . . .	12
2.4 Redes de Função de Base Radial . . . . .	13
2.5 Trabalhos Relacionados . . . . .	13
2.6 Considerações Finais . . . . .	13
<b>Capítulo 3—Plano de Pesquisa</b>	<b>15</b>
3.1 Considerações Iniciais . . . . .	15
3.2 Descrição do Problema . . . . .	15
3.2.1 Atividades de Pesquisa . . . . .	15
3.3 Considerações Finais . . . . .	16
<b>Capítulo 4—Experimentos Iniciais</b>	<b>17</b>
4.1 Considerações Iniciais . . . . .	17
4.2 Configuração dos Experimentos . . . . .	17
4.3 Método de Pettitt . . . . .	17
4.4 Redes de Função de Base Radial . . . . .	18
4.5 Considerações Finais . . . . .	18



## LISTA DE FIGURAS

2.1	Mudança de Conceito Virtual vs. Mudança de Conceito Real . . . . .	10
2.2	Padrões de ocorrência de Mudanças de Conceito . . . . .	11



## **LISTA DE TABELAS**



## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

A quantidade de dados produzidos por sistemas computacionais tem crescido exponencialmente. Relatório do IDC (*International Data Corporation*) estimava que em 2014 seriam produzidos 4,4 zettabytes (trilhões de gigabytes) de dados (ZWOLENSKI; WEATHERILL, 2014). O mesmo relatório, prevê que em 2020 essa quantidade será de 44 zettabytes.

Grande parte desses sistemas produz dados através de sequências de eventos. Estas sequências são geradas de forma contínua, ordenada, em alta frequência e potencialmente infinita (FEIGENBAUM et al., 2003). Na literatura, sequências com essas características são denominadas Fluxos Contínuos de Dados (FCDs). Exemplos de sistemas que produzem fluxos dessa natureza, incluem: monitoramento de dados de sensores (Lee; Wang; Ryu, 2007), tráfego TCP/IP, histórico de compra de clientes, filtragem de SPAM em mensagens de e-mail (KATAKIS; TSOUMAKAS; VLAHAVAS, 2010), detecção de intrusos (LANE; BRODLEY, 1998), análise de sentimentos (SMAILOVIĆ et al., 2014), etc.

Nos últimos anos, técnicas de Aprendizado de Máquina (AM) aplicadas a fluxos contínuos de dados têm se tornado um importante tema de pesquisa. Nestes cenários, os algoritmos de aprendizagem devem atender a severas restrições de tempo e processamento (BIFET, 2009). Por exemplo, um classificador deve fornecer um rótulo para um evento antes que o próximo ocorra.

Outra dificuldade encontrada nesses ambientes é a mudança na distribuição dos dados. Isto é, o contexto do processo gerador sofre alterações que impactam no fluxo produzido e, por conseguinte, as previsões esperadas. Este problema é conhecido como **mudança de conceito** (GAMA, 2010) e sua ocorrência impacta a acurácia do modelo criado. Podendo, inclusive, torná-lo obsoleto. Estas mudanças são comumente classificadas conforme a velocidade com que ocorrem. Mudanças de conceito **abruptas** identificam transições rápidas entre conceitos. Transições mais lentas, são ditas **graduais** (GAMA et al., 2014).

Como exemplificação, suponhamos que o histórico de transações via cartão de crédito de determinado cliente seja armazenado. Este cliente, ao longo dos anos, tem utilizado

o cartão apenas para comprar alimentos, sempre em uma mesma região da cidade. A partir desse conjunto de dados, um modelo de decisão é criado. Contudo, não é coerente considerar que o comportamento do cliente permanecerá inalterado.

Diante desse contexto, devemos considerar as seguintes hipóteses: 1) Abruptamente, esse cliente compra vários eletrônicos em outro país. Neste caso, compete aos métodos de detecção identificar se houve fraude ou se o cliente está apenas viajando e aproveitando ofertas. 2) Gradualmente, o cliente passa a utilizar o cartão para compras de passagens aéreas e diminui paulatinamente a utilização para compra de alimentos. Após determinado período, o perfil de compra estará completamente renovado. Assim, cabe novamente aos métodos de detecção identificar a mudança de comportamento e emitir um alerta, para que o modelo construído seja atualizado.

Diversos algoritmos para detecção de mudanças de conceito foram propostos na literatura. Cada uma dessas técnicas possui características e parâmetros diferentes que visam aumentar sua eficiência, conforme a natureza dos dados e do tipo de mudança que se deseja otimizar.

Parte dos algoritmos detecta a mudança de conceito através do monitoramento da taxa de erro do modelo em relação a uma determinada métrica. Alguns algoritmos que adotam essa abordagem são: DDM (GAMA et al., 2004), EDDM (BAENA-GARCÍA et al., 2006), ADWIN (BIFET; GAVALDÀ, 2007), ECDD (ROSS et al., 2012), PL (Bach; Maloof, 2008), FCWM (SEBASTIÃO et al., 2010), STEP (NISHIDA; YAMAUCHI, 2007), DOF (SOBHANI; BEIGY, 2011) e SCCDD/CRCDD (COSTA; RIOS; MELLO, 2016).

Outra metodologia bastante comum para lidar com mudanças de conceito é a aplicação de comitês de classificadores (*Ensemble Classifiers*). Esta técnica consiste na aplicação simultânea de múltiplos classificadores. A combinação das predições individuais é utilizada para compor uma predição global (GAMA et al., 2014). Os métodos para atualização do arranjo (criação e exclusão de classificadores) e a forma de integração das predições individuais variam para cada algoritmo.

Exemplos de comitês de classificadores são DWM (KOLTER; MALOOF, 2007), AUE (BRZEZIŃSKI; STEFANOWSKI, 2011), WMA (BLUM, 1997), DDD (MINKU; YAO, 2012), ADOB (SANTOS et al., 2014), dentre outros.

As abordagens mencionadas dependem da disponibilidade do rótulo correto para novos eventos após determinado período de tempo. Contudo, na maioria das aplicações reais, isto não é viável. Assim, foram desenvolvidos algoritmos para detecção de mudanças de conceito que independem da correta rotulação de novos eventos por especialistas.

Os métodos independentes de rótulos se baseiam na identificação de eventos que não se enquadram na atual estrutura dos dados (SPINOSA; CARVALHO; GAMA, 2007). Técnicas de agrupamento e detecção de *outliers* são comumente utilizadas nas implementações. Além destas abordagens, estratégias de sumarização dos dados e aplicação de medidas de dissimilaridade (RYU et al., 2012) também são utilizadas para identificar mudanças.

Entretanto, as técnicas propostas na literatura apresentam limitações. Algoritmos que dependem da correta rotulação são de aplicação limitada e apresentam dificuldade para lidar com mudanças abruptas. Metodologias inspiradas em algoritmos não super-



visionados envolvem maior custo computacional e tempo de resposta. Visando resolver essas limitações, este projeto de mestrado discute um método para detecção de mudanças de conceito baseado em Redes de Função de Base Radial.

## 1.2 HIPÓTESE E OBJETIVO

Com base nas observações citadas anteriormente, a seguinte hipótese foi formulada:

*“A análise de Fluxos Contínuos de Dados através de Redes de Função de Base Radial permite a detecção de mudanças de conceito, em tempo de execução, sem requerer a manutenção de estados prévios, de forma ágil e com precisão satisfatória em relação ao estado da arte.”*

O objetivo deste trabalho será o desenvolvimento e validação desta hipótese. Para atingir este objetivo, será desenvolvido um algoritmo para detecção de mudanças de conceito baseado em Redes de Função de Base Radial. Este algoritmo diferencia-se por realizar a escolha dos centros de forma *online*, conforme novos eventos são recepcionados, e por apresentar um raio dinâmico. A ativação de novos centros é usada como indicador para possíveis mudanças de conceito.

O algoritmo implementado será comparado com o estado da arte. Os fluxos utilizados nos experimentos serão divididos em dois conjuntos. Um conjunto formado por fluxos sintéticos, que permitirão uma análise detalhada da abordagem, uma vez que as características e os comportamentos são conhecidos. O outro conjunto será composto por *datasets* obtidos a partir de sistemas computacionais utilizados na indústria, visando apresentar uma aplicação prática para a solução proposta neste trabalho.

Este trabalho está organizado conforme a seguinte estrutura: O **Capítulo 2** possui uma revisão bibliográfica dos principais conceitos utilizados neste trabalho como, por exemplo, fluxos contínuos de dados, mudança de conceito e redes de função de base radial; No **Capítulo 3** o plano de pesquisa definido é detalhado, identificando a metodologia que será aplicada e o cronograma de atividades. Por fim, o **Capítulo 4** apresenta um conjunto de experimentos preliminares e a análise dos resultados obtidos em relação ao estado da arte.



## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo discute conceitos importantes dentro do contexto deste trabalho de pesquisa. Em primeiro momento, Fluxos Contínuos de Dados serão descritos. Em seguida, será abordada a ideia de Mudança de Conceito, seus tipos e características, principais algoritmos de detecção e ferramentas. Posteriormente, serão detalhadas as Redes de Função de Base Radial. Ao fim do capítulo, elencamos os trabalhos relacionados encontrados na literatura.

### 2.2 FLUXOS CONTÍNUOS DE DADOS

Os avanços em hardware e software dos últimos anos possibilitaram a aquisição de dados em larga escala (AGGARWAL et al., 2003). Muitos desses dados são adquiridos através de sequências contínuas, potencialmente infinitas e de alta frequência, denominadas **Fluxos Contínuos de Dados** (FCDs) (AGGARWAL et al., 2003; GAMA, 2010; GAMA et al., 2004). Consequentemente, o interesse de pesquisa nesta área tem crescido bastante. Entretanto, lidar com sequências dessa natureza impõe desafios aos pesquisadores, sobretudo limitações de tempo de execução e recursos computacionais.

Conforme (BABCOCK et al., 2002) as principais diferenças de FCDs para os dados convencionais são:

- Possuem tamanho ilimitado;
- Os dados são produzidos de forma contínua e em alta frequência;
- Não há controle sobre a ordem de chegada dos eventos;
- Os eventos processados devem ser descartados.

Diversas aplicações da indústria e academia lidam com dados em fluxos contínuos, por exemplo:

**Finanças** detecção de fraudes em transações, acompanhamento da bolsa de valores;

**Energia** monitoramento, predição e planejamento do consumo;

**Redes e telecomunicações** monitoramento de rede, detecção de intrusos.

A área de Aprendizado de Máquina (AM) tem como objetivo estudar algoritmos que melhoram o seu desempenho na realização de determinada tarefa conforme ganham experiência (MITCHELL, 1997). Atualmente, diversas técnicas de AM estão disponíveis, sendo aplicadas a um amplo conjunto de problemas.

Segundo (GAMA, 2010), a área de AM dedicou-se durante muitos anos em resolver problemas de aprendizado não-incrementais (*batch*). Nestes cenários a distribuição dos dados é estacionária, ou seja, o conjunto de classes ou grupos possíveis não sofre modificações. Esta estabilidade, permite a criação de modelos de decisão e grupamentos que se mantêm ao longo do tempo.

Contudo, os principais cenários da indústria e pesquisa que envolvem FCDs são dinâmicos. Nestes cenários, os dados fluem de forma contínua, mas o contexto do processo que os produz pode sofrer alterações com o passar do tempo. Isto é, são fluxos cuja distribuição dos dados não é estacionária. Conforme (GAMA; RODRIGUES, 2009), o principal problema no aprendizado a partir de FCDs é a manutenção de uma boa acurácia (classificadores) e a obtenção de grupos bem formados (*clustering*). Para que esta continuidade seja possível, o algoritmo de aprendizado deve ser atualizado conforme novos dados são analisados. Esta metodologia é denominada Aprendizado Incremental (GAMA et al., 2014).

Conforme (FISHER, 1987), a ideia de aprendizado incremental tem origem na própria observação do mundo real, no qual o conhecimento sofre atualizações constantemente e uma base contínua é mantida para lidar com novos estímulos. O paradigma incremental acredita que o contexto do processo pode mudar ao longo do tempo e, portanto, o conhecimento adquirido deve ser constantemente atualizado.

Segundo (REIMANN; SPADA, 1995), um algoritmo *A* pode ser dito incremental se *A* recebe um evento de treinamento por vez, não reprocessa dados do passado e mantém somente uma estrutura de conhecimento em memória. Além destas, o trabalho também elenca as seguintes características desejáveis para os algoritmos incrementais:

- Tempo de processamento constante;
- Dados analisados não são mantidos em memória;
- Possibilidade de suspender o treinamento para realizar predições.

Os algoritmos incrementais apresentam as seguintes vantagens (PINTO; GAMA; PORTO, 2005):

- Otimização do tempo de processamento;
- Menor utilização de memória;

- Aproximam-se da forma de aprendizado dos humanos.

Por suas características, algoritmos incrementais mostram-se bastante interessantes para aplicação em cenários com FCDs. Contudo, (GAMA et al., 2004) ressalta que o aprendizado a partir de FCDs exige que os algoritmos além de incrementais, também tratem mudanças de conceito envolvidas no processo. Nesses casos, é preciso descartar exemplos antigos, que não mais condizem com o cenário atual e adaptar o modelo de decisão aos novos dados.

Algoritmos de aprendizado de máquina clássicos utilizam técnicas como agrupamento (*clustering*) e classificação. A partir destas metodologias, novos algoritmos foram desenvolvidos para trabalhar com FCDs.

A organização de dados em grupos é uma das formas mais fundamentais de compreensão e aprendizagem (JAIN; DUBES, 1988). Agrupamento é a tarefa de associar objetos conforme suas similaridades. E tem como objetivo formar grupos com alta similaridade entre seus objetos e baixa similaridade com objetos de outros grupos. Técnicas de agrupamento permitem explorar a estrutura dos dados e não exigem os pressupostos comuns à maioria dos métodos estatísticos. A representação criada permite verificar se os grupos estão de acordo com determinados parâmetros ou ainda sugerir novos experimentos (JAIN; DUBES, 1988).

Os métodos de agrupamento têm sido utilizados em diversas áreas do conhecimento, o que ensejou o desenvolvimento de uma grande variedade de algoritmos. Dentre os principais algoritmos para cenários *batch*, destacam-se: K-Means (LLOYD, 2006), DBSCAN (ESTER et al., 1996), PAM (KAUFMAN; ROUSSEEUW, 1990) e OPTICS (ANKERST et al., 1999).

Segundo (GAMA, 2010), a principal dificuldade na aplicação de técnicas de agrupamentos em FCDs é a manutenção da qualidade e consistência do agrupamento em relação à sequência de dados observados, utilizando pouca memória e tempo de processamento. Estes desafios surgem, pois os dados são recebidos de forma contínua e as respostas precisam ser obtidas em tempo hábil.

Essas características fazem com que os algoritmos de agrupamentos aplicados em FCDs precisem ser incrementais, mantendo estruturas de grupos que evoluam ao longo do tempo. Segundo (BARBARÁ, 2002), as características dos fluxos contínuos implicam três novos requisitos aos algoritmos de agrupamento:

- Produzir representações compactas;
- Processamento rápido e incremental de novos dados;
- Identificação precisa e rápida de *outliers*.

Conforme (AGGARWAL et al., 2003), o problema de agrupamentos de dados em cenários com FCD é de difícil resolução, pois a natureza contínua e de alta frequência dos dados tornam os algoritmos tradicionais ineficientes. Assim, foram desenvolvidos algoritmos de agrupamento que realizam uma varredura única nos dados. Todavia, segundo (AGGARWAL et al., 2003), estes algoritmos apesar de apresentarem escalabilidade, não

consideram a evolução dos dados. Esta característica faz com que a qualidade dos grupos obtidos diminua ao longo do tempo. Além disso, por varrerem os dados de forma única, não é possível formar agrupamentos sobre diferentes partes do fluxo. Outros problemas para realização de agrupamentos em FCDs são a influência de ruídos e o fato das mudanças de conceito poderem ser abruptas ou graduais (KHALILIAN; MUSTAPHA, 2010).

De acordo com (LING; LING-JUN; LI, 2009), parte dos algoritmos de *clustering* em FCD atuam sobre uma projeção contínua do agrupamento de dados, por exemplo (GUHA et al., 2003). Esses algoritmos utilizam a estratégia de divisão e conquista, particionando a FCD em segmentos e formando grupos através da aplicação de algoritmos baseados no K-Means em um espaço delimitado (GUHA et al., 2000). Esta técnica apresenta como limitação não conseguir capturar características que evoluem ao longo do fluxo, pois dão o mesmo peso para dados antigos e recentes.

Diversos algoritmos foram propostos para agrupamento em FCD. Destacam-se: CluStream (AGGARWAL et al., 2003), StreamKM++ (ACKERMANN et al., 2012), DenStream (CAO et al., 2006), D-Stream (LING; LING-JUN; LI, 2009) e ClusTree (KRANEN et al., 2011).

De forma similar, os problemas de classificação continuam sendo ativamente estudados. Técnicas de classificação fazem parte do conjunto de algoritmos supervisionados. Estes algoritmos realizam a predição de uma variável utilizando um modelo de decisão criado a partir de uma base de treinamento. Se a variável a ser predita é categórica, entende-se como um problema de classificação. Se a predição resulta em um valor numérico, trata-se de um problema de regressão. No processo de classificação, o primeiro passo é a construção de um modelo de decisão, baseado no conjunto de treinamento. Este modelo é avaliado utilizando uma base de testes e, se adequado, então aplicado na predição de novos exemplos.

Muitos métodos foram propostos para a tarefa de classificação em cenários *batch*: árvores de decisão (BREIMAN et al., 1984), métodos baseados em regras, redes neurais e máquinas de vetores suporte (SVM) (VAPNIK, 1998), dentre outros. Contudo, a maioria dos trabalhos propostos pressupõe ambientes estáticos, onde os modelos de decisão criados não sofrem alterações (AGGARWAL, 2006). Além disso, também assumem que todos os dados estão disponíveis em memória e que é possível realizar múltiplas varreduras sobre eles. Assim, essas técnicas precisam ser repensadas para atenderem as características dos FCDs.

Conforme (LING; LING-JUN; LI, 2009), o problema de classificação em FCD considera que o FCD é uma sequência de exemplos e que cada exemplo está associado a um rótulo de valor discreto. Este rótulo indica a classe a qual o exemplo pertence. O objetivo, portanto, da classificação em FCD é prever com acurácia a classe dos exemplos desconhecidos, que chegam de forma contínua através da FCD.

Nos últimos anos, muitos algoritmos de classificação para FCDs foram propostos (DOMINGOS; HULTEN, 2000; BIFET et al., 2013; WANG et al., 2003; AGGARWAL et al., 2004; GAMA; ROCHA; MEDAS, 2003). Estes trabalhos aplicam técnicas incrementais e adotam medidas para atualização do modelo de decisão. No entanto, a maior parte dos algoritmos propostos requer que o rótulo correto para os exemplos esteja disponível após

determinado período de tempo. Este rótulo é utilizado na execução de novos ciclos de aprendizado, que permitem a atualização do modelo de decisão. Estes trabalhos também consideram que todas classes possíveis do problema já são conhecidas.

Segundo (AGGARWAL, 2006), o principal desafio da classificação em FCD é a mudança de conceito, ou seja, a evolução dos dados ao longo do tempo. A Detecção de Novidade (DN), ou Detecção de Mudança de Conceito, é uma tarefa de classificação aplicável a diferentes problemas práticos que envolvem FCDs. A técnica consiste em identificar exemplos (ou grupos de exemplos) que não são coerentes com o modelo de decisão vigente. O algoritmo de detecção pode indicar se o conceito alvo aprendido sofreu modificações ou se novos conceitos surgiram. Na próxima seção, a ideia de mudança de conceito será aprofundada.

## 2.3 MUDANÇA DE CONCEITO

Em ambientes não estacionários, a distribuição subjacente dos dados pode mudar ao longo do tempo, levando ao fenômeno de mudança de conceito (SCHLIMMER; GRANGER, 1986). Por exemplo, podemos considerar como mudança de conceito quando uma pessoa passa a preferir um novo gênero cinematográfico. Como consequência desta mudança, modelos de decisão relacionados podem ter sua acurácia reduzida, podendo, inclusive, tornarem-se obsoletos.

A Teoria Bayesiana de Decisão (DUDA; HART; STORK, 2000) é comumente aplicada para descrever o problema de classificação baseado nas probabilidades a priori das classes,  $p(y)$ , e na função de densidade de probabilidade condicionada às classes,  $p(X|y)$ , para todo  $y \in c_1, \dots, c_k$ , onde  $c_1, \dots, c_k$  é o conjunto de classes (ZLIOBAITE, 2010; GAMA et al., 2014). Conforme a teoria bayesiana, a classificação de uma instância  $X$  é definida com base na máxima probabilidade a posteriori. A máxima probabilidade a posteriori para uma instância  $X$  em relação a uma classe  $c_i$  pode ser calculada através da fórmula 2.1:

$$p(c_i|X) = \frac{p(c_i) * p(X|c_i)}{p(X)} \quad (2.1)$$

Sendo assim, um **conceito** pode ser definido como um conjunto de probabilidades a priori e condicionais das classes, como mostra a equação 2.2:

$$S = \{(P(c_1), P(X|c_1)), (P(c_2), P(X|c_2)), \dots, (P(c_k), P(X|c_k))\} \quad (2.2)$$

Formalmente, pode-se afirmar que houve mudança de conceito entre os instantes  $t_0$  e  $t_1$  se:

$$\exists X : p_{t_0}(X, y) \neq p_{t_1}(X, y) \quad (2.3)$$

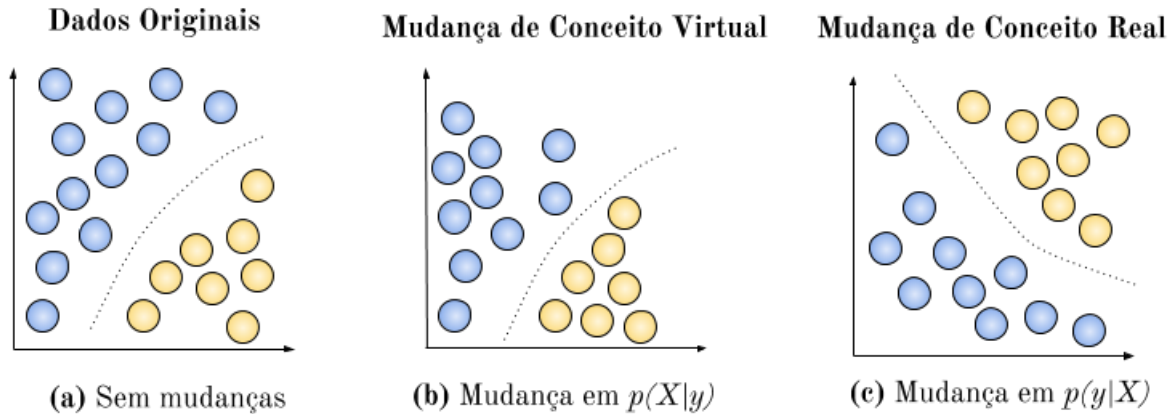
onde,  $p_{t_0}$  e  $p_{t_1}$  denotam as distribuições de probabilidades conjuntas nos instantes  $t_0$  e  $t_1$ , respectivamente, para  $X$  e  $y$  (GAMA et al., 2014).

A equação 2.2 pode ser utilizada para caracterizar as mudanças na distribuição dos dados (GAO et al., 2007; GAMA et al., 2014), do seguinte modo:

- Mudanças podem ocorrer na probabilidade a priori  $p(y)$ ,
- Mudanças podem ocorrer na função de densidade de probabilidade condicionada às classes  $p(X|y)$ ,
- Mudanças podem ocorrer na probabilidade a posteriori  $p(y|X)$ , afetando os limites de classificação.

Segundo (WIDMER; KUBAT, 1996), alterações na distribuição dos dados podem ser categorizadas em dois grupos: mudanças de conceito reais e mudanças de conceito virtuais. Estes tipos de mudança foram formalizados por (ZLIOBAITE, 2010; GAMA et al., 2014):

1. Mudanças de conceito virtuais tratam de mudanças em  $p(X)$  e, conseqüentemente, em  $p(X|y)$ , contudo, estas mudanças não têm impacto no conceito alvo (representado na Figura 2.1 (b)).
2. Mudanças de conceito reais referem-se a mudanças na relação  $p(y|X)$  e afetam o conceito alvo (representado na Figura 2.1 (c)).



**Figura 2.1** Mudança de Conceito Virtual vs. Mudança de Conceito Real

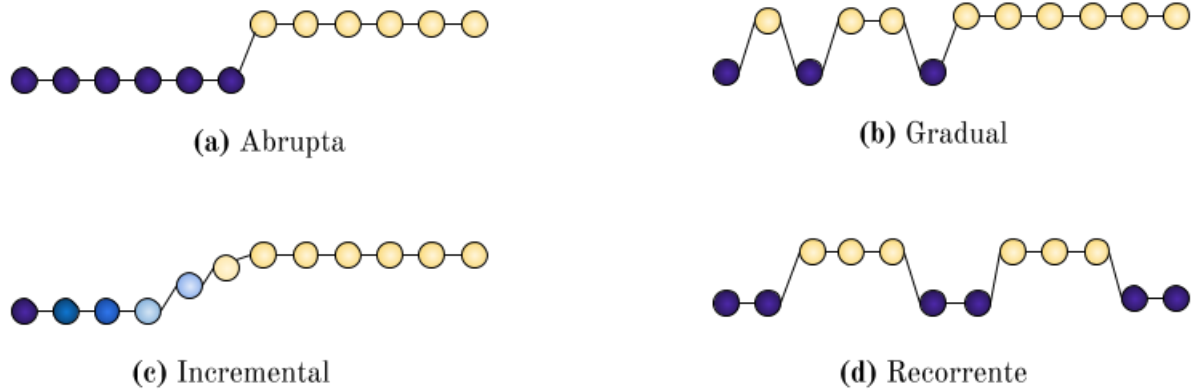
Em (GAMA et al., 2014), o seguinte cenário é utilizado para explicar a diferença entre uma mudança de conceito real e uma virtual. Considere um fluxo *online* de anúncios do setor imobiliário. Um usuário deseja classificar estes anúncios em relevantes e não relevantes. Suponha, que à época, o usuário está buscando um novo apartamento. Isto torna anúncios de apartamentos residenciais relevantes, e anúncios de casa de férias irrelevantes. Se o autor dos anúncios é alterado, o estilo de escrita sofre mudanças, mas os apartamentos permanecem relevantes para o usuário. Este cenário corresponde a uma mudança de conceito virtual. Considere que devido a uma crise, mais anúncios de apartamentos e menos de casas de férias aparecem, mas o editor dos anúncios permanece o



mesmo. Esta situação corresponde a uma mudança na probabilidade das classes. Em outro cenário, assumo que o usuário acabou de comprar um apartamento e está em busca de um local para passar as férias. Neste contexto, apartamentos tornaram-se irrelevantes e casas de férias, relevantes. Apesar do editor dos anúncios e das probabilidades anteriores das classes permanecerem as mesmas, este cenário corresponde a uma mudança de conceito real.

Considerando apenas a perspectiva de predição, adaptações no modelo são necessárias apenas quando mudanças de conceito reais ocorrem, pois os limites de decisão do modelo corrente estão obsoletos em relação aos novos exemplos (GAMA et al., 2014). Adaptação, neste contexto, significa atualizar o modelo de decisão perante a nova distribuição dos dados a fim de manter uma alta acurácia.

Mudanças de conceito podem se apresentar sob diferentes padrões. Conforme ilustrado em 2.2, mudanças de conceito podem ocorrer de forma abrupta, gradual, incremental ou recorrente.



**Figura 2.2** Padrões de ocorrência de Mudanças de Conceito

Mudanças de conceito abruptas são alterações súbitas entre conceitos, como descrito na Figura 2.2 (a). Por exemplo, o gênero literário de João pode subitamente mudar de ficção científica para auto-ajuda. Outro exemplo, é a troca de um sensor por outro com diferente calibração, em uma planta industrial química (GAMA et al., 2014).

Em contraste com a mudança de conceito abrupta, a mudança de conceito gradual significa uma transição mais lenta de um conceito para outro. Isto é, durante a transição, são percebidos exemplos de ambos os conceitos. Por exemplo, João, ao invés de subitamente passar a preferir livros de auto-ajuda, adquire interesse nestes ao longo do tempo. Isto significa que João ainda tem interesse em livros de ficção científica, mas desenvolve, em paralelo, um crescente interesse por livros de auto-ajuda, que se tornará predominante. A mudança de conceito gradual está representada na Figura 2.2 (b).

Mudanças de conceito incrementais apresentam diversos conceitos intermediários durante a transição de um conceito para outro. No exemplo de João, é como se o seu interesse literário variasse de ficção científica para ficção científica e aventura, de ficção

científica e aventura para aventura e suspense, de aventura e suspense para suspense a auto-ajuda, e finalmente de suspense e auto-ajuda para apenas auto-ajuda. Considerando a planta industrial química e os sensores, seria como se um sensor perdesse precisão ao longo do tempo. A Figura 2.2 (c) demonstra a mudança de conceito incremental.

Existe ainda outro padrão, denominado mudança de conceito recorrente (ZLIOBAITE, 2010). Conforme apresentado na Figura 2.2 (d), a mudança de conceito recorrente existe quando um conceito previamente ativo, reaparece após determinado período de tempo. De volta a nosso exemplo, João está atualmente interessado em livros de ficção científica. Contudo, ele é presenteado com uma série de livros de auto-ajuda de um renomado autor brasileiro. Após ler toda a série, João é premiado com descontos para livros de ficção científica. Ele, volta, então, a ler livros de ficção científica comprados com os descontos recebidos.

Um dos principais desafios para as técnicas de detecção de mudança de conceito é conseguir diferenciar mudanças de conceito reais de *outliers* ou ruídos. Esta diferenciação é relevante, pois nenhuma adaptação do modelo é necessária quando um *outlier* ou ruído é detectado em um fluxo de dados (GAMA et al., 2014). Para evitar alarmes falsos, métodos para detecção de *outliers* e ruídos podem ser utilizados em conjunto com os métodos de detecção de mudança de conceito.

### 2.3.1 Algoritmos para Detecção de Mudança de Conceito

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

### 2.3.2 Ferramentas

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

## 2.4 REDES DE FUNÇÃO DE BASE RADIAL

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

## 2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

## 2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.



## **PLANO DE PESQUISA**

### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

### **3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

#### **3.2.1 Atividades de Pesquisa**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut

porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

### **3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

## **EXPERIMENTOS INICIAIS**

### **4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

### **4.2 CONFIGURAÇÃO DOS EXPERIMENTOS**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

### **4.3 MÉTODO DE PETTITT**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut

porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

#### **4.4 REDES DE FUNÇÃO DE BASE RADIAL**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.

#### **4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Etiam lobortis facilisis sem. Nullam nec mi et neque pharetra sollicitudin. Praesent imperdiet mi nec ante. Donec ullamcorper, felis non sodales commodo, lectus velit ultrices augue, a dignissim nibh lectus placerat pede. Vivamus nunc nunc, molestie ut, ultricies vel, semper in, velit. Ut porttitor. Praesent in sapien. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Duis fringilla tristique neque. Sed interdum libero ut metus. Pellentesque placerat. Nam rutrum augue a leo. Morbi sed elit sit amet ante lobortis sollicitudin. Praesent blandit blandit mauris. Praesent lectus tellus, aliquet aliquam, luctus a, egestas a, turpis. Mauris lacinia lorem sit amet ipsum. Nunc quis urna dictum turpis accumsan semper.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMANN, M. R. et al. Streamkm++: A clustering algorithm for data streams. *J. Exp. Algorithmics*, ACM, New York, NY, USA, v. 17, p. 2.4:2.1–2.4:2.30, maio 2012. ISSN 1084-6654. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2133803.2184450>.
- AGGARWAL, C. C. *Data Streams: Models and Algorithms (Advances in Database Systems)*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. ISBN 0387287590.
- AGGARWAL, C. C. et al. A framework for clustering evolving data streams. In: *Proceedings of the 29th International Conference on Very Large Data Bases - Volume 29*. VLDB Endowment, 2003. (VLDB '03), p. 81–92. ISBN 0-12-722442-4. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1315451.1315460>.
- AGGARWAL, C. C. et al. On demand classification of data streams. In: *Proceedings of the Tenth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, NY, USA: ACM, 2004. (KDD '04), p. 503–508. ISBN 1-58113-888-1. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1014052.1014110>.
- ANKERST, M. et al. Optics: Ordering points to identify the clustering structure. *SIGMOD Rec.*, ACM, New York, NY, USA, v. 28, n. 2, p. 49–60, jun. 1999. ISSN 0163-5808. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/304181.304187>.
- BABCOCK, B. et al. Models and issues in data stream systems. In: *Proceedings of the Twenty-first ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2002. (PODS '02), p. 1–16. ISBN 1-58113-507-6. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/543613.543615>.
- Bach, S. H.; Maloof, M. A. Paired learners for concept drift. In: *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 23–32. ISSN 1550-4786.
- BAENA-GARCÍA, M. et al. Early drift detection method. In: *In Fourth International Workshop on Knowledge Discovery from Data Streams*. [S.l.: s.n.], 2006.
- BARBARÁ, D. Requirements for clustering data streams. *SIGKDD Explor. Newsl.*, ACM, New York, NY, USA, v. 3, n. 2, p. 23–27, jan. 2002. ISSN 1931-0145. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/507515.507519>.
- BIFET, A. Adaptive learning and mining for data streams and frequent patterns. *SIGKDD Explor. Newsl.*, ACM, New York, NY, USA, v. 11, n. 1, p. 55–56, nov. 2009. ISSN 1931-0145. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1656274.1656287>.

BIFET, A.; GAVALDÀ, R. Learning from time-changing data with adaptive windowing. In: *SDM*. SIAM, 2007. p. 443–448. ISBN 978-1-61197-277-1. Disponível em: <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/sdm/sdm2007.html\#BifetG07>.

BIFET, A. et al. Efficient data stream classification via probabilistic adaptive windows. In: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing*. New York, NY, USA: ACM, 2013. (SAC '13), p. 801–806. ISBN 978-1-4503-1656-9. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2480362.2480516>.

BLUM, A. Empirical support for winnow and weighted-majority algorithms: Results on a calendar scheduling domain. *Machine Learning*, v. 26, n. 1, p. 5–23, Jan 1997. ISSN 1573-0565. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1007335615132>.

BREIMAN, L. et al. *Classification and Regression Trees*. Monterey, CA: Wadsworth and Brooks, 1984.

BRZEZIŃSKI, D.; STEFANOWSKI, J. Accuracy updated ensemble for data streams with concept drift. In: CORCHADO, E.; KURZYŃSKI, M.; WOŹNIAK, M. (Ed.). *Hybrid Artificial Intelligent Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 155–163. ISBN 978-3-642-21222-2.

CAO, F. et al. Density-based clustering over an evolving data stream with noise. In: GHOSH, J. et al. (Ed.). *SDM*. SIAM, 2006. p. 328–339. ISBN 978-1-61197-276-4. Disponível em: <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/sdm/sdm2006.html\#CaoEQZ06>.

COSTA, F. da; RIOS, R.; MELLO, R. de. Using dynamical systems tools to detect concept drift in data streams. *Expert Syst. Appl.*, Pergamon Press, Inc., Tarrytown, NY, USA, v. 60, n. C, p. 39–50, out. 2016. ISSN 0957-4174. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.04.026>.

DOMINGOS, P.; HULTEN, G. Mining high-speed data streams. In: *Proceedings of the Sixth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, NY, USA: ACM, 2000. (KDD '00), p. 71–80. ISBN 1-58113-233-6. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/347090.347107>.

DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. *Pattern Classification (2Nd Edition)*. New York, NY, USA: Wiley-Interscience, 2000. ISBN 0471056693.

ESTER, M. et al. A density-based algorithm for discovering clusters a density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. In: *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. AAAI Press, 1996. (KDD'96), p. 226–231. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3001460.3001507>.

FEIGENBAUM, J. et al. An approximate l1-difference algorithm for massive data streams. *SIAM J. Comput.*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, v. 32, n. 1, p. 131–151, jan. 2003. ISSN 0097-5397. Disponível em: <https://doi.org/10.1137/S0097539799361701>.

FISHER, D. H. Knowledge acquisition via incremental conceptual clustering. *Mach. Learn.*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, v. 2, n. 2, p. 139–172, set. 1987. ISSN 0885-6125. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1022852608280>.

GAMA, J. *Knowledge Discovery from Data Streams*. 1st. ed. [S.l.]: Chapman & Hall/CRC, 2010. ISBN 1439826110, 9781439826119.

GAMA, J. et al. Learning with drift detection. In: BAZZAN, A. L. C.; LABIDI, S. (Ed.). *SBIA*. Springer, 2004. (Lecture Notes in Computer Science, v. 3171), p. 286–295. ISBN 3-540-23237-0. Disponível em: <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/sbia/sbia2004.html/#GamaMCR04>.

GAMA, J.; RODRIGUES, P. An overview on mining data streams. In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2009. v. 206, p. 29–45.

GAMA, J. a.; ROCHA, R.; MEDAS, P. Accurate decision trees for mining high-speed data streams. In: *Proceedings of the Ninth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, NY, USA: ACM, 2003. (KDD '03), p. 523–528. ISBN 1-58113-737-0. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/956750.956813>.

GAMA, J. a. et al. A survey on concept drift adaptation. *ACM Comput. Surv.*, ACM, New York, NY, USA, v. 46, n. 4, p. 44:1–44:37, mar. 2014. ISSN 0360-0300. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/2523813>.

GAO, J. et al. A general framework for mining concept-drifting data streams with skewed distributions. In: *SDM*. [S.l.]: SIAM, 2007. p. 3–14.

GUHA, S. et al. Clustering data streams: Theory and practice. *IEEE Trans. on Knowl. and Data Eng.*, IEEE Educational Activities Department, Piscataway, NJ, USA, v. 15, n. 3, p. 515–528, mar. 2003. ISSN 1041-4347. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TKDE.2003.1198387>.

GUHA, S. et al. Clustering data streams. In: *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2000. (FOCS '00), p. 359–. ISBN 0-7695-0850-2. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=795666.796588>.

JAIN, A. K.; DUBES, R. C. *Algorithms for Clustering Data*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1988. ISBN 0-13-022278-X.

KATAKIS, I.; TSOUMAKAS, G.; VLAHAVAS, I. Tracking recurring contexts using ensemble classifiers: An application to email filtering. *Knowl. Inf. Syst.*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, v. 22, n. 3, p. 371–391, mar. 2010. ISSN 0219-1377. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10115-009-0206-2>.

KAUFMAN, L.; ROUSSEEUW, P. *Finding Groups in Data: an introduction to cluster analysis*. [S.l.]: Wiley, 1990.

KHALILIAN, M.; MUSTAPHA, N. Data stream clustering: Challenges and issues. *CoRR*, abs/1006.5261, 2010. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1006.5261>.

KOLTER, J. Z.; MALOOF, M. A. Dynamic weighted majority: An ensemble method for drifting concepts. *J. Mach. Learn. Res.*, JMLR.org, v. 8, p. 2755–2790, dez. 2007. ISSN 1532-4435. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1314498.1390333>.

KRANEN, P. et al. The clustree: Indexing micro-clusters for anytime stream mining. *Knowl. Inf. Syst.*, Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA, v. 29, n. 2, p. 249–272, nov. 2011. ISSN 0219-1377. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10115-010-0342-8>.

LANE, T.; BRODLEY, C. E. Approaches to online learning and concept drift for user identification in computer security. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. AAAI Press, 1998. (KDD'98), p. 259–263. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3000292.3000339>.

Lee, Y. K.; Wang, L.; Ryu, K. H. A system architecture for monitoring sensor data stream. In: *7th IEEE International Conference on Computer and Information Technology (CIT 2007)*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1026–1031.

LING, C.; LING-JUN, Z.; LI, T. Stream data classification using improved fisher discriminate analysis. *Journal of Computers*, 01 2009.

LLOYD, S. Least squares quantization in pcm. *IEEE Trans. Inf. Theor.*, IEEE Press, Piscataway, NJ, USA, v. 28, n. 2, p. 129–137, set. 2006. ISSN 0018-9448. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.1982.1056489>.

MINKU, L. L.; YAO, X. Ddd: A new ensemble approach for dealing with concept drift. *IEEE Trans. on Knowl. and Data Eng.*, IEEE Educational Activities Department, Piscataway, NJ, USA, v. 24, n. 4, p. 619–633, abr. 2012. ISSN 1041-4347. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/TKDE.2011.58>.

MITCHELL, T. M. *Machine Learning*. 1. ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, Inc., 1997. ISBN 0070428077, 9780070428072.

NISHIDA, K.; YAMAUCHI, K. Detecting concept drift using statistical testing. In: COR-RUBLE, V.; TAKEDA, M.; SUZUKI, E. (Ed.). *Discovery Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 264–269. ISBN 978-3-540-75488-6.

PINTO, C. M. S.; GAMA, J.; PORTO, U. do. Algoritmos incrementais para aprendizagem bayesiana. *Faculdade de Economia da Universidade do Porto*, 2005.

REIMANN, P.; SPADA, H. *Learning in Humans and Machines: Towards an Interdisciplinary Learning Science*. Emerald Group Publishing Limited, 1995. ISBN 9780080425696. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=YkdyQgAACAAJ>.

ROSS, G. J. et al. Exponentially weighted moving average charts for detecting concept drift. *Pattern Recogn. Lett.*, Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, v. 33, n. 2, p. 191–198, jan. 2012. ISSN 0167-8655. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2011.08.019>.

RYU, J. W. et al. An efficient method of building an ensemble of classifiers in streaming data. In: SRINIVASA, S.; BHATNAGAR, V. (Ed.). *Big Data Analytics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. p. 122–133. ISBN 978-3-642-35542-4.

SANTOS, S. G. T. de C. et al. Speeding up recovery from concept drifts. In: *Proceedings of the 2014th European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases - Volume Part III*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. (ECMLPKDD'14), p. 179–194. ISBN 978-3-662-44844-1. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44845-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44845-8_12).

SCHLIMMER, J. C.; GRANGER, R. H. Incremental learning from noisy data. *Machine Learning*, v. 1, n. 3, p. 317–354, Sep 1986. ISSN 1573-0565. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00116895>.

SEBASTIÃO, R. et al. Monitoring incremental histogram distribution for change detection in data streams. In: GABER, M. M. et al. (Ed.). *Knowledge Discovery from Sensor Data*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 25–42. ISBN 978-3-642-12519-5.

SMAILOVIĆ, J. et al. Stream-based active learning for sentiment analysis in the financial domain. *Inf. Sci.*, Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, v. 285, n. C, p. 181–203, nov. 2014. ISSN 0020-0255. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.04.034>.

SOBHANI, P.; BEIGY, H. New drift detection method for data streams. In: *Proceedings of the Second International Conference on Adaptive and Intelligent Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. (ICAIS'11), p. 88–97. ISBN 978-3-642-23856-7. Disponível em: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2045295.2045309>.

SPINOSA, E. J.; CARVALHO, A. P. de Leon F. de; GAMA, J. a. Olindda: A cluster-based approach for detecting novelty and concept drift in data streams. In: *Proceedings of the 2007 ACM Symposium on Applied Computing*. New York, NY, USA: ACM, 2007. (SAC '07), p. 448–452. ISBN 1-59593-480-4. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/1244002.1244107>.

VAPNIK, V. N. *Statistical Learning Theory*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1998.

WANG, H. et al. Mining concept-drifting data streams using ensemble classifiers. In: *Proceedings of the Ninth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, NY, USA: ACM, 2003. (KDD '03), p. 226–235. ISBN 1-58113-737-0. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/956750.956778>.

WIDMER, G.; KUBAT, M. Learning in the presence of concept drift and hidden contexts. *Mach. Learn.*, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, v. 23, n. 1, p. 69–101, abr. 1996. ISSN 0885-6125. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1018046501280>.

ZLIOBAITE, I. Learning under concept drift: an overview. *CoRR*, abs/1010.4784, 2010. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1010.4784>.

ZWOLENSKI, M.; WEATHERILL, L. The digital universe rich data and the increasing value of the internet of things. *Australian Journal of Telecommunications and the Digital Economy*, v. 2, 10 2014.