



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

## Título

Felipe Claudio da Silva Santos

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica e de Computação da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Luiz Pereira Calôba

Coorientador: Natanael Nunes de Moura Junior

Rio de Janeiro

Outubro de 2008

Título

Felipe Claudio da Silva Santos

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE COMPUTAÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRÔNICO E DE COMPUTAÇÃO

Autor:

---

Felipe Claudio da Silva Santos

Orientador:

---

Prof. Luis Pereira Calôba, Dr.Ing

Co-orientador:

---

Natanael Nunes de Moura Junior, Dr.

Examinador:

---

Examinador 1

Examinador:

---

Examinador 2

Rio de Janeiro  
Outubro de 2008

## Declaração de Autoria e de Direitos

Eu, *Felipe Claudio da Silva Santos* CPF 427.279.208-30, autor da monografia *título da monografia*, subscrevo para os devidos fins, as seguintes informações:

1. O autor declara que o trabalho apresentado na disciplina de Projeto de Graduação da Escola Politécnica da UFRJ é de sua autoria, sendo original em forma e conteúdo.
2. Excetuam-se do item 1. eventuais transcrições de texto, figuras, tabelas, conceitos e idéias, que identifiquem claramente a fonte original, explicitando as autorizações obtidas dos respectivos proprietários, quando necessárias.
3. O autor permite que a UFRJ, por um prazo indeterminado, efetue em qualquer mídia de divulgação, a publicação do trabalho acadêmico em sua totalidade, ou em parte. Essa autorização não envolve ônus de qualquer natureza à UFRJ, ou aos seus representantes.
4. O autor pode, excepcionalmente, encaminhar à Comissão de Projeto de Graduação, a não divulgação do material, por um prazo máximo de 01 (um) ano, improrrogável, a contar da data de defesa, desde que o pedido seja justificado, e solicitado antecipadamente, por escrito, à Congregação da Escola Politécnica.
5. O autor declara, ainda, ter a capacidade jurídica para a prática do presente ato, assim como ter conhecimento do teor da presente Declaração, estando ciente das sanções e punições legais, no que tange a cópia parcial, ou total, de obra intelectual, o que se configura como violação do direito autoral previsto no Código Penal Brasileiro no art.184 e art.299, bem como na Lei 9.610.
6. O autor é o único responsável pelo conteúdo apresentado nos trabalhos acadêmicos publicados, não cabendo à UFRJ, aos seus representantes, ou ao(s) orientador(es), qualquer responsabilização/ indenização nesse sentido.
7. Por ser verdade, firmo a presente declaração.

---

Felipe Claudio da Silva Santos

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Escola Politécnica - Departamento de Eletrônica e de Computação

Centro de Tecnologia, bloco H, sala H-217, Cidade Universitária

Rio de Janeiro - RJ CEP 21949-900

Este exemplar é de propriedade da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es).

## DEDICATÓRIA

Opcional.

## **AGRADECIMENTO**

Sempre haverá. Se não estiver inspirado, aqui está uma sugestão: dedico este trabalho ao povo brasileiro que contribuiu de forma significativa à minha formação e estada nesta Universidade. Este projeto é uma pequena forma de retribuir o investimento e confiança em mim depositados.

## **RESUMO**

Inserir o resumo do seu trabalho aqui. O objetivo é apresentar ao pretense leitor do seu Projeto Final uma descrição genérica do seu trabalho. Você também deve tentar despertar no leitor o interesse pelo conteúdo deste documento.

Palavras-Chave: trabalho, resumo, interesse, projeto final.

## ABSTRACT

Insert your abstract here. Insert your abstract here. Insert your abstract here.  
Insert your abstract here. Insert your abstract here.

Key-words: word, word, word.



## **SIGLAS**

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

SIN - Sistema Interligado Nacional

SEB - Sistema Elétrico Brasileiro

RE-SEB - Reestruturação do Sistema Elétrico Brasileiro

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

MME - Ministério de Minas e Energias

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

EPE - Empresa de Energia Elétrica

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

MAE - Mercado Atacadista de Energia

CMSE - Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

ACR - Ambiente de Contratação Regulada

ACL - Ambiente de Contratação Livre

PLD - Preço de Liquidação das Diferenças

MCP - Mercado de Curto Prazo

CMO - Custo Marginal de Operação

CVU - Custo Variável Unitário

UTE - Usina Térmica

ENA - Energia Natural Armazenada

EAR - Energia Armazenada

CCEAR - Contrato de Comercialização de Energia ELétrica no Ambiente Regulado

PMO - Planejamento Mensal de Operação

CFURH - Compensação Financeira pelo Uso dos Recursos Hídricos

MLP - Multilayer Perceptron

FFT - Fast Fourier Transform

IIR - Infinite Impulse Response

FIR - Finite Impulse Response

# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Tema . . . . .  | 1         |
| 1.2      | Delimitação . . . . .                                     | 1         |
| 1.3      | Justificativa . . . . .                                   | 1         |
| 1.4      | Objetivos . . . . .                                       | 2         |
| 1.5      | Metodologia . . . . .                                     | 2         |
| 1.6      | Descrição . . . . .                                       | 2         |
| <b>2</b> | <b>O sistema elétrico brasileiro</b>                      | <b>3</b>  |
| 2.1      | O Cálculo do Preço da Liquidação das Diferenças . . . . . | 8         |
| 2.2      | Revisão bibliográfica . . . . .                           | 14        |
| <b>3</b> | <b>Series Temporais e Aprendizado de Máquina</b>          | <b>17</b> |
| 3.1      | Séries Temporais . . . . .                                | 17        |
| 3.1.1    | Tendência . . . . .                                       | 19        |
| 3.1.2    | Sazonalidade . . . . .                                    | 21        |
| 3.1.3    | Ciclos Senoidais . . . . .                                | 23        |
| 3.1.4    | Componente Residual . . . . .                             | 23        |
| 3.2      | Processamento de Sinais . . . . .                         | 25        |
| 3.3      | Redes Neurais Artificiais . . . . .                       | 26        |
| 3.3.1    | Backpropagation . . . . .                                 | 30        |
| 3.3.2    | Rede perceptron multicamadas - MLP . . . . .              | 31        |
| 3.3.3    | Treinamento . . . . .                                     | 32        |
| <b>4</b> | <b>Conclusões</b>   | <b>35</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Bibliografia</b>                           | <b>36</b> |
| <b>A O que é um apêndice</b>                  | <b>41</b> |
| <b>B Encadernação do Projeto de Graduação</b> | <b>42</b> |
| <b>C O que é um anexo</b>                     | <b>44</b> |

# Lista de Figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Instituições do setor elétrico brasileiro [1]. . . . .   | 5  |
| 2.2  | Mapa do Sistema Elétrico Brasileiro no horizonte de 2017 [1] . . . . .   | 6  |
| 2.3  | Mapa do Sistema Elétrico Brasileiro no horizonte de 2017 [2] . . . . .   | 8  |
| 2.4  | Comparação entre a matriz elétrica mundial e a brasileira . . . . .  | 9  |
| 2.5  | Instituições do setor elétrico brasileiro [1]. . . . .   | 10 |
| 2.6  | Previsão indireta do PLD . . . . .   | 14 |
| 2.7  | Previsão direta do PLD . . . . .   | 14 |
| 2.8  | Previsão do PLD utilizando o modelo híbrido . . . . .  | 15 |
| 2.9  | Previsão do PLD utilizando o modelo híbrido . . . . .  | 15 |
| 3.1  | Exemplo de decomposição de série temporal [3] . . . . .  | 18 |
| 3.2  | Exemplo de extração de tendência com filtro de média[4] . . . . .  | 21 |
| 3.3  | Extração de sazonalidade com periodicidade anual ( $P = 12$ ) para o dataset<br>de nascimentos em Nova York[4] . . . . .                                       | 22 |
| 3.4  | Autocorrelação para o sinal residual do dataset de nascimentos em Nova<br>York[4] . . . . .  | 23 |
| 3.5  | Resíduo sem remoção de ciclos senoidais para o dataset de nascimentos em<br>Nova York[4] . . . . .   | 24 |
| 3.6  | Resíduo com remoção de ciclos senoidais para o dataset de nascimentos em<br>Nova York. Filtro Notch com $\omega_0 = 0.135radamostra$ e $Q = 0.2$ [4] . . . . . | 24 |
| 3.7  | Sinal residual no tempo para o dataset de nascimentos em Nova York [4] . . . . .   | 25 |
| 3.8  | Filtro Notch IIR digital[5] . . . . .  | 26 |
| 3.9  | Neurônio [6] . . . . .   | 27 |
| 3.10 | Neurônio [7] . . . . .   | 27 |
| 3.11 | Função logística [8] . . . . .   | 29 |
| 3.12 | Tangente hiberbólica [9] . . . . .   | 29 |

|   |    |
|---|----|
| 3.13 ReLU [10]                              | 30 |
| 3.14 Tangente hiberbólica [10]              | 31 |
| 3.15 Rede Perceptron Multicamadas [10]      | 32 |
| 3.16 Influência da taxa de aprendizado [11] | 33 |
| 3.17 Validacao Cruzadas [12]                | 34 |
| B.1 Encadernação do projeto de graduação.   | 43 |

# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Critérios vigentes para se tornar consumidor Livre [13]. . . . . | 7  |
| 2.2 | Variáveis utilizadas no cálculo do PLD semanal [13]. . . . .     | 11 |
| 2.3 | Preço mínimo e máximo do PLD [13]. . . . .                       | 12 |
| 2.4 | Arquivos de entrada do DECOMP [13]. . . . .                      | 13 |

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Tema

Falar do que se trata o trabalho usando uma visão macroscópica (tamanho do texto: 1 ou 2 parágrafos no máximo).

Sobre que grande área de conhecimento você vai falar?

Dada esta grande área, qual é o subconjunto de conhecimento sobre o qual será o seu trabalho?

Qual o problema a ser resolvido?

### 1.2 Delimitação

Realizar uma delimitação informando de quem é a demanda, em que local, e em que momento no tempo. Eventualmente, pode ser mais fácil começar pensando por exclusão, ou seja, para quem não serve, onde não deve ser aplicado, e em seguida pegar o universo que sobra (tamanho do texto: livre).

### 1.3 Justificativa

Apresentar o porquê do tema ser interessante de ser estudado. Cuidado, não é a motivação particular. Devem ser apresentadas razões para que alguém deva se



interessar no assunto, e não quais foram suas razões particulares que motivaram você a estudá-lo (tamanho do texto: livre).

## **1.4 Objetivos**

Informar qual é o objetivo geral do trabalho, isto é, aquilo que deve ser atendido e que corresponde ao indicador inequívoco do sucesso do seu trabalho. Pode acontecer que venha a existir um conjunto de objetivos específicos, que complementam o objetivo geral (tamanho do texto: livre, mas cuidado para não fazer uma literatura romanceada, afinal esta seção trata dos objetivos).

## **1.5 Metodologia**

Como é a abordagem do assunto. Como foi feita a pesquisa, se vai houve validação, etc. Em resumo, você de explicar qual foi sua estratégia para atender ao objetivo do trabalho (tamanho do texto: livre).

## **1.6 Descrição**

No capítulo 2 será .....

O capítulo 3 apresenta ...

Os .... são apresentados no capítulo 4. Nele será explicitado ...

E assim vai até chegar na conclusão.

## Capítulo 2

# O sistema elétrico brasileiro

No começo da década de 90 a estrutura do setor elétrico brasileiro era verticalizada, composta por grandes estatais que tinham o controle sobre toda a cadeia produtiva (geração, transmissão e distribuição). Houve então uma reestruturação do setor (RE-SEB), baseado no princípio de que "a eficiência no setor elétrico será assegurada através da competição, onde possível, e da regulamentação, onde necessária" [14]. Sendo assim, o mercado foi aberto para o setor privado. O SEB foi então dividido em empresas de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia. Muitas empresas públicas foram leiloadas, dentre elas a a Light (21/05/1996) e a CERJ(20/11//1996)[15].

Assim como mencionado, um dos pilares do RE-SEB foi a regulamentação. Sendo assim, em 1996 foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, a qual tinha como função regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica segundo as diretrizes definidas pelo governo federal.

Foram aprovadas medidas que incentivavam a realização de contratos de longo prazo entre distribuidores e geradores [15]. Além disso, foi dado livre acesso aos pequenos produtores (potenciais hidráulicos menores que 1MW e usinas termoeletricas com potencial inferior a 5MW) ao sistemas de transmissão e distribuição das concessionárias e permissionárias do serviço publico. Isto facilitou o aparecimento de novas fontes de energias e novos produtores no SEB.

Em 2001 houve uma grande crise energética no país que foi fruto de um período seco. Então, mudanças estruturais foram implantadas no SEB buscando assim melhorar a gestão, evitar incidentes, garantir a qualidade e incentivar a expansão do sistema. Com isso, a organização da estrutura foi modificada, sendo que as instituições responsáveis pelo pleno funcionamento deste modelo são descritas a seguir:[13]:

- **Ministério de Minas e Energias - MME:** Responsável pela formulação e implantação de políticas relacionadas ao setor elétrico.
- **Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico - CMSE:** Acompanha e avalia a continuidade e a segurança do suprimento elétrico em todo o território nacional
- **Conselho Nacional de Política Energética - CNPE:** Formula políticas e diretrizes de energia que garantam o suprimento de energia elétrica para todo o país
- **Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL:** Regula, e fiscaliza a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica segundo as diretrizes definidas pelo governo federal.
- **Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE:** Atua desde a medição de energia gerada e efetivamente consumida até a liquidação financeira dos contratos de compra e venda no curto prazo [13]. Anteriormente se chamava Mercado Atacadista de Energia - MAE.
- **Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS:** Tem como objetivo a coordenação e controle das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Brasil, buscando garantir a todos os agentes o livre acesso à rede de transmissão, o menor custo de expansão do sistema e as melhores condições operacionais futuras [1]
- **Empresa de Pesquisa Energética - EPE:** Realiza pesquisas em áreas relacionadas com energia elétrica, petróleo, gás biocombustíveis e planejamento energético[16].

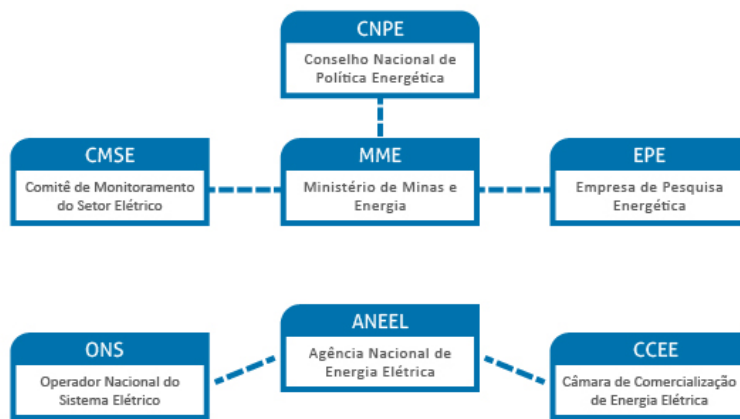


Figura 2.1: Instituições do setor elétrico brasileiro. Fonte: EPE [13].

Outra medida tomada para facilitar o gerenciamento de toda a rede de geração, transmissão, e consumo de energia elétrica foi dividir o Sistema Interligado Nacional - SIN[1] em quatro subsistemas sendo estes: Norte, Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste e Sul. Vale ressaltar que existe conexão entre as partes, de forma que um subsistema pode auxiliar o suprimento da demanda de energia de outro em períodos de seca. Participam desse sistema diversos agentes[13], sendo eles:

- **Agentes geradores:** são agentes autorizados a gerar energia elétrica para o sistema.
- **Agentes de transmissão:** são agentes que detem o meios de transmissão de energia.
- **Agentes de distribuição:** são agentes autorizados a distribuir energia contratada dos serviços de transmissão em uma área definida pela concessão
- **Consumidores livres:** são consumidores que tem a opção de escolher o distribuidor de energia, diferente do que acontece no consumo doméstico.
- **Agentes importadores:** são agentes titulares de autorização expedida pela ANEEL para exercer as atividades de importação de energia elétrica.
- **Agentes exportadores:** são agentes titulares de autorização para implantação de sistemas de transmissão associados à exportação de energia elétrica.

- **Agente comercializador da energia de Itaipu:** por ser uma usina binacional, segue tratos específicos. Atualmente a comercialização desta energia é coordenada pela Eletrobras.

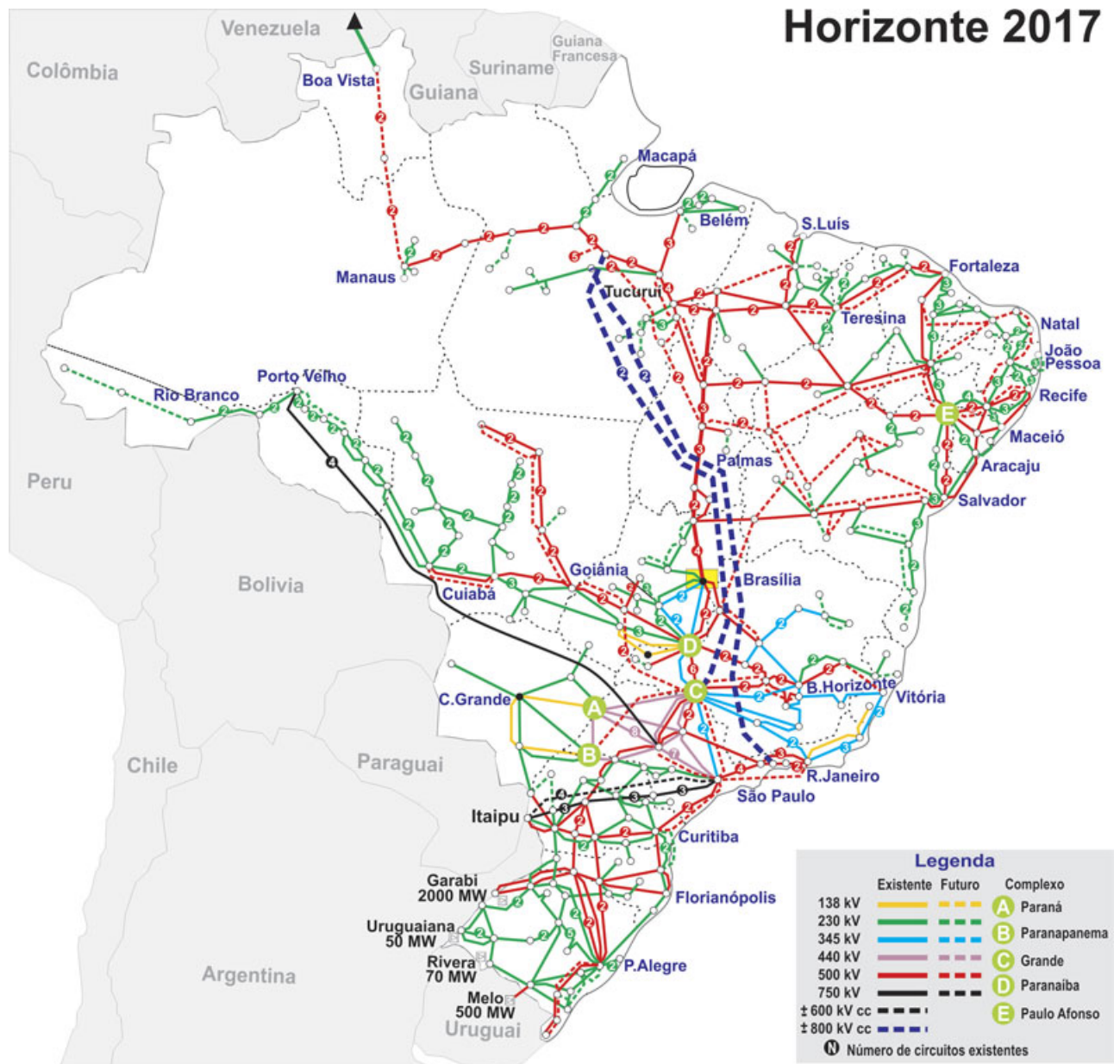


Figura 2.2: Mapa do Sistema Elétrico Brasileiro no horizonte de 2017[1]

A reestruturação também dividiu o mercado de energia elétrica brasileiro em dois ambientes de comercialização: Ambiente de Contratação Regulada - ACR e Ambiente de Contratação Livre - ACL. O primeiro ambiente é focado na contratação

de energia para consumidores residenciais e indústrias de baixo consumo em geral. As negociações são feitas através de leilões onde geralmente os contratos de fornecimento de energia tem foco no médio e longo prazo (duração maior que 5 anos). As distribuidoras são obrigadas a comprar 100% da energia utilizada através desse meio. O segundo ambiente é focado em contratações bilaterais, de forma a trazer benefícios para grande consumidores, conforme mostrado abaixo, pois podem negociar o preço da energia direto com os geradores [17]. Os agentes que podem realizar compra por esse tipo de mercado são os agentes livres, conforme mostrados na tabela a seguir:

Tabela 2.1: Critérios vigentes para se tornar consumidor Livre [13].

| <b>Demanda Mínima</b> | <b>Tensão mínima de fornecimento</b> | <b>Data da ligação do consumidor</b> |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 3MW                   | Qualquer Tensão                      | Após 07/07/1995                      |
| 3MW                   | 69KV                                 | Após 07/07/1995                      |

Dado o dinamismo do consumo, dificilmente a energia utilizada será igual a contratada. Uma das funções da CCEE é realizar medições tanto do que é produzido quanto o que é consumido. Esta instituição concentra informações sobre o montante de energia negociado em cada contrato do SEB. A diferença entre o que foi negociado e o que foi consumido é liquidado utilizando como multiplicador o Preço de Liquidação das Diferença - PLD, o qual será explicado mais a frente. O saldo dos agentes no mercado de curto prazo se dá pelas seguintes equações[17].

$$Receita_{Gerador} = (Energia_{Gerada} - Energia_{Contratada}) * PLD \quad (2.1)$$

$$Despesa_{Consumidor} = (Energia_{Consumida} - Energia_{Contratada}) * PLD \quad (2.2)$$

Esse processo de liquidação das diferenças é realizado entre as partes envolvidas na negociação. A CCEE somente realiza o cálculo de quanto cada contraparte deve pagar ou receber. A importância do PLD não se resume somente ao MCP, pois

muitos dos contratos do mercado livre são baseados nesse valor[18]. Isto permite que os agentes tomem estratégias diferentes para aumentar o lucro ou diminuir o prejuízo. Um exemplo disso seria um agente consumidor, que ao prever o aumento de preços nos próximos meses, pode buscar realizar contratos para abastecimento futuro a um preço menor do que seria pago. Outro exemplo seria um distribuidor, que ao prever um baixo PLD no MCP do mês atual, decide vender o excedente de energia contratada no mercado livre ao invés de receber o valor proporcional ao PLD.

## 2.1 O Cálculo do Preço da Liquidação das Diferenças

O grande desafio do setor é utilizar a energia de maneira eficiente, reduzindo o custo da mesma e o risco de déficit tanto no mês atual quanto nos meses seguintes. Isto demanda a criação e utilização de novas tecnologias auxiliares ao planejamento.

Conforme observado na figura abaixo, o preço depende diretamente da quantidade de água nos reservatórios e a previsão de quanto água estará armazenada nos meses futuros.

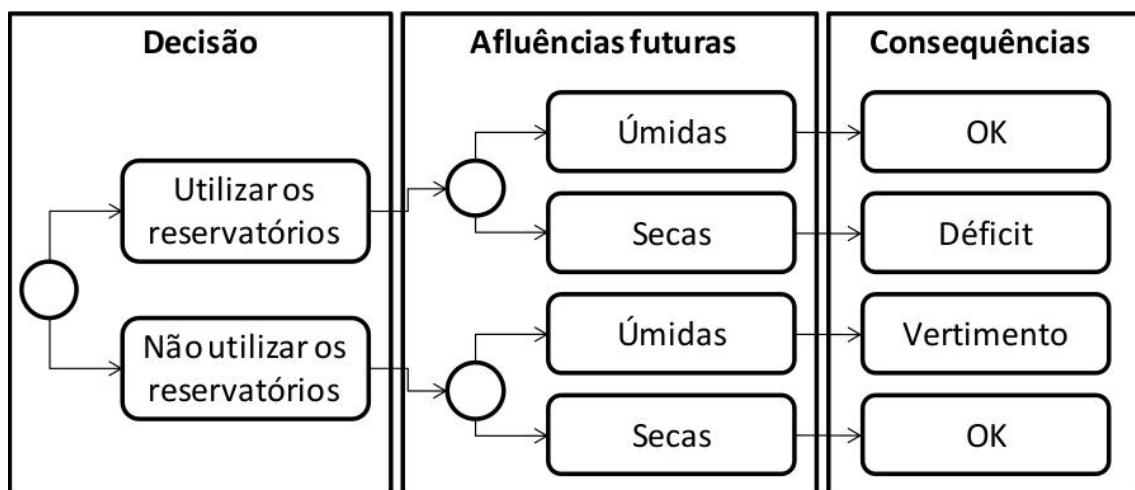


Figura 2.3: Planejamento da produção de energia do sistema hidrotérmico[2]

Sendo assim, utilizar as usinas hidrelétricas - UHEs na capacidade máxima gerará o menor custo de energia possível no mês atual, porém, se no futuro for necessário utilizar outras fontes para suprir a demanda energética, o custo pode ser muito maior do que em uma situação onde a produção energética da UHE foi distribuída durante os meses consecutivos. Por um outro lado, caso a quantidade de água armazenada em um reservatório supere o limiar máximo do mesmo, torna-se necessário liberar o excedente para o rio, situação chamada de "vertimento". Isto é indesejável, pois resulta em um desperdício de energia barata. Portanto, um planejamento equivocado pode causar altas no PLD, o que afeta diretamente os agentes que participam do mercado de energia elétrico brasileiro.

O Brasil atualmente possui uma matriz elétrica diferente do que em geral é observado no mundo. Em média 65,2% da energia utilizada no país vem de fontes hidráulicas, diferente do que ocorre em média no resto do mundo (aproximadamente 16,6%), assim como visto em[16]. Essa fonte além de ser renovável, tem impacto menor no meio ambiente e custos menores quando comparado com fontes baseadas em combustíveis fósseis. O grande ponto negativo é a característica volátil desse recurso, pois depende bastante de condições climáticas, o que dificulta o planejamento para períodos longos.

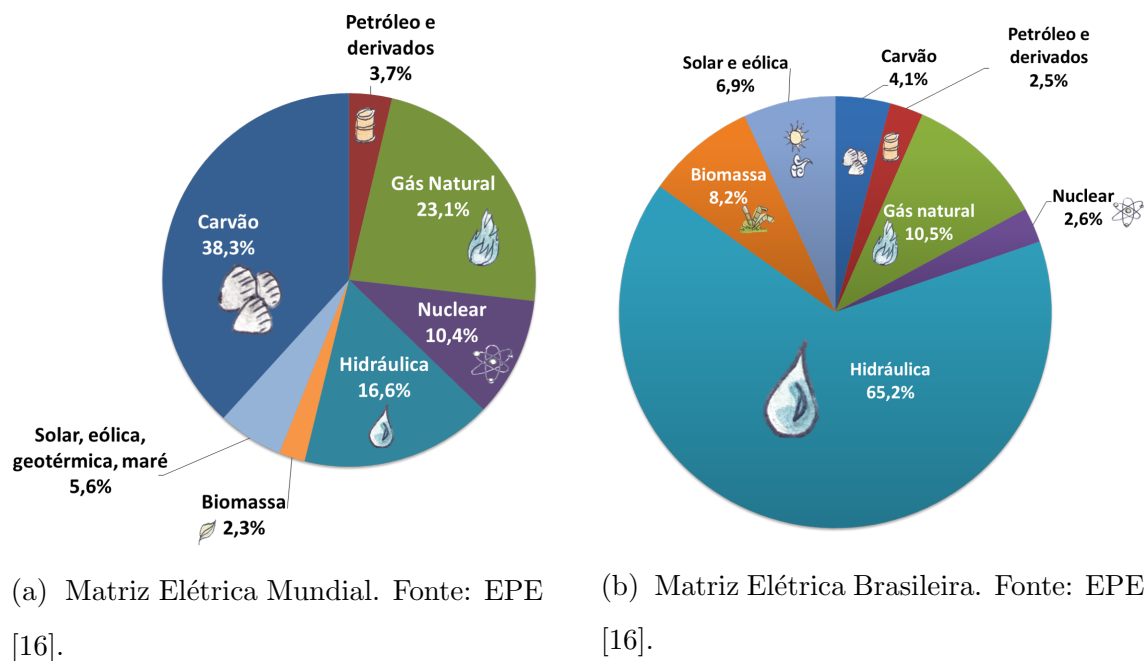


Figura 2.4: Comparação entre a matriz elétrica mundial e a brasileira



Uma tendência mundial no setor é a transição da rede elétrica atual para o smart grid. Este termo engloba uma série de tecnologias, tendo como foco o sensoriamento dos componentes que compõem a rede. Isto permite ter informações sobre o consumo em um período de tempo menor do que nas redes antigas, além de conseguir averiguar falhas na rede de maneira remota, mudando a postura das distribuidoras de reativa para ativa, pois torna-se possível resolver os erros antes que os clientes liguem para a concessionária.

Assim como visto em [19], no ano de 2012 a ANEEL aprovou a resolução normativa No 482 [20], que "Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências". Desde março de 2016 é permitido que qualquer fonte de energia renovável participe do sistema de geração distribuído, não limitando somente à solar e à eólica. Sendo assim a tendência é que parte da produção de energia seja proveniente de pequenos geradores, diminuindo parcialmente a dependência de grandes produtores de energia, o que pode acarretar na redução do risco de deficit de energia.

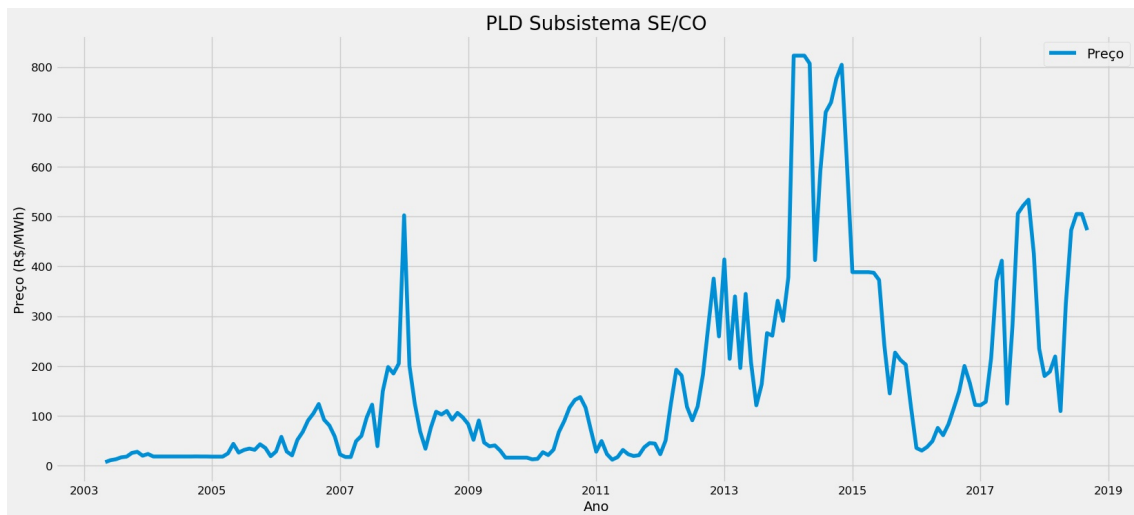


Figura 2.5: Instituições do setor elétrico brasileiro. Fonte: CCEE [13].

No gráfico acima observa-se que existem pontos onde o SIN foi afetado por crises, fazendo com que o PLD aumentasse abruptamente. No ano de 2007 ocorreu a primeira mostrada no gráfico. O SEB tinha passado por uma recente reestruturação da organização, a qual não foi suficiente para evitar o acontecimento. Durante o

período de racionamento (2001/06 - 2002/02) a demanda foi menor do que a oferta, porém com o passar do anos ela voltou a se aproximar da curva de oferta. Após abril de 2005, houve um período sem investimento na capacidade energética sistema. Junto com esse fato, ocorreu um período de baixa afluência nas usinas hidrelétricas.

Outra crise notável ocorreu no ano de 2014, onde segundo [21], houve a diminuição das tarifas imposta pelo governo em um momento de demanda crescente, o atraso em obras de geração e transmissão, além da escassez de chuvas.

O PLD é calculado semanalmente e disponibilizado sexta-feira pela CCEE conforme a fórmula 2.3, com vigência na semana seguinte. Para cada um dos submercados do SIN são divulgados valores para os três patamares de carga: leve, médio e pesado. Esses estão relacionados com a hora do dia e o consumo, sendo que o patamar é pesado em horários de alto consumo e leve nos período de baixo demanda energética. O PLD mensal por subsistema é calculado também pela CCEE através da média dos preços ponderadas pelo tempo em cada patamar.

$$PLD_{s,r,\omega} = \min(\max(CMO_{s,r,\omega}, PLD_{\min_{ano}}), PLD_{\max_{ano}}) \quad (2.3)$$

Onde:

Tabela 2.2: Variáveis utilizadas no cálculo do PLD semanal [13].

| Variável           | Significado                                    |
|--------------------|--|
| $s$                | Subsistema ("N", "NE", "S", "SE\CO")           |
| $r$                | Patamar de carga ("leve", "médio", "pesado")   |
| $w$                | Semana do mês                                  |
| CMO                | Custo para produção de um MWh adicional no SIN |
| $PLD_{\min_{ano}}$ | PLD mínimo estabelecido anualmente pela ONS    |
| $PLD_{\max_{ano}}$ | PLD máximo estabelecido anualmente pela ONS    |

O PLD máximo é calculado com base no custo variável unitário - CVU mais elevado de uma Usina térmica - UTE em operação comercial, a gás natural, contratada por meio Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado -

CCEAR , definido no planejamento mensal de operação - PMO de dezembro e será aplicado entre a primeira e última semana operativa do ano subsequente, para todos os submercados.

O PLD mínimo é calculado com base no maior valor entre: i) o calculado com base na Receita Anual de Geração- RAG das usinas hidrelétricas em regime de cotas, nos termos da Lei nº 12.783/2013, excluídos os valores relacionados à remuneração e reintegração de investimentos, e adicionada a estimativa de Compensação Financeira pelo Uso dos Recursos Hídricos - CFURH; e ii) as estimativas dos custos de geração da usina de Itaipu para o ano seguinte, fornecidas pela Itaipu Binacional para fins de reajustes e/ou revisões tarifárias.

O valores de definidos para os últimos 5 anos foram:

Tabela 2.3: Preço mínimo e máximo do PLD [13].

| Ano  | PLD Mínimo | PLD Máximo |
|------|------------|------------|
| 2015 | 30,26      | 388,48     |
| 2016 | 30,25      | 422,56     |
| 2017 | 33,68      | 533,82     |
| 2018 | 40,16      | 505,18     |
| 2019 | 42,35      | 513,89     |

O planejamento e o cálculo do PLD é feito com base em programas desenvolvidos especificamente para o SIN. Alguns deles são [22]:

- NEWAVE: Utilizado no planejamento de médio prazo (até 5 anos), com espaçamento mensal entre as previsões
- DECOMP: Utilizado no planejamento de curto prazo (até 12) com base semanal

cálculo do PLD é feito com base no CMO obtido do programa DECOMP, o qual é disponibilizado somente para agentes cadastrados no CCEE e tem como entrada os seguintes dados:

Tabela 2.4: Arquivos de entrada do DECOMP [13].

| <b>Arquivo</b> | <b>Conteúdo</b>   |
|----------------|---|
| CASO.DAT       | Contém o nome do Arquivo índice   |
| Arquivo Índice | Contém a lista de arquivos de entrada sob gerenciamento do usuário            |
| DADGER.DAT     | Dados gerais de planejamento  |
| VAZOES.XXX     | Vazões incrementais afluentes aos aproveitamentos da configuração considerada |
| HIDR.DAT       | Cadastrros de dados das usinas  |
| MLT.DAT        | Médias mensais de longo termo   |
| LOSS.DAT       | Perdas no sistema   |
| DADGNL.XXX     | dados de usinas térmicas  |

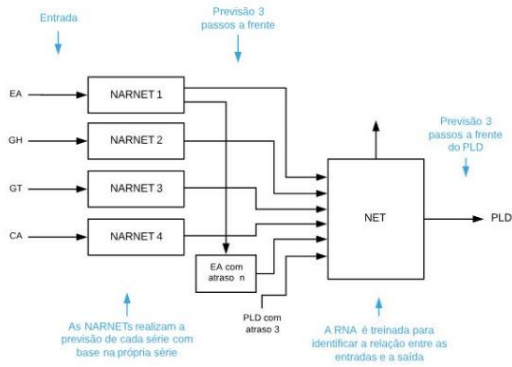
O Termo MLT - Média de Longo Termo se refere à média com período anual, utilizando uma série histórica dos valores de ENA - Energia Natural Afluente para cada um dos meses desde 1931. A ENA, por sua vez é a energia que pode ser gerada através a partir da vazão da água em uma determinada bacia.

O arquivo HIDR.DAT, MLT.DAT e VAZOES.DAT vem em formato binário e para serem lidos pelo operador, precisam de programas auxiliares para a conversão, sendo eles Hydroedit para o primeiro e Vazedit para os dois últimos. Ambos são fornecidos pela ONS. Já arquivo de dados gerais tem 43 parâmetros, sendo alguns deles contratos de importações/exportação de energia, custo de déficit e a função de custo futuro. Esta última determinada pelo NEWAVE.

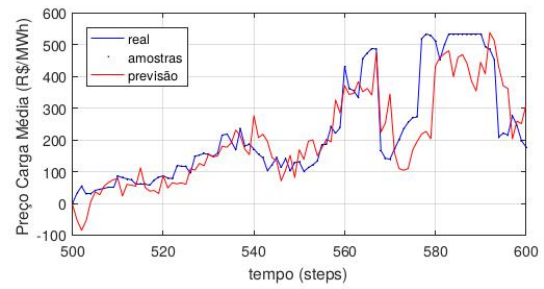
Obter um modelo matemático baseado no DECOMP que possa ser utilizado na previsão do PLD é de interesse não só dos agentes que participam do mercado elétrico brasileiro, como também de empresas indiretamente relacionadas ao setor como consultorias e bancos, além de existir o viés acadêmico, pois o entendimento da dinâmica do preço pode ajudar na formulação de novos modelo de previsão e alteração do já existente, buscando melhoras nas atividades de planejamento feitas pelos órgãos.

## 2.2 Revisão bibliográfica

Em [23] foi utilizada uma abordagem onde são previstos os valores de energia afluente, energia proveniente de hidroelétricas, energia proveniente de usinas térmicas e carga dos subsistemas, a fim de obter o valor do PLD indiretamente. A outra forma proposta foi utilizar a própria informação sobre o PLD na previsão do mesmo. Em ambos os casos, foram utilizadas redes neurais artificiais autorregressiva não-linear - NARNET e os valores previstos são para até 3 semanas à frente.



(a) Esquemático previsão indireta PLD[23].

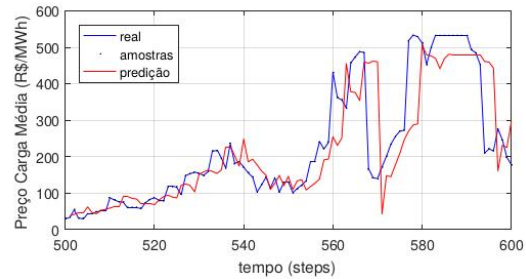


(b) Previsão indireta do PLD [23].

Figura 2.6: Previsão indireta do PLD



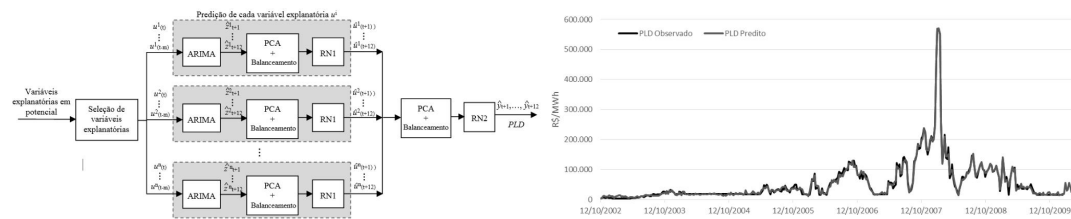
(a) Esquemático previsão direta do PLD[23].



(b) Previsão direta PLD[23].

Figura 2.7: Previsão direta do PLD

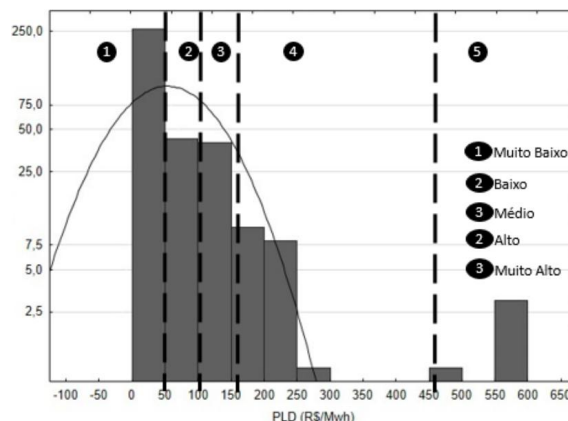
Outras abordagens são vistas em [2], onde é proposto um modelo híbrido com a utilização de modelo autorregressivo de média móvel integrada sazonal - SARIMA, análise de componentes principais e redes neurais, conforme a figura a seguir:



(a) Esquemático modelo híbrido de pre- (b) Resultado da previsão do modelo  
visão do PLD. [2]. híbrido. [2].

Figura 2.8: Previsão do PLD utilizando o modelo híbrido

Na segunda abordagem proposta pelo mesmo autor utilizou-se uma combinação do algoritmo C5.0 e árvore de classificação e regressão - CART para determinar se o preço do PLD será estará dentro de um patamar num instante futuro.



(a) Classes de saída do algoritmo [2].

|             | Muito Baixo | Baixo | Médio | Alto | Muito Alto |
|-------------|-------------|-------|-------|------|------------|
| Muito Baixo | 342         | 0     | 0     | 2    | 0          |
| Baixo       | 1           | 50    | 0     | 0    | 0          |
| Médio       | 1           | 1     | 76    | 5    | 0          |
| Alto        | 1           | 0     | 0     | 95   | 0          |
| Muito alto  | 0           | 0     | 0     | 0    | 7          |

(b) Matriz de confusão [2].

Figura 2.9: Previsão do PLD utilizando o modelo híbrido

Em ambos o casos acima o autor realiza previsões para um período de 12 semanas à frente.

No trabalho visto em [24], , têm se a análise das variáveis utilizadas na entrada de cada submercado através da correlação. Além é feita a comparação entre os resultados obtidos pelo modelo ARIMA, rede neural recorrente, rede neural direta sem seleção de lags e com a seleção de lags. Já em [25] foram utilizadas como variáveis de entrada a geração das hidroelétricas, térmicas e eólica, além da Energia Natural Afluente - ENA, ENA máxima, EAR - Energia Armazenada e o PLD para cada um dos patamares nas 4 últimas semanas, utilizando uma rede neural com 3 neurônios na camada interna. Com métrica utilizada, faz-se um plot do alvo pelo resultado previsto pela rede e então é feito uma ajuste linear. No caso ideal a equação  $y = a \cdot x + b$  se torna  $y = x$  (previsão perfeita).

## Capítulo 3

# Series Temporais e Aprendizado de Máquina

O objetivo deste capítulo é trazer a fundamentação teórica das técnicas utilizadas neste trabalho. Em primeiro lugar será abordada a teoria, aplicações e dificuldades relacionadas às séries temporais. Logo após, serão apresentados os modelos de aprendizados de máquina utilizados como redes neurais MLP e LSTM.

### 3.1 Séries Temporais

Uma série temporal é composta por uma coleção de observações feitas de forma sequencial e dependente [citar Apostila STEMP]. Essa ordem da sequência é dada pelo tempo, o qual pode ser contínuo ou discreto. No primeiro caso,  $T = t : t_1 < t < t_2$  e a série temporal é definida como  $\{X(t) : t \in T\}$ , já no segundo caso,  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  e a série temporal é definida como  $\{X_t : t \in T\}$ , onde  $X$  é a variável observada. Geralmente define-se o  $T$  para o caso discreto como  $T = \{1, 2, \dots, n\}$  para o caso discreto por questões de simplicidade. Neste trabalho será utilizado o caso discreto, dado que a amostragem do sinal tem periodicidade mensal. Sendo assim, os exemplos dados no trabalho serão discretos também.

Assim como o tempo, os valores da variável  $X_t$  podem ser contínuos ou discretos de acordo com o fenômeno que se observa. Alguns exemplos de fenômenos temporais com valores contínuos são a temperatura em uma determinada região, volume de



água em uma bacia hidrográfica e o peso de um indivíduo. Já como exemplo de fenômenos temporais com valores discretos podem ser citados o número viagens de avião, quantidade de nascimentos, de carros produzidos por uma montadora e etc. Todos esse casos estão relacionados com um período de observação próprio, podendo ser uma janela de meses, anos, até mesmo décadas de observações de uma determinada variável.

A análise de séries temporais pode ser feita com diferentes intuitos, sendo os mais comuns a predição de valores futuros com base no histórico já conhecido, o controle de um processo, a explicação e descrição de fenômenos [26].

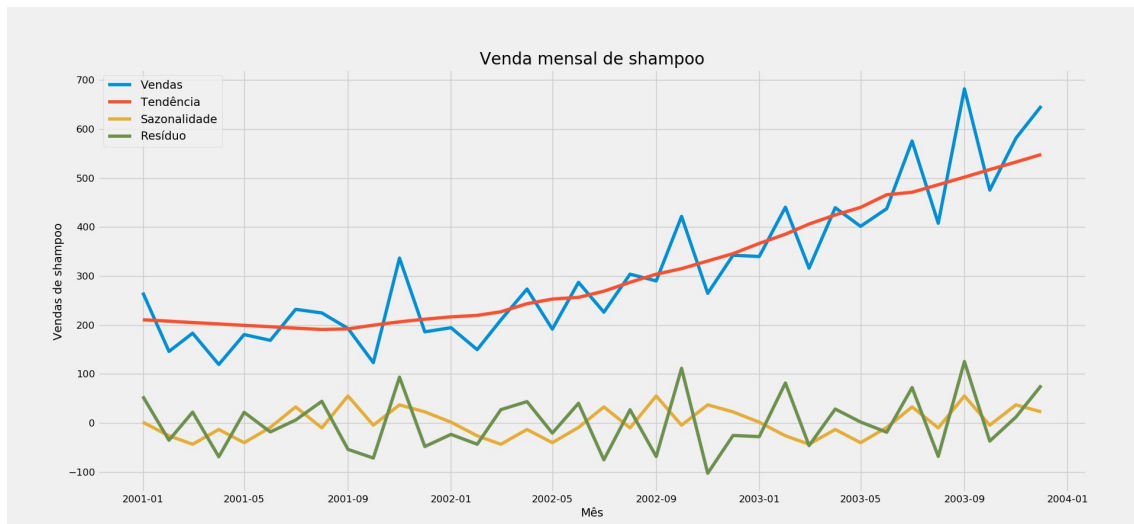


Figura 3.1: Exemplo de decomposição de série temporal. Fonte: Makridakis, Wheelwright and Hyndman (1998) [3]

Falar sobre a estacionalidade utilizada?

Buscando tornar a análise das séries temporais mais simples, além de facilitar a extração de informações importantes de maneira gráfica, é comum decompor a série em outras mais simples. A decomposição utilizada será a seguinte, conforme visto em [27]:

$$X_t = tend_t + sz_t + cs_t + res_t$$

Onde  $tend_t$  é a tendência,  $sz_t$  é a sazonalidade,  $cs_t$  é o ciclo senoidal e  $res_t$  é o resíduo. Tanto a tendência, quanto a sazonalidade e os ciclos senoidais são determinísticos. Conforme [28], boa parte das séries temporais são não estacionárias, sendo que as componentes de tendência e sazonalidade são as maiores responsáveis por esse efeito. Para que o modelo com redes neurais faça boas previsões, que é o que se busca nesse trabalho, é necessário utilizar séries estacionárias, portanto somente a parte residual será usada na entrada das redes neurais.

### 3.1.1 Tendência

Segundo [26], a tendência pode ser vista como "uma mudança de longo prazo no nível médio da série" e a forma mais simples de modelar pode ser vista pela equação a seguir.

$$tend_t = \alpha + \beta t + \epsilon_t \quad (3.1)$$

Onde  $\alpha$  e  $\beta$  são constantes a serem estimadas e  $\epsilon_t$  denota um erro aleatório com média zero. Geralmente chama-se o termo  $m_t = \alpha + \beta t$  de termo de tendência, mas alguns autores chamam o termo  $\beta$  de tendência, já que  $\beta = m_t - m_{t-1}$ . Essa variável indica a inclinação da função durante o tempo.

A função utilizada na aproximação da tendência é pode ser escolhida de acordo com a série que está sendo analisada. Uma forma bastante comum é a utilização de uma função polinomial na extração de tendência.

Na tendência polinomial 3.2, busca-se fazer uma extração boa o suficiente para obter-se ao final do processamento a componente residual estacionária com média zero. Para séries monotonicamente crescente ou decrescente, utilizar  $p = 1$  (função linear) ou  $p = 2$  (função quadrática) geralmente é suficiente para a extração da tendência, porém caso a série seja mais complexa, pode ser necessário utilizar funções de ordem mais altas

$$tend_t = \epsilon_t + \sum_{n=0}^p \beta_n t^n \quad (3.2)$$

Alguns métodos de filtragem podem ser utilizado também na extração de tendência. É comum utilizar filtros lineares nessa tarefa. Esses são definidos pela seguinte equação:

$$y_t = \sum_{j=-q}^s a_j x_{t+j} \quad (3.3)$$

Onde  $a_j$  são os pesos que multiplicam o sinal  $x_{t+j}$ . Para o filtro de médias móveis geralmente utiliza-se  $q = s$  e  $a_{-r} = a_r$ , garantindo a simetria do filtro. Além disso faz-se que  $\sum_{j=-q}^s a_j = 1$ , de modo que  $\min\{x_t\} \leq y_t \leq \max\{x_t\}$ . O caso mais simples de média móvel é aquele onde todos os pesos tem o mesmo valor:

$$y_t = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q x_{t+j} \quad (3.4)$$

O resultado do filtro acima é não-causal, o que impede que o processamento seja realizado em tempo real. Sendo assim, uma outra abordagem possível é fazer um deslocamento no filtro para que sejam utilizadas somente amostras do passado, conforme a equação a seguir:

$$y_t = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-2q}^0 x_{t+j} \quad (3.5)$$

Outro problema observado nas abordagens de média móvel descritas acima é que somente é que só se obtém a tendência para  $N-2q$  pontos. Caso seja necessário obter a tendência para todos os pontos da série, pode-se aplicar métodos de extrapolação sobre o resultado obtido.

Uma terceira abordagem para extração de tendência é utilizar um filtro com pesos que decaem geometricamente, com  $j$ , priorizando assim, as amostras mais recentes da série temporal:

$$y_t = \sum_{j=0}^{\infty} \alpha(1-\alpha)^j x_{t-j} \quad (3.6)$$

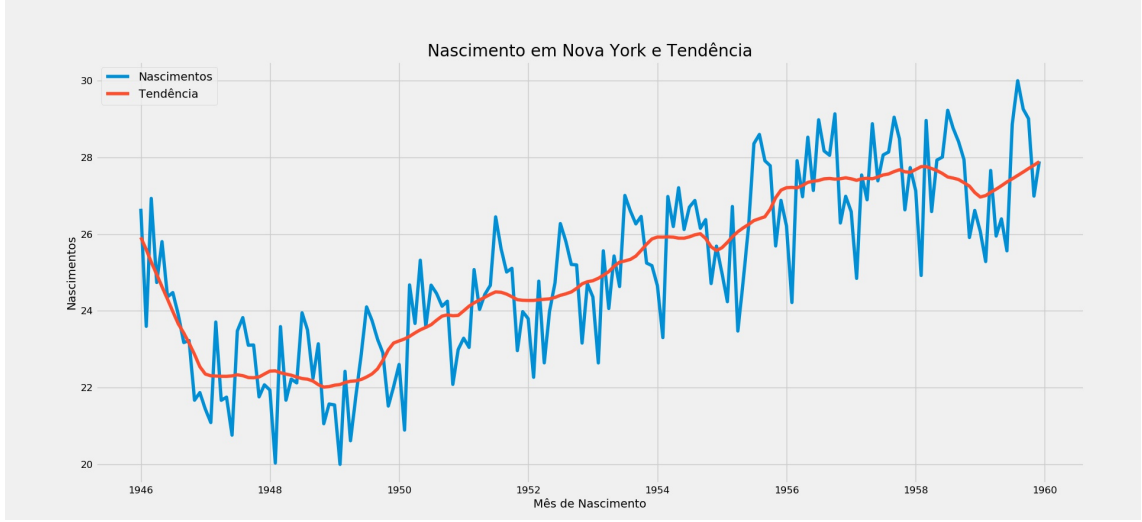


Figura 3.2: Exemplo de extração de tendência com filtro de média. Fonte: Newton (1998). [4]

Outra forma de extrair a tendência é através da diferenciação. Para dados não sazonais, a primeira diferença costuma ser suficiente para garantir a estacionariedade aproximada da série restante [26]:

$$y_t = x_t - x_{t-1} = \nabla x_t \quad (3.7)$$

### 3.1.2 Sazonalidade

É comum encontrar nas séries observadas alguns padrões que se repetem periodicamente. Esse efeito é denominado sazonalidade e deve ser removido para que se obtenha ao final do processamento uma série residual estacionária[27].

Segundo [27], a sazonalidade pode ser determinada pela seguinte fórmula:

$$sz_t = \frac{1}{Int(N/P)} \sum_{k=0}^{Int(N/P)} s_i(i + kP) \quad i = 1, \dots, P \quad (3.8)$$

Onde  $N$  é o número de amostras,  $P$  é o período sazonal,  $Int(N/P)$  é o resultado inteiro da divisão de  $N/P$  e  $s_i$  é o sinal com a tendência previamente removida. Sendo assim, é feito uma média dos pontos da série temporal espaçados pelo período

$P$ . A sazonalidade se repete durante a série temporal, então, caso seja desejado obter a sazonalidade em um tempo  $0 < t < N$  utiliza-se a seguinte fórmula:

$$sz_t = sz[Resto(t/P)] \quad (3.9)$$

A periodicidade do fenômeno sazonal pode ser obtida através do conhecimento prévio da série que está sendo analisada ex: Espera-se que a venda de protetores solares seja maior no período de verão, pois é quando as pessoas costumam ir mais às praias. O número de pessoas que frequentam o metrô deve diminuir durante o fim de semana, pois a maioria trabalha durante a semana etc.

Outra forma de se obter o período é fazendo uma inspeção visual sobre o gráfico da série após a remoção da tendência. Em alguns casos serão visíveis os padrões periódicos.

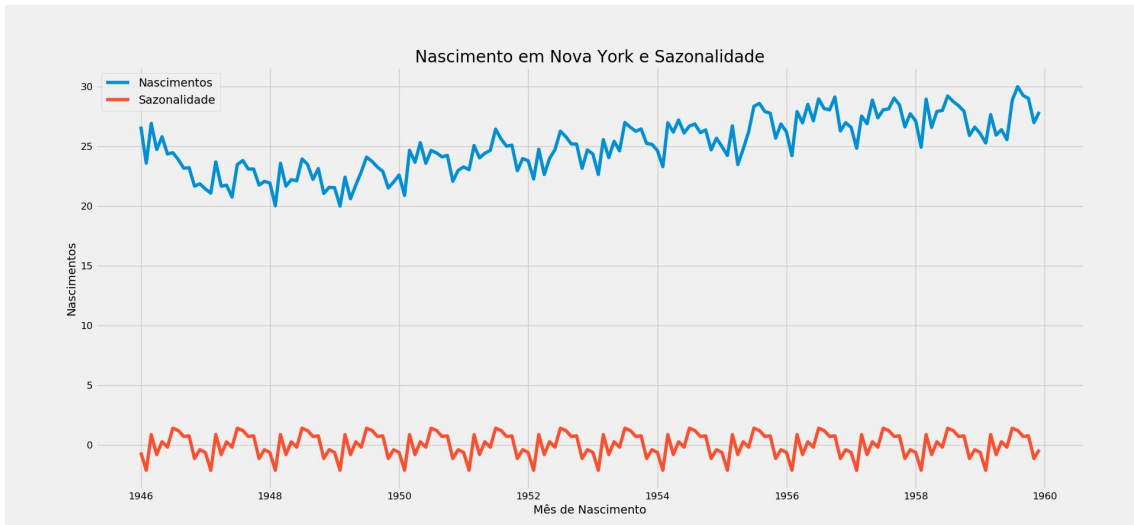


Figura 3.3: Extração de sazonalidade com periodicidade anual ( $P = 12$ ) para o dataset de nascimentos em Nova York. Fonte: Newton (1988). [4]

Também pode-se obter a informação sobre o período através da observação do gráfico de autocorrelação, onde picos de magnitude seguindo um padrão de espaçamento podem indicar a periodicidade da sazonalidade.

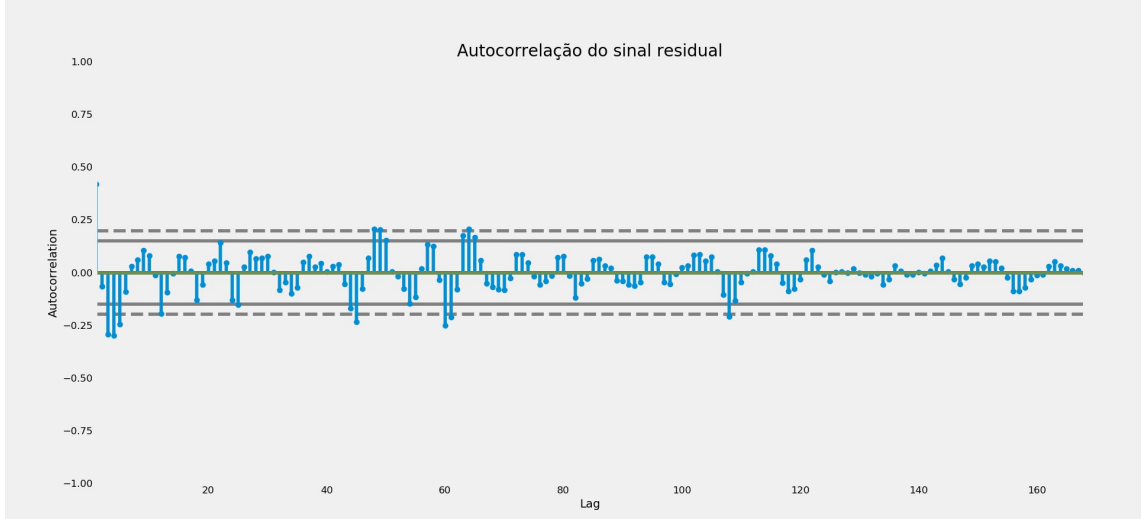


Figura 3.4: Autocorrelação para o sinal residual do dataset de nascimentos em Nova York. Fonte: Newton (1988). [4]

### 3.1.3 Ciclos Senoidais

Os ciclos senoidais representam um caso bem específico de sazonalidade, sendo representados por senoides de período  $P$ . Essa senoide é extraída através da análise do espectrograma dado pela FFT-*Fast Fourier Transform*. Os parâmetros de saída são os termos  $a$  e  $b$ , conforme vistos nas equações abaixo[5]:

$$cs_t = a \cdot \cos(2\pi ft) + b \cdot \sin(2\pi ft) \quad (3.10)$$

Os pontos onde a magnitude do sinal ( $\sqrt{a^2 + b^2}$ ) são muito maiores que os outros indicam provável ciclos senoidais que devem ser removidos.

### 3.1.4 Componente Residual

Caso o processo de extração de componentes descrito nos tópicos acima seja realizado com sucesso, será obtida uma componente residual estacionária. Busca-se também uma distribuição próxima da normal para facilitar a análise. Seguindo esta abordagem, este sinal residual é a única parte aleatória do modelo. Sendo assim, o problema se reduz a prever o comportamento da parte residual da série temporal.

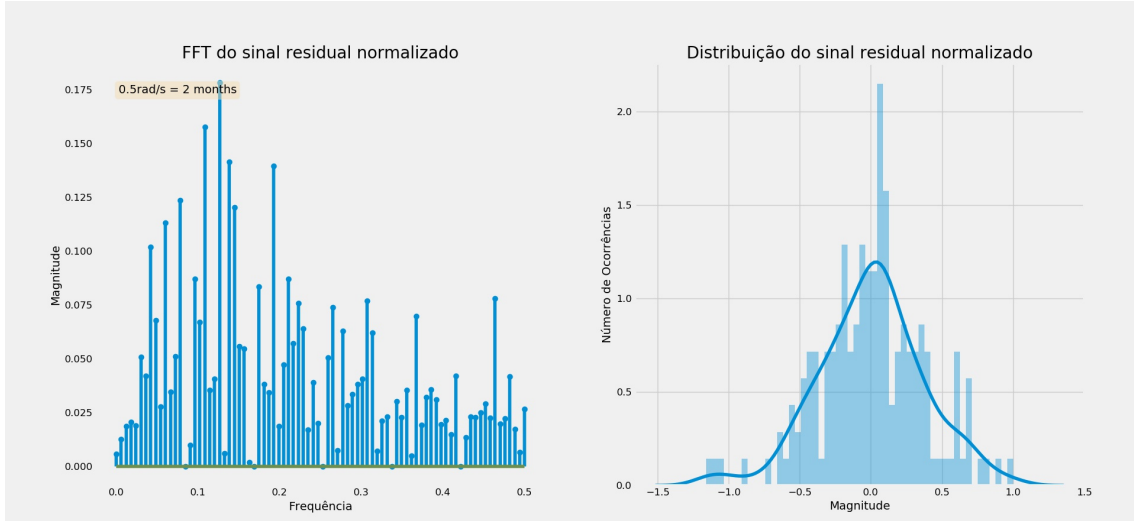


Figura 3.5: esiduo sem remoção de ciclos senoidasi para o dataset de nascimentos em Nova York. Fonte: Newton (1988). [4]

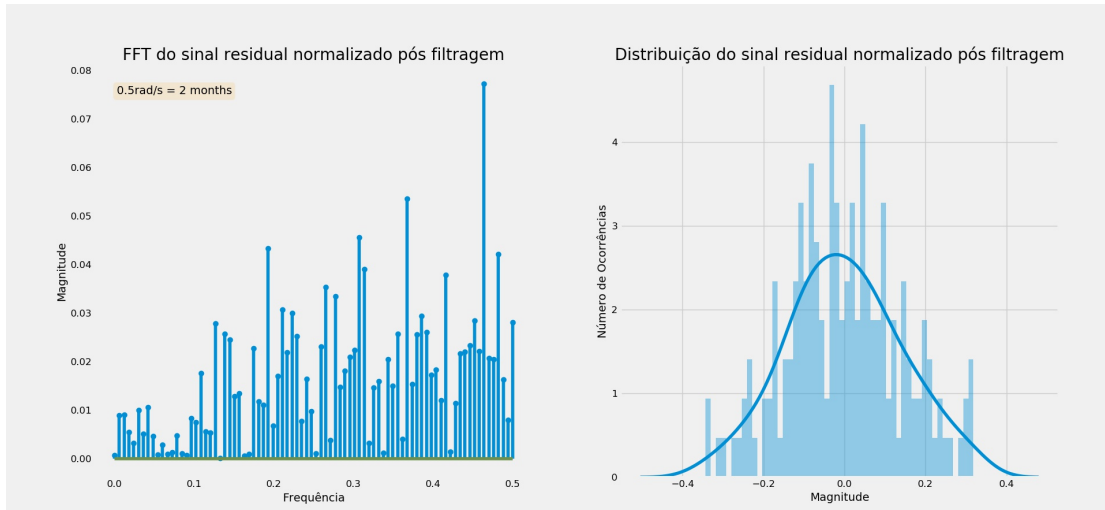


Figura 3.6: Residuo com remoção de ciclos senoidais para o dataset de nascimentos em Nova York. Fonte: Newton (1988). [4]

Como pode-se observar, o sinal residual após a remoção de ciclos senoidais diminuiu-se a discrepância gerada pelas frequências próximas de  $\omega_0 = 0.135rad$  *amostra* além de deixar a distribuição menos espaçada (O desvio padrão mudou de aproximadamente  $\sigma = 0.37$  para  $\sigma = 0.14$ ).

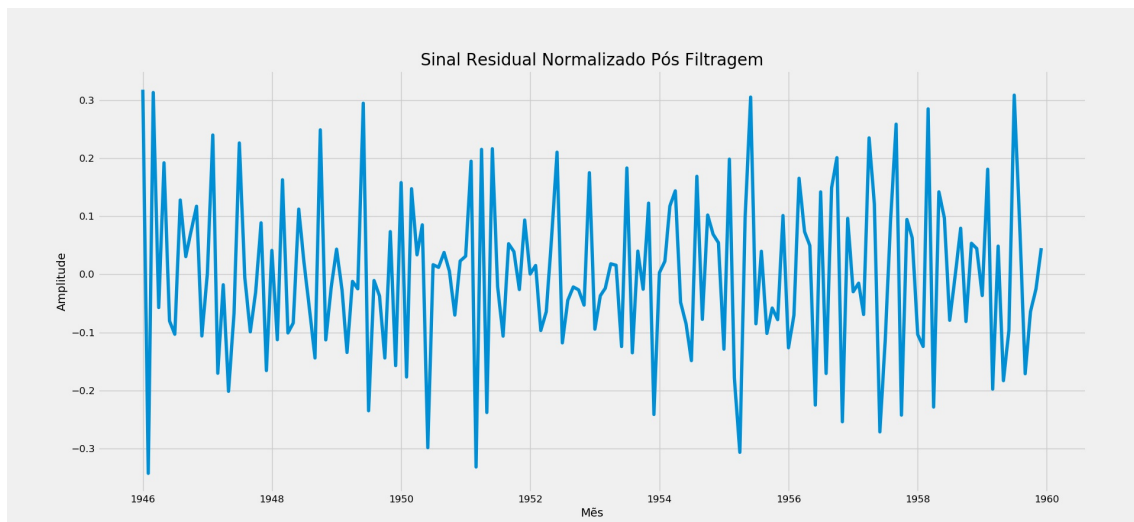


Figura 3.7: Sinal residual no tempo para o dataset de nascimentos em Nova York Fonte: Newton (1988). [4]

## 3.2 Processamento de Sinais

Para remover os ciclos senoidais do espectrograma visto em [citar figura do espectrograma] é necessário realizar algum tipo de filtragem sobre sinal.

Uma das formas de se classificar um filtro é pela sua resposta em frequência, sendo as mais comuns: passa-baixa, passa-alta, passa-banda e rejeita-banda, assim como visto na figura abaixo.

No problema de remoção de ciclos senoidais, busca-se um filtro que remova somente a frequência com maior magnitude, sem afetar muito as magnitudes das outras frequências presentes no espectrograma. Para isso procura-se um filtro que seja rejeita-banda com a banda de rejeição bem estreita e banda de passagem aproximadamente plana.

Um filtro bastante conhecido na literatura que atende a esse critério é o Notch, o qual a função de transferência é dada pela seguinte fórmula. A escolha pela versão IIRs se dá pela possibilidade de obter atenuações maiores e banda de rejeição mais estreita para um mesma ordem  $N$  quando comparado com os filtros FIRs. A função de transferência do filtro Notch de segunda ordem se dá pela equação a seguir: [5]:



$$H(z) = b \cdot \frac{1 - 2 \cos \omega_0 z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2b \cos \omega_0 z^{-1} + (2b - 1)z^{-2}} \quad (3.11)$$

e

$$b = \frac{1}{1 + \beta} = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{1-G_b^2}}{G_b} \tan(\frac{\Delta\omega}{2})} \quad (3.12)$$

Onde  $\omega_0$  é a frequência que se deseja rejeitar,  $\Delta\omega$  é a banda de rejeição,  $G_b$  é a atenuação na frequência de corte. Geralmente utiliza-se  $G_b = 3dB$ . O parâmetro  $Q$  citado na seção 3.1.4 pode ser definido também como  $Q = \frac{\omega_0}{bw}$ .  $bw$  por sua vez é a banda de rejeição do filtro Notch.

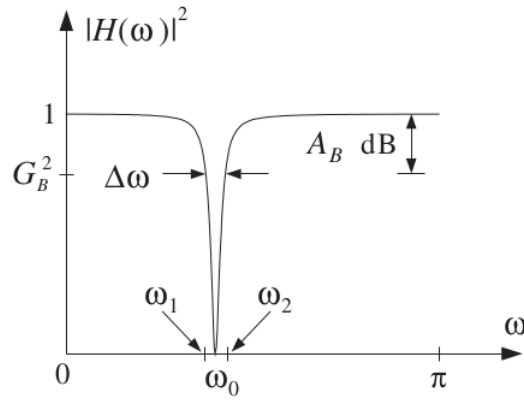


Figura 3.8: Filtro Notch IIR digital Fonte: Introduction to Signal Processing. [5]

### 3.3 Redes Neurais Artificiais

Redes Neurais artificiais são modelos computacionais que tentam reproduzir o comportamento observado na estrutura cerebral dos seres vivos. O neurônio pode ser considerado a célula básica de processamento do cérebro humano. Sua estrutura é dividida em três partes principais [27] [29] [30]:

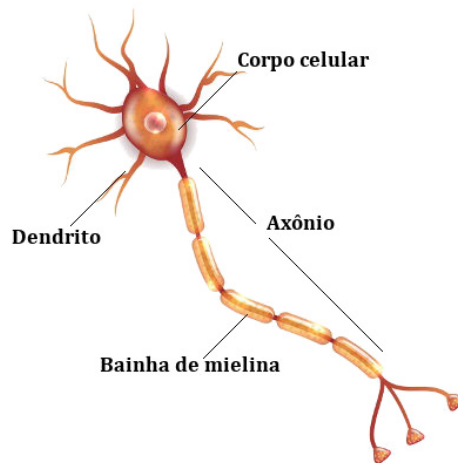


Figura 3.9: Neurônio. Fonte: [6]

- **Dendritos:** São responsáveis por receber estímulos elétricos de outros neurônios
- **Corpo celular:** Processa as informações recebidas pelos dendritos e determina se será disparado um impulso elétrico
- **Axônio:** Transmite o impulso elétrico, e, através das sinapses, envia a informação para outros neurônios. Isto ocorre sem contato entre os neurônios

A representação matemática desse modelo é dada pela seguinte estrutura:

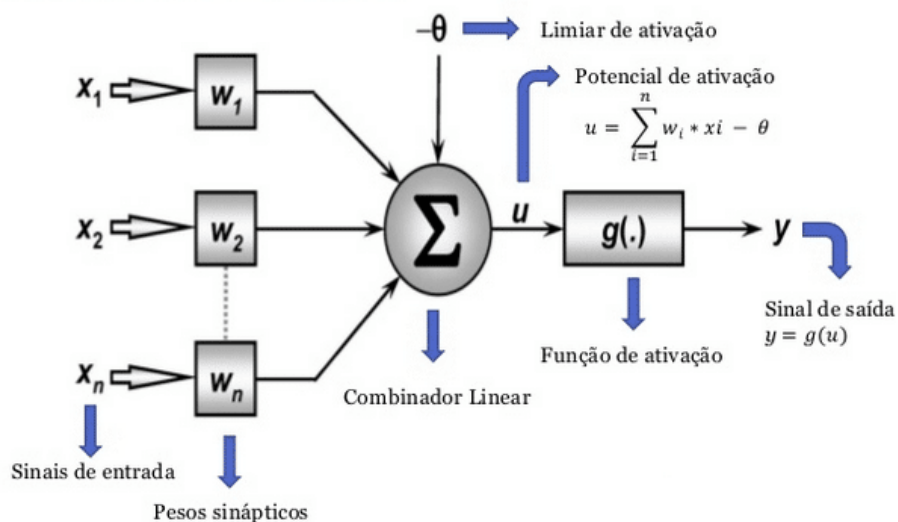


Figura 3.10: Neurônio Artificial. Fonte: [7]

A entrada do neurônio é um vetor  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  análogo aos sinais elétricos transmitidos no cérebro humano. Essa entrada é ponderada por um conjunto de pesos  $W = [w_1, w_2, \dots, w_N]$  e somada em um combinador linear junto com um limiar de ativação  $\theta$ . O somatório das entradas gera um potencial de ativação  $u$ , o qual passa por uma função de ativação e gera um sinal de saída que poderá ser propagado para outros neurônios [29]. As informações descritas acima se resumem nas seguintes equações [31]:

$$u_j = \sum_{i=1}^N w_{ji} \cdot x_i - \theta \quad (3.13)$$

$$y = g(u) \quad (3.14)$$

Sendo que se considerar  $x_0 = 1$  e  $w_0 = -\theta$ , pode-se definir a equação 3.13 como:

$$u = \sum_{i=0}^n w_i \cdot x_i \quad (3.15)$$

A função de ativação pode ter diferentes formatos. Caso seja identidade, obtém-se um regressor linear [32]. Este tipo de abordagem traz uma grande desvantagem, pois a saída do sistema sempre será linear. Isto vem do fato de que uma composição de transformações lineares é também uma transformação linear. Sendo assim, nas redes neurais são utilizadas funções não-lineares. Alguns exemplos são:

- **Função Logística:**

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta u}} \quad (3.16)$$

Onde  $\beta$  é uma constante real que modifica a inclinação da reta.

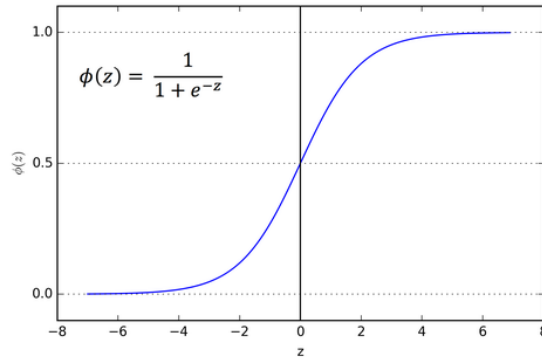


Figura 3.11: Neurônio Artificial. Fonte: [8]

- **Tangente Hiperbólica:**

$$g(u) = \frac{1 - e^{-\beta u}}{1 + e^{-\beta u}} \quad (3.17)$$

Onde  $-1 \leq g(u) \leq 1$  para qualquer  $u$  e assim como em 3.16,  $\beta$  também modifica a inclinação da reta.

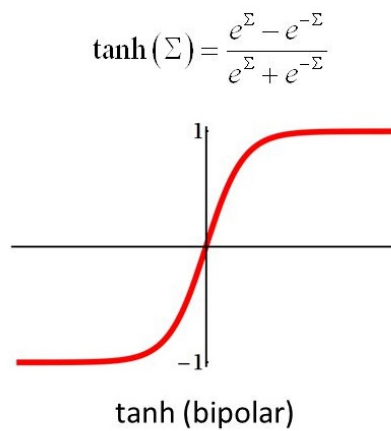


Figura 3.12: Tangente Hiperbólica. Fonte: [9]

- **Unidade Linear Retificada - ReLU [33]:**

$$g(u) = \max(0, u) \quad (3.18)$$

Esta função é linear na parte positiva e zero na parte negativa.

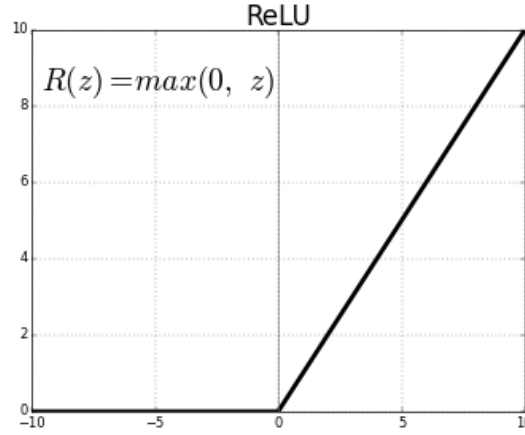


Figura 3.13: ReLU. Fonte: [10]

As funções de ativação 3.16 e 3.17 são deriváveis em todos os pontos e a 3.18 só não é derivável no ponto zero, porém contorna-se essa limitação fazendo  $g'(0) = 0$ . A ReLU tem sido essencial para o estado da arte de redes neurais [10] [34] [35] [36]. A derivada da função de ativação é utilizada pelos algoritmos de treinamento baseados no gradiente do erro assim como será visto mais à frente.

### 3.3.1 Backpropagation

O algoritmo de backpropagation é bastante utilizado no treinamento de redes neurais e utiliza o gradiente do erro como base dos cálculos, assim como mencionado anteriormente [32] [37]. Busca-se mover o vetor dos pesos na direção do mínimo local. A expressão de atualização dos pesos é da seguinte forma:

$$w^{(\tau+1)} = w^{(\tau)} - \eta \nabla E_n w^{(\tau)} \quad (3.19)$$

O qual deve ser repetido até que o erro se torne suficientemente pequeno. O gradiente do erro nessa fórmula é dado por:

$$\nabla E^{(\tau)} = \frac{\partial E}{\partial W_{ji}^{(\tau)}} = \frac{\partial E}{\partial Y_j^{(\tau)}} \cdot \frac{\partial Y_j^{(\tau)}}{\partial u_j^{(\tau)}} \cdot \frac{\partial u_j^{(\tau)}}{\partial W_{ji}^{(\tau)}} \quad (3.20)$$

Têm-se como ideia principal do mesmo avaliar quanto que um determinado peso em uma camada influência no erro da saída e assim, modificá-lo de forma a tornar

esse erro menor. Um ponto importante para o sucesso do algoritmo é a normalização da entrada, visto que diminui o tempo de convergência.

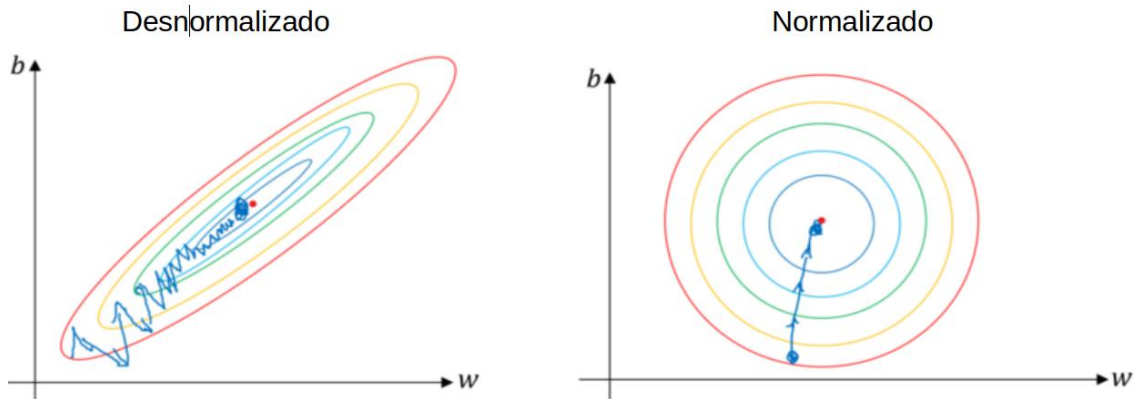


Figura 3.14: Gradiente Descendente desnormalizado e normalizado. Fonte: [10]

### 3.3.2 Rede perceptron multicamadas - MLP

Assim como no cérebro, os neurônios artificiais podem ser agrupados em estrutura mais complexas. Para uma camada inicial com  $N$  entradas têm-se na  $J$ -ésima saída:

$$Y^{(1)} = g\left(\sum_{i=0}^N W_{ji}^{(1)} \cdot X_i\right) \quad (3.21)$$

Nas camadas seguintes utiliza-se a saída da camada anterior (a qual tem  $M$  saídas) como entrada na camada atual. Na fórmula busca-se obter a saída para o  $P$ -ésimo neurônio da camada  $H$ .

$$Y_P^{(H)} = g\left(\sum_{i=0}^M W_{pi}^{(H)} \cdot Y_i^{(H-1)}\right) \quad (3.22)$$

As redes MLP tem sido utilizadas em diferentes classes de problemas como classificação de elementos e previsão de séries temporais [27] [29] [38]. Com o grande crescimento do número de dados disponível para utilização e o desenvolvimento das tecnologias computacionais, têm-se atualmente redes com muitas camadas e neurônios em busca de obter maior capacidade de separação, previsão, além de poder obter informações relevantes sobre neurônios intermediários da rede [39] [40] [41].

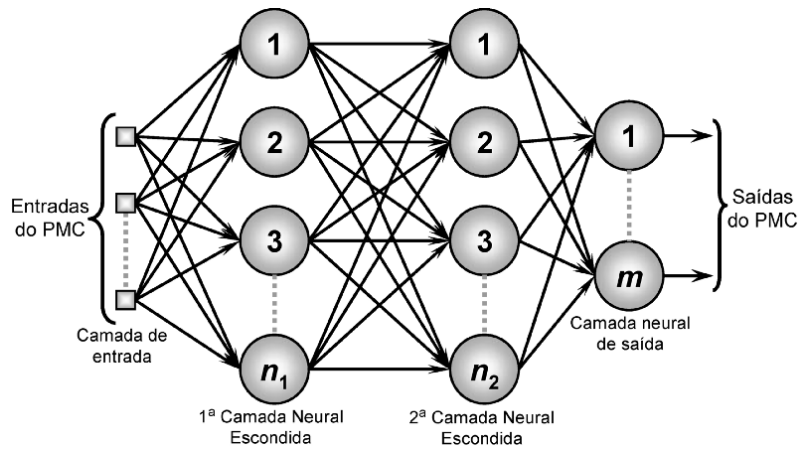


Figura 3.15: Rede Perceptron Multicamadas. Fonte: [42]

### 3.3.3 Treinamento

Para que a rede consiga de fato "aprender" com os dados é necessário realizar o treinamento. Para que o mesmo seja bem sucedido deve-se atentar para alguns fatores como:

- **Inicialização dos pesos:** Os pesos não devem se iniciados com o mesmo valor, pois isto faria com que cada neurônio interprete a entrada da mesma forma, gerando então uma estrutura simétrica [10] [43] [44].
- **Função custo:** Há necessidade de definir qual função de custo será utilizada na avaliação dos resultados da rede. A função mais comum é o erro médio quadrático -  $MSE$ , porém dependendo da análise que se deseja fazer e do problema a ser resolvido, outras funções podem ser utilizadas como a o erro médio quadrático -  $RMSE$ , erro absoluto -  $MAE$  e acurácia -  $ACC$  [28].
- **Curva de aprendizado:** É comum também utilizar um gráfico do erro na saída em função da época de treinamento para o conjunto de treinamento e validação. Através do mesmo é possível observar características como overfitting e underfitting e selecionar o conjunto de pesos que tem o melhor compromisso [45].
- **Quantidade de dados  $X$  complexidade da rede:** Outro fator importante a ser observado é a quantidade de dados disponível para treinamento, visto

que quanto maior a complexidade estrutural da rede, maior a capacidade de gerar funções complexa, portanto torna-se necessário uma maior quantidade de dados para que a mesma seja treinada sem o efeito de overfitting.

- **Taxa de aprendizado:** Caso o fator  $\eta$  da fórmula 3.19 seja um valor muito grande, o algoritmo não conseguirá convergir para um mínimo, porém se  $\eta$  for um número muito grande, o treinamento pode levar muitas épocas até convergir. Cabe então a quem especifica os parâmetros da rede neural escolher um  $\eta$  adequado de forma com que a convergência ocorra e não demore demais.

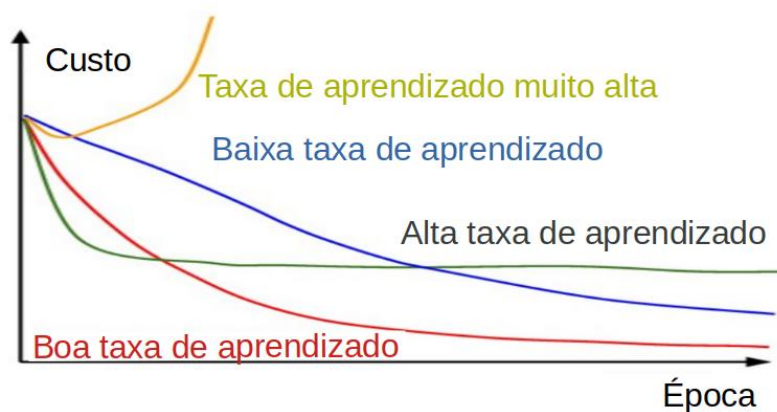


Figura 3.16: Influência da taxa de aprendizado. Fonte: [11]

- **Divisão dos dados de entrada:** Uma prática comum para se obter resultados consistentes é dividir os dados em um conjunto de testes e outro de validação, de forma que o conjunto de testes não seja usado no treinamento, sendo assim usado para verificar o quão bom são os resultados da rede para dados desconhecidos. Outra prática comum é dividir o conjunto de treinamento em treino e validação e utilizar a validação cruzada, de forma a realizar vários treinos com a mesma arquitetura, permitindo obter melhores resultados no treinamento [46].



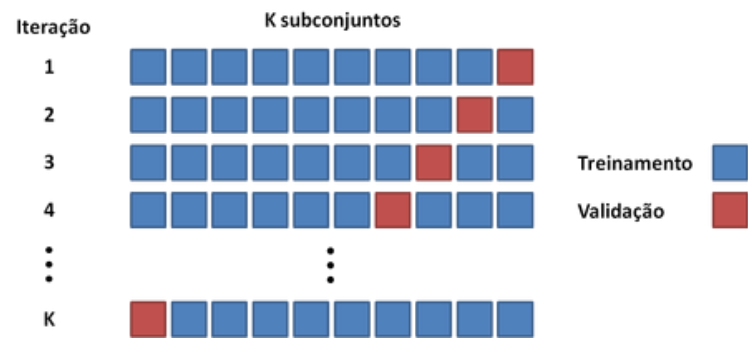


Figura 3.17: Validação cruzada. Fonte: [12]

## Capítulo 4

### Conclusões

Tratam-se das considerações finais do trabalho, mostrando que os objetivos foram cumpridos e enfatizando as descobertas feitas durante o projeto. Em geral reserva-se um ou dois parágrafos para sugerir trabalhos futuros.

Observe que neste modelo a conclusão é numerada pelo numeral 3, mas o projeto não tem a obrigatoriedade de possuir apenas 3 capítulos. Alias, espera-se que tenha mais que isso.

# Referências Bibliográficas

- [1] ONS, “Operador Nacional do Sistema Elétrico”, <http://ons.org.br/>, 2019, (Acesso em 27 Janeiro 2019).
- [2] FILHO, J. C. R., *Previsão multi-passo a frente do preço de energia elétrica de curto prazo no mercado brasileiro*. Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Pará - Instituto de Tecnologia, programa de pós-graduação em engenharia elétrica, 2014.
- [3] MAKRIDAKIS, W., HYNDMAN, “Sales of shampoo over a three year period”, <https://datamarket.com/data/set/22r0/sales-of-shampoo-over-a-three-year-period#!ds=22r0&display=line>, 1998, (Acesso em 9 de Abril 2019).
- [4] (1988), N., “Monthly New York City births: unknown scale. Jan 1946 ? Dec 1959”, <https://datamarket.com/data/set/22nv/monthly-new-york-city-births-unknown-scale-jan-1946-dec-1959#!ds=22nv&display=line>, 1988, (Acesso em 9 de Abril 2019).
- [5] ORFANIDIS, S. J., *Introduction to Signal Processing*, 2002.
- [6] ESCOLA, B., “O que é neurônio?”, <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/biologia/o-que-e-neuronio.htm>, 2019.
- [7] VINICIUS, A., “Redes Neurais Artificiais”, <https://medium.com/@avinicius.adorno/redes-neurais-artificiais-418a34ea1a39>, 2017.
- [8] SHARMA, S., “Redes Neurais Artificiais”, <https://towardsdatascience.com/activation-functions-neural-networks-1cbd9f8d91d6>, 2017.

- [9] BHATTARAI, S., “tanh-activation-function”, <https://saugatbhattarai.com.np/what-is-activation-functions-in-neural-network-nn/logistic-sigmoid-unipolar-tanh-bipolar/>, 2018.
- [10] SARKAR, K., “ReLU : Not a Differentiable Function: Why used in Gradient Based Optimization? and Other Generalizations of ReLU.”, <https://medium.com/@kanchansarkar/relu-not-a-differentiable-function-why-used-in-gradient-based-optimization-7fef3a4cece>, 2018.
- [11] DABBURA, I., “Gradient Descent Algorithm and Its Variants”, <https://towardsdatascience.com/gradient-descent-algorithm-and-its-variants-10f652806a3>, 2017.
- [12] COUTO, E., “Bias vs. Variância (Parte 2)”, <https://ericcouth.wordpress.com/2013/07/18/bias-vs-variencia-parte-2/>, 2013.
- [13] CCEE, “Câmara de Comercialização de Energia Elétrica”, <https://www.ccee.org.br/>, 2019, (Acesso em 31 Janeiro 2019).
- [14] SILVA, E. F. D., *Principais Condicionantes das alterações no modelo de comercialização*. M.Sc. dissertation, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.
- [15] SILVA, B. G. D., *Evolução do setor elétrico brasileiro no contexto econômico nacional: Uma análise histórica e econométrica de longo prazo*. Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo - Programa de pós-graduação em energia EP-FEA-IEE-IF, 2011.
- [16] EPE, “Empresa de Pesquisa Energética”, <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>, 2018, (Acesso em 26 Janeiro 2019).
- [17] CASTRO, N. J. D., LEITE, A. L. D. S., “Preço spot de eletricidade: teoria e evidências do caso brasileiro”, *IV Encontro de Economia Catarinense, 2010, Criciúma*, , 2010.

- [18] CAVALIERE, M. A., “Previsão de preços futuros de energia elétrica no ambiente de contratação livre - uma abordagem de equilíbrio de mercado sob incertezas”, 2017.
- [19] BARRETTO, E. P. B. M., “Smart grid: Eficiência energética e a geração distribuída a partir das redes inteligentes”, 2018.
- [20] ANEEL, “Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012”, <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>, 2019, (Acesso em 26 Fevereiro 2019).
- [21] UFJF, E. I., “Especial: A crise energética brasileira”, <http://energiainteligenteufjf.com/especial/especial-a-crise-energetica-brasileira/>, 2019, (Acesso em 26 Fevereiro 2019).
- [22] CEPEL, “Documentação Técnica das metodologias e modelos de otimização energética do CEPEL”, <http://www.cepel.br/sala-de-imprensa/noticias/menu/noticias/documentacao-tecnica-das-metodologias-e-modelos-de-otimizacao-energetica-do-cepel.htm>, 2019, (Acesso em 26 Fevereiro 2019).
- [23] SILVA, A. P. S., “Previsão do preço de liquidação das diferenças por meio de redes neurais artificiais”, 2018.
- [24] JUNIOR, F. R. P., *Redes neurais diretas e recorrentes na previsão do preço de energia elétrica de curto prazo no mercado brasileiro*. M.Sc. dissertation, Universidade Federal do Pará, 2016.
- [25] RODRIGUES, A. L., *Redes neurais artificiais aplicadas na previsão de preços do mercado spot de energia elétrica*. M.Sc. dissertation, Universidade de São Paulo, 2009.
- [26] EHLERS, R. S., *Análise de Séries Temporais*, 2009.
- [27] CALÔBA, L. P., *Introdução ao Uso de Redes Neurais na Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Séries Temporais*, 2002.

- [28] PEREIRA, D. F. R., “Aprendizado de máquina e aprendizado profundo para apoio à decisão no mercado financeiro”, 2018.
- [29] SILVA, I. N. D., SPATTI, D. H., FLAUZINO, R. A., *Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas*. Artliber Editora, 2010.
- [30] GURNEY, K., *An Introduction to Neural Networks*. Bristol, PA, USA, Taylor & Francis, Inc., 1997.
- [31] HILDEBRANDT, T. H., DINGLE, A., “Improving C++ Performance Using Temporaries”, *Computer*, v. 29, n. 03, pp. 31–41, mar 1998.
- [32] BISHOP, C. M., *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006.
- [33] HE, K., ZHANG, X., REN, S., *et al.*, “Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification”, *CoRR*, v. abs/1502.01852, 2015.
- [34] AGARAP, A. F., “Deep Learning using Rectified Linear Units (ReLU)”, *CoRR*, v. abs/1803.08375, 2018.
- [35] CHENG, H.-T., KOC, L., HARMSSEN, J., *et al.*, “Wide & Deep Learning for Recommender Systems”. In: *Proceedings of the 1st Workshop on Deep Learning for Recommender Systems*, DLRS 2016, pp. 7–10, New York, NY, USA, 2016.
- [36] TANG, Y., “Deep Learning using Support Vector Machines”, *CoRR*, v. abs/1306.0239, 2013.
- [37] Hecht-Nielsen, “Theory of the backpropagation neural network”. In: *International 1989 Joint Conference on Neural Networks*, pp. 593–605 vol.1, 1989.
- [38] GARDNER, M., DORLING, S., “Artificial neural networks (the multilayer perceptron)—A review of applications in the atmospheric sciences”, *Atmospheric Environment*, v. 32, n. 14-15, pp. 2627–2636, 1998.
- [39] SCHMIDHUBER, J., “Deep learning in neural networks: An overview”, *Neural Networks*, v. 61, pp. 85 – 117, 2015.

- [40] DENG, L., YU, D., “Deep Learning: Methods and Applications”, *Foundations and Trends® in Signal Processing*, v. 7, n. 3?4, pp. 197–387, 2014.
- [41] HINTON, G., DENG, L., YU, D., *et al.*, “Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition”, *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 29, pp. 82–97, November 2012.
- [42] MOREIRA, S., “Rede Neural Perceptron Multicamadas”, <https://medium.com/ensina-ai/rede-neural-perceptron-multicamadas-f9de8471f1a9>, 2018.
- [43] YAM, J. Y., CHOW, T. W., “A weight initialization method for improving training speed in feedforward neural network”, *Neurocomputing*, v. 30, n. 1, pp. 219 – 232, 2000.
- [44] HSIAO, T.-C. R., LIN, C.-W., CHIANG, H. K., “Partial least-squares algorithm for weights initialization of backpropagation network”, *Neurocomputing*, v. 50, pp. 237 – 247, 2003.
- [45] Russo, D., Zou, J., “How much does your data exploration overfit? Controlling bias via information usage”, *arXiv e-prints*, p. arXiv:1511.05219, Nov 2015.
- [46] Arlot, S., Celisse, A., “A survey of cross-validation procedures for model selection”, *arXiv e-prints*, p. arXiv:0907.4728, Jul 2009.

# Apêndice A

## O que é um apêndice

Elemento que consiste em um texto ou documento elaborado pelo autor, com o intuito de complementar sua argumentação, sem prejuízo do trabalho. São identificados por letras maiúsculas consecutivas e pelos respectivos títulos.



## Apêndice B

# Encadernação do Projeto de Graduação

|                    |  |
|--------------------|--|
|                    |  |
| Número             | <p><b>UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO</b></p> <p><b>Escola Politécnica</b></p> <p><b>Departamento de Eletrônica e de Computação</b></p> |
| Nome do Aluno      | <p><b>Título do Projeto</b></p>  |
| Título do Projeto* | <p><b>Nome do Aluno</b></p>  |
| Ano                | <p><b>Projeto de Graduação</b></p> <p><b>Mês / Ano</b></p>   |
|                    |  |

**\* Título resumido caso necessário**

**Capa na cor preta, inscrições em dourado**

Figura B.1: Encadernação do projeto de graduação.

# Apêndice C

## O que é um anexo

Documentação não elaborada pelo autor, ou elaborada pelo autor mas constituindo parte de outro projeto.