

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

ANA CLÁUDIA BANDERCHUK

TÍTULO DO TCC

Florianópolis, 2021

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

ANA CLÁUDIA BANDERCHUK

TÍTULO DO TCC

Trabalho de conclusão de curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Eletrônico

Orientador:
Prof. Dr. Fernando Santana Pacheco

Florianópolis, 2021

TÍTULO DO TCC

ANA CLÁUDIA BANDERCHUK

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletrônico em abril de 2021 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Eletrônica do instituto Federal de Educação Ciência, e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 12 de março, 2021.

Banca Examinadora:

Fernando Santana Pacheco, Dr.

RESUMO

Este trabalho apresenta

Palavras-chave: um. dois.

ABSTRACT

This papper presents

Keywords:

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de problemas e seus níveis de complexidade para computadores ou seres humanos resolvê-los.	12
Figura 2 – Diagrama de Venn da Inteligência Artificial e suas áreas de estudo.	13
Figura 3 – Fluxograma que diferencia as áreas de estudo da Inteligência Artificial e suas etapas de processamento de dados.	14
Figura 4 – Ilustração das camadas de um modelo de Aprendizado Profundo.	15
Figura 5 – Comparação entre os modelos Aprendizado de Máquina e Aprendizado Profundo.	15
Figura 6 – Estrutura básica de uma Rede Neural com duas camadas.	16
Figura 7 – Diagrama de um Neurônio de uma Rede Neural.	17
Figura 8 – Exemplos de funções de ativação de um neurônio para uma Rede Neural.	18
Figura 9 – Estapas da atualização dos pesos de um nó em uma Rede Neural.	20
Figura 10 – Método do gradiente para uma variável.	21
Figura 11 – Matriz de Confusão para classificação binária.	22
Figura 12 – Ilustração das medidas de Precisão e Sensibilidade.	23
Figura 13 – Curva da Precisão em função da Sensibilidade para quatro classes distintas.	24
Figura 14 – Exemplo de caixa delimitadora prevista por uma rede neural em comparação com a localização real do objeto para o cálculo da IoU.	25
Figura 15 – Componentes de uma Rede Neural Convolucional típica.	26
Figura 16 – Exemplo de convolução entre dois vetores bidimensionais.	28
Figura 17 – Operações de convolução em uma imagem.	29
Figura 18 – Exemplos de funções utilizadas para operação de <i>pooling</i>	30
Figura 19 – Arquitetura da Rede Neural YOLO.	30
Figura 20 – Comparação da precisão média em função do processamento em <i>frames</i> por segundo para diferentes redes neurais utilizadas em detecção de objetos.	31
Figura 21 – Processo de detecção e classificação na rede neural YOLO.	31
Figura 22 – Diferença entre as tarefas de classificação e detecção de objetos em uma imagem.	32
Figura 23 – Tipos de defeito de fabricação em placas de circuito impresso.	33
Figura 24 – Extração de defeitos em placas de circuito impresso utilizando métodos comparativos.	34
Figura 25 – Fluxograma das etapas para classificação e detecção de defeitos utilizadas na abordagem híbrida RBCNN.	35
Figura 26 – Anotações das caixas delimitadoras do <i>dataset</i> HRIPCB.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição dos defeitos no conjunto de dados HRIPCB.	38
Tabela 2 – Representação dos defeitos do conjunto de dados HRIPCB para o treinamento da Rede Neural.	40

LISTA DE CÓDIGOS

Código 3.1 – Exemplo de arquivo de anotação para treinamento com YOLO.	40
Código 3.2 – Arquivo de configuração <i>obj.data</i>	40
Código 3.3 – Arquivo de configuração <i>obj.names</i>	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	11
1.2	Descrição do problema	11
1.3	Objetivo geral	11
1.4	Objetivos específicos	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Inteligência Artificial	12
2.2	Redes Neurais	14
2.2.1	Estrutura de Uma Rede Neural	16
2.2.2	Funções de Ativação	17
2.2.3	Conjunto de Dados	19
2.2.4	Treinamento de Uma Rede Neural	19
2.2.5	Métricas de Avaliação	21
2.2.5.1	Matriz de Confusão	21
2.2.5.2	Acurácia	21
2.2.5.3	Precisão e Sensibilidade	22
2.2.5.4	Precisão Média	23
2.2.5.5	<i>F-Score</i>	23
2.2.5.6	Intersecção sobre União	24
2.2.6	Redes Neurais Convolucionais	25
2.2.6.1	Operação de Convolução	26
2.2.6.2	Operação de <i>Pooling</i>	27
2.2.6.3	<i>You Only Look Once</i>	27
2.3	Classificação e Detecção de Defeitos em Placas de Circuito Impresso	32
2.3.1	Métodos Automatizados de Extração de Defeitos	32
2.3.1.1	Métodos Comparativos	33
2.3.1.2	Métodos Não-Referenciais	34
2.3.1.3	Métodos Híbridos	35
2.4	Frameworks e Bibliotecas para Detecção e Classificação de Objetos	35
2.4.1	Darknet	36
2.4.2	Flask	36
3	TREINAMENTO DA REDE NEURAL PARA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO	37

3.1	Seleção da Rede Neural e do <i>Framework</i> para o Treinamento	37
3.2	Seleção do Conjunto de Dados	37
3.3	Configuração dos Arquivos para o Treinamento	39
3.4	Treinamento	41
3.4.1	Transferência de Aprendizado	41
3.5	Resultados	41
4	INTERFACE DE APLICAÇÃO	42
	 REFERÊNCIAS	43
	 APÊNDICES	48
	 APÊNDICE A – NOTAÇÕES UTILIZADAS EM REDES NEURAIS .	49
	 APÊNDICE B – ETAPAS DE TREINAMENTO UTILIZANDO A REDE NEURAL YOLO	51
	 APÊNDICE C – EXEMPLO DE ARQUIVO DE ANOTAÇÃO DO CON- JUNTO DE DADOS HRIPCB EM XML	53
	 APÊNDICE D – SCRIPT UTILIZADO NA CONVERSÃO DOS AR- QUIVOS DE ANOTAÇÃO	54
	 APÊNDICE E – SCRIPT UTILIZADO NA DIVISÃO DO DATASET PARA TREINAMENTO DA REDE NEURAL	56
	 APÊNDICE F – CÓDIGO UTILIZADO PARA O TREINAMENTO DA REDE NEURAL NO AMBIENTE GOOGLE COLAB	58

1 INTRODUÇÃO

Placas de circuito impresso são de longe o método mais utilizado para o projeto de eletrônicos modernos. Elas consistem em um sanduíche de uma ou mais camadas de cobre intercaladas com uma ou mais camadas de material isolante (ZUM-BAHLEN, 2008) e servem de suporte para os componentes eletrônicos responsáveis pelo funcionamento de um circuito eletrônico.

À medida em novas tecnologias são desenvolvidas, as placas de circuito impresso estão se tornando cada vez mais sofisticadas e delicadas (HU; WANG, 2020), de modo que a detecção de incertezas, tolerâncias, defeitos e erros de posição relativa associados ao processo de fabricação (LETA; FELICIANO; MARTINS, 2008) deve ser feita com mais cautela a fim de garantir o funcionamento do produto final.

Dessa forma, automatizar a inspeção de defeitos se tornou essencial para aprimorar a qualidade do processo de fabricação, já que técnicas de medição por visão computacional apresentam melhor regularidade, precisão e repetibilidade quando comparada a inspeção humana que, além da imprecisão e não-repetibilidade, está sujeita a subjetividade, fadiga e lentidão e está, ainda, associada a um alto custo (LETA; FELICIANO; MARTINS, 2008).

A inspeção ótica automatizada (AOI) vem sido amplamente utilizada para detectar defeitos durante o processo de fabricação de uma PCB (CHIN; HARLOW, 1982). Conforme a evolução dessa tecnologia, três principais métodos de detecção tem se destacado: métodos comparativos, não-referenciais e híbridos (WU; WANG; LIU, 1996). O método comparativo, mais utilizado entre eles, está suscetível à interferência da iluminação e ruídos externos, além de necessitar mecanismos de alinhamento precisos para realização da comparação (HU; WANG, 2020).

FALTA TERMINAR A INTRODUÇÃO TESTE

1.1 Justificativa

1.2 Descrição do problema

1.3 Objetivo geral

1.4 Objetivos específicos

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Inteligência Artificial

Apesar de ter chamado atenção nos últimos anos com a quantidade enorme de dados adquiridos e processados por grandes corporações como Google, Facebook, Amazon, e Apple (LAWLESS; MITTU; SOFGE, 2020), o termo ‘Inteligência Artificial’ não é tão atual assim. Ele foi utilizado pela primeira vez em 1955 por John McCarthy (ABRAHAM et al., 2021), que conduziu no ano seguinte um workshop cuja premissa central da proposta considera que o comportamento humano inteligente consiste em processos que podem ser formalizados e reproduzidos por uma máquina (DICK, 2019).

Um dos objetivos da Inteligência Artificial, de acordo com Mitchell, Michalski e Carbonell (2013), é fazer com que computadores realizem tarefas mais inteligentes de forma com que não haja necessidade dos seres humanos executá-las. Entretanto, um dos grandes desafios da área de IA atualmente é a execução de atividades consideradas simples e corriqueiras para pessoas, como reconhecimento de objetos e fala (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016). Para ilustrar isso, a tabela da Figura 1 apresenta a diferença entre o nível de dificuldade que um computador ou ser humano tem para resolver determinado problema.

Figura 1 – Exemplos de problemas e seus níveis de complexidade para computadores ou seres humanos resolvê-los.

Problema	Computador	Humano
Multiplicar milhares de números grandes rapidamente	FÁCIL	DIFÍCIL
Identificar rostos em uma foto de uma multidão de pessoas	DIFÍCIL	FÁCIL

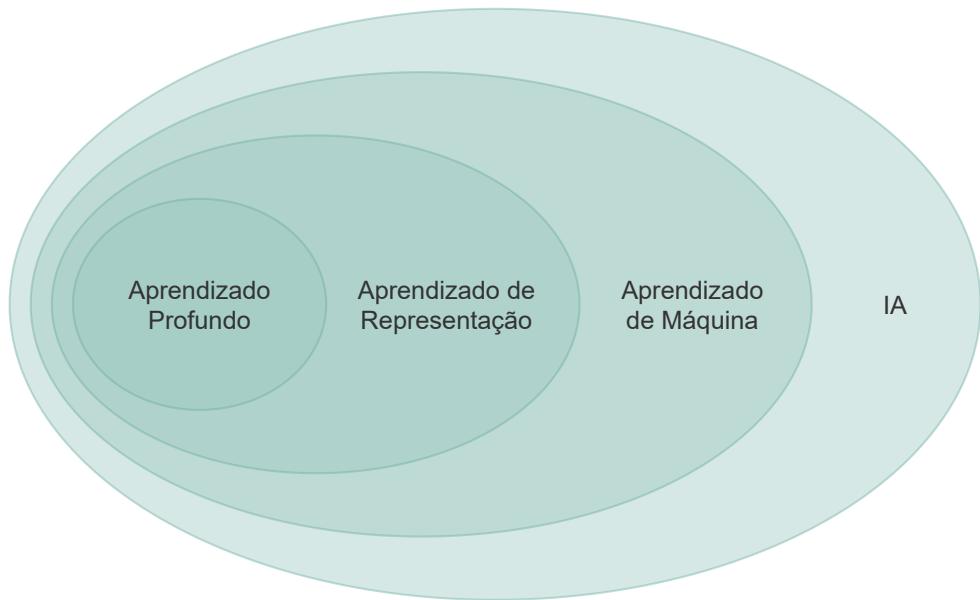
Fonte: Adaptado de Rashid (2016).

A Inteligência Artificial engloba a área de estudo do Aprendizado de Máquina, que por sua vez englobam as áreas do Aprendizado de Representação e Aprendizado Profundo, conforme o diagrama de Venn apresentado na Figura 2.

Para evidenciar as diferenças entre essas áreas de estudo, em comparação com simples Sistemas Baseados em Regras, Goodfellow, Bengio e Courville (2016) apresenta um fluxograma com as etapas de processamento entre a entrada e a saída de dados para cada uma delas, presente na Figura 3.

Sistemas Baseados em Regras não possuem componentes capazes de realizar qualquer aprendizado a partir de dados (GOODFELLOW; BENGIO; COUR-

Figura 2 – Diagrama de Venn da Inteligência Artificial e suas áreas de estudo.

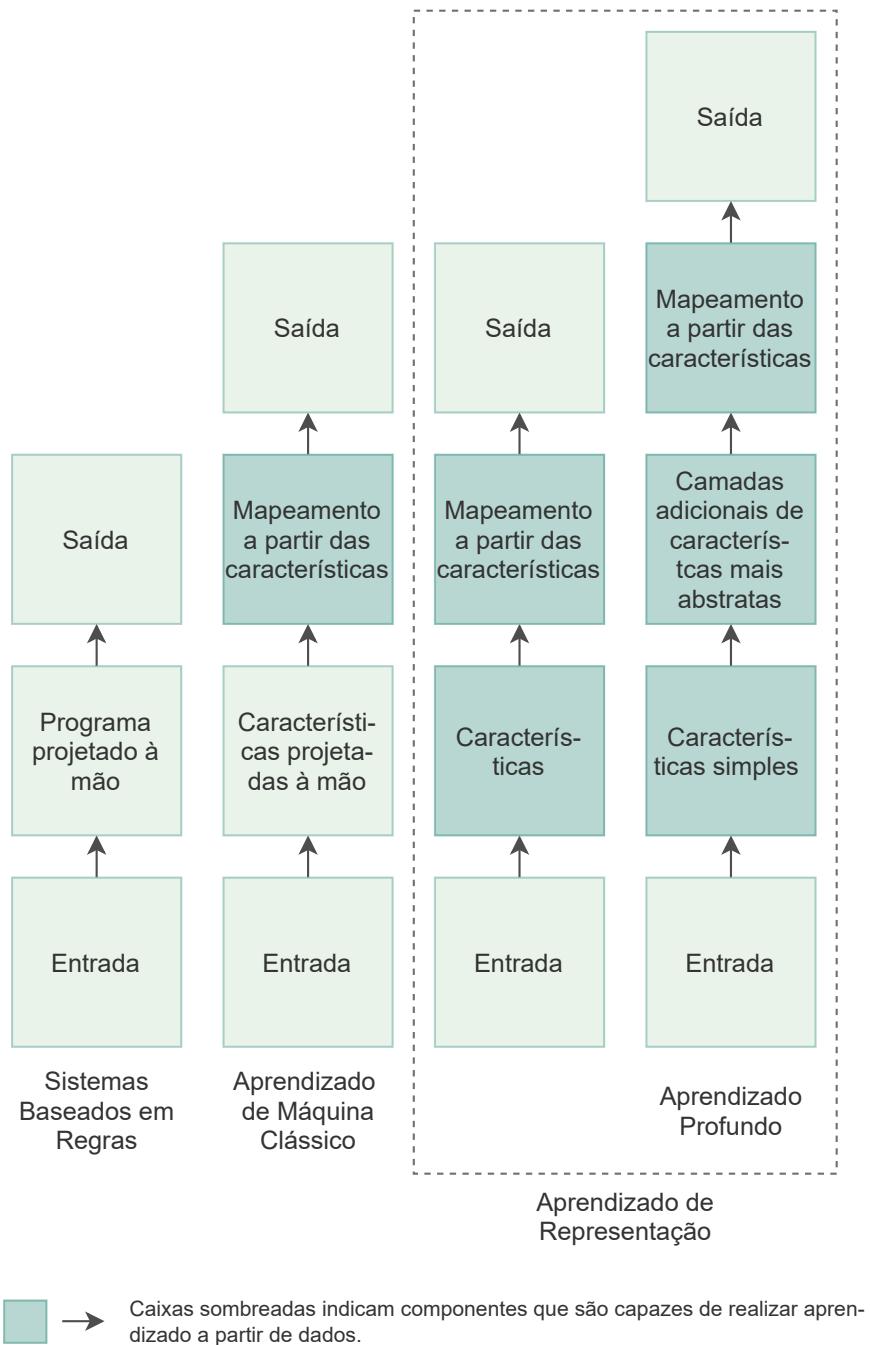


Fonte: Adaptado de Goodfellow, Bengio e Courville (2016).

VILLE, 2016) e são utilizados para resolução de problemas e/ou execução de tarefas que podem ser descritos por uma lista de regras formais, como por exemplo jogar Xadrez. Ao contrários desses sistemas, o Aprendizado de Máquina (do inglês *Machine Learning*) utiliza algoritmos computacionais para transformar características reunidas empiricamente em modelos utilizáveis (EDGAR; MANZ, 2017) possuindo a capacidade “de se aprimorar [...], aprendendo novos conhecimentos ao invés de serem programado com eles” (WOOLF, 2009).

No Aprendizado de Representação (do inglês *Feature Learning* ou *Representation Learning*) entretanto, não há necessidade de mapear manualmente essas características (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016). Ou seja, por conta própria e de forma abstrata, os algoritmos são capazes de extrair as características importantes para a construção dos modelos utilizando redes neurais (ROBINS, 2020) (LESORT et al., 2018). O Aprendizado Profundo, por sua vez, resolve a dificuldade que o Aprendizado de Representação possui de extrair características abstratas de alto nível, tais como sotaques de um locutor (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016). Segundo Mao et al. (2019), o Aprendizado Profundo “imita a função que o cérebro humano possui de interpretar dados usando redes neurais de várias camadas”. Um exemplo dessas variadas camadas é apresentado na Figura 4, onde características distintas são extraídas por cada camada. Uma comparação com o modelo de Aprendizado de Máquina é ilustrado na Figura 5.

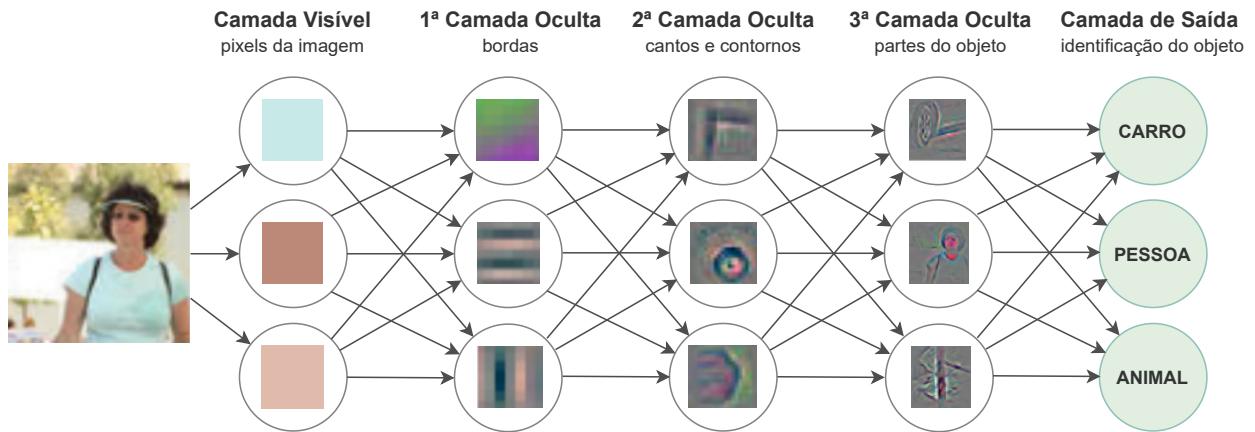
Figura 3 – Fluxograma que diferencia as áreas de estudo da Inteligência Artificial e suas etapas de processamento de dados.



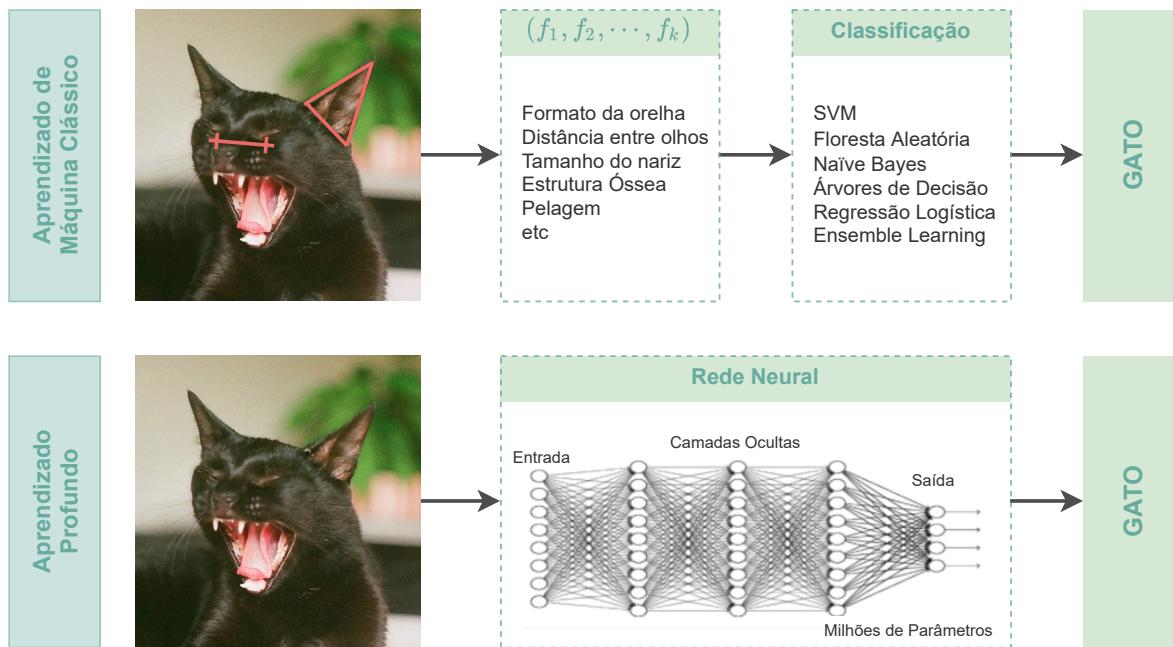
Fonte: Adaptado de Goodfellow, Bengio e Courville (2016).

2.2 Redes Neurais

Ao contrário da abordagem convencional de programação, onde dizemos a um computador o que deve ser feito ao dividir um problema em pequenas tarefas para que ele execute, uma Rede Neural (do inglês *Neural Network*) utiliza dados

Figura 4 – Ilustração das camadas de um modelo de Aprendizado Profundo.

Fonte: Adaptado de Goodfellow, Bengio e Courville (2016).

Figura 5 – Comparação entre os modelos Aprendizado de Máquina e Aprendizado Profundo.

Fonte: Adaptado de Robins (2020).

observacionais para aprender como resolver o problema (NIELSEN, 2018).

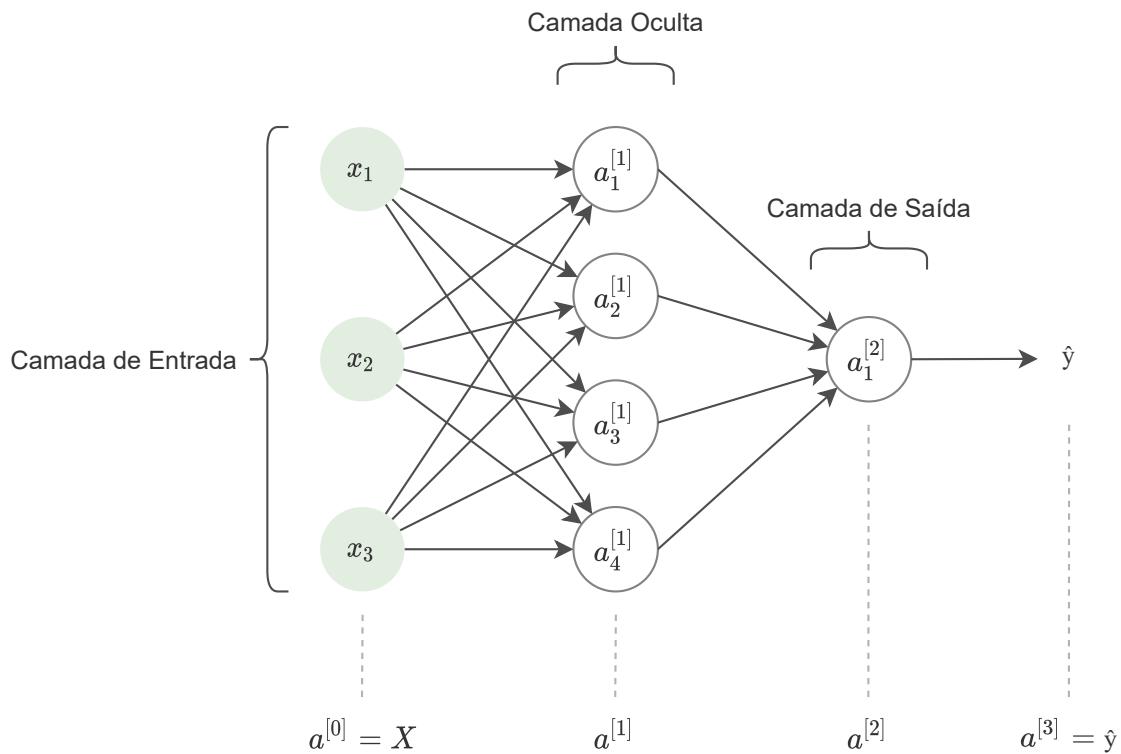
Walczak e Cerpa (2003) define Redes Neurais Artificiais como modelos que “simulam a atividade elétrica do cérebro e do sistema nervoso”. Porém enquanto alguns tipos de redes neurais tem sido utilizadas para entender o funcionamento do cérebro, na perspectiva de Aprendizado Profundo elas não são projetadas para serem modelos

realistas da função biológica (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

2.2.1 Estrutura de Uma Rede Neural

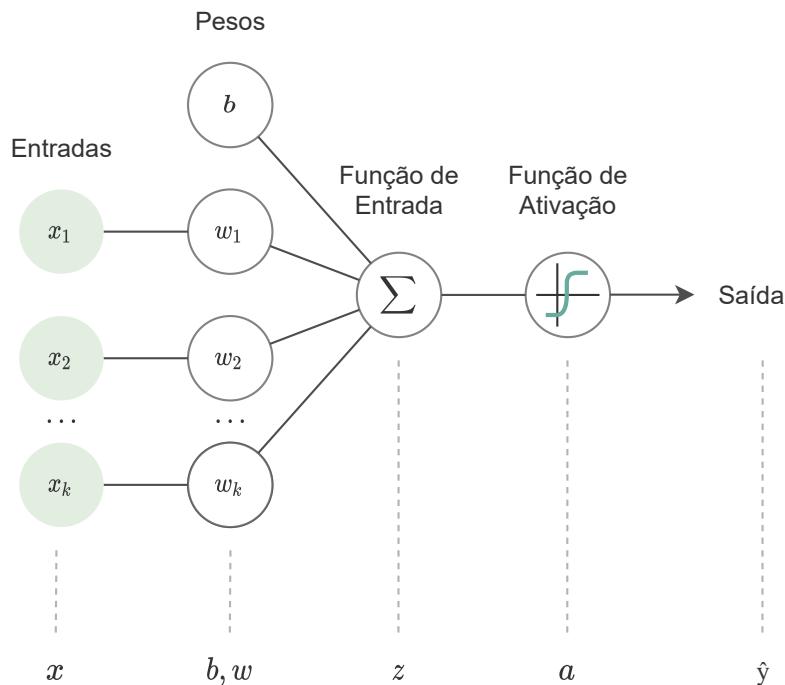
Uma Rede Neural é composta por camadas de nós, conhecidos como neurônios, e conexões que interligam as saídas e entradas desses nós. A estrutura básica de uma Rede Neural é ilustrada na Figura 6, onde a primeira camada de neurônios é a camada de entrada, a última camada é a camada de saída e as camadas entre elas são chamadas de camadas ocultas. Na Figura 6, vetor X contém os valores de entrada, os vetores $a^{[l]}$ representam as funções de ativação referentes à l -ésima camada, e \hat{y} é o vetor de saída com os valores preditos. As notações utilizadas nesse capítulo respeitam as propostas por Ng (2020) presentes no Apêndice A.

Figura 6 – Estrutura básica de uma Rede Neural com duas camadas.



Fonte: Elaboração própria (2021).

São nos neurônios que ocorrem as computações. A Figura 7 mostra um diagrama de um nó de uma Rede Neural, onde os pesos representados por b e w_k são responsáveis por atribuir significância às entradas com relação à tarefa que o algoritmo está tentando aprender (NICHOLSON, 2020). Esses produtos são então somados e passam por uma função de ativação.

Figura 7 – Diagrama de um Neurônio de uma Rede Neural.

Fonte: Adaptado de Nicholson (2020).

2.2.2 Funções de Ativação

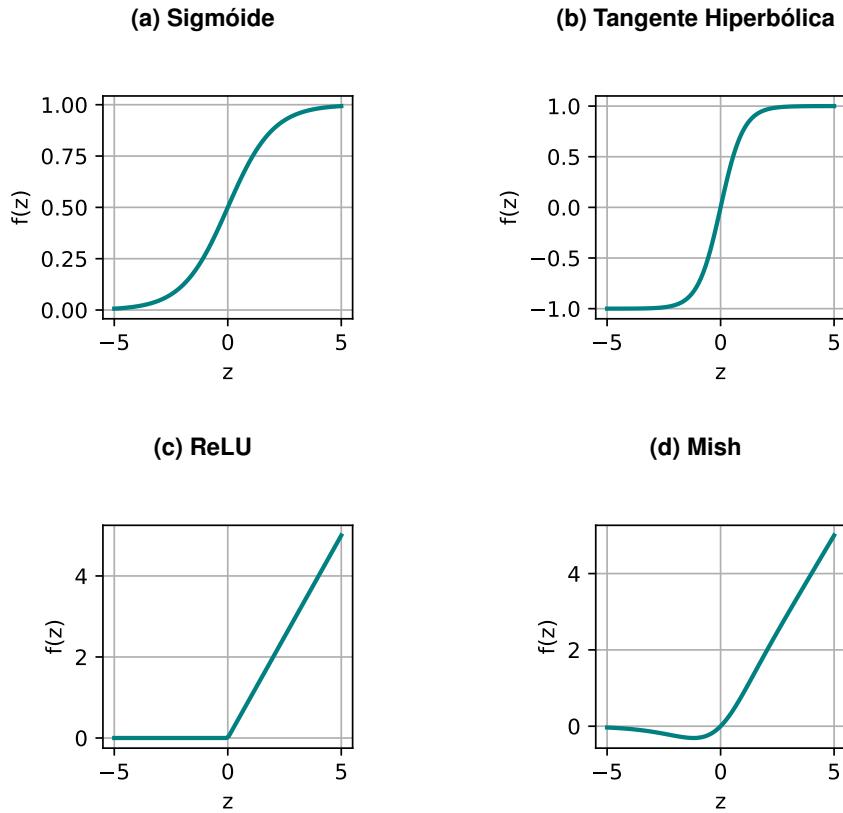
As funções de ativação desempenham um papel crucial na dinâmica de desempenho e treinamento em redes neurais (MISRA, 2019), determinando se um sinal deve progredir e em que medida ele deve progredir através da rede (NICHOLSON, 2020). Alguns exemplos de função de ativação estão na Figura 8.

A função Sigmoide definida pela Equação 2.1 Sharma (2017) é geralmente utilizada em classificações binárias, pois o resultado está sempre no intervalo entre zero e um (NG, 2020). A Figura 8a mostra um gráfico da função Sigmoide.

$$f(z) = \sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (2.1)$$

Para a otimização dos pesos durante o treinamento de uma rede neural, em geral é necessário calcular o gradiente das funções de ativação. Por isso, de acordo com Sharma (2017), o uso da tangente hiperbólica como função de ativação é preferível pois tem gradientes que não estão restritos a variar em uma certa direção e são mais acentuados quando comparado à sigmoide. A definição da tangente hiperbólica da

Figura 8 – Exemplos de funções de ativação de um neurônio para uma Rede Neural.



Fonte: Elaboração própria (2021).

Figura 8b está na Equação 2.2.

$$f(z) = \tanh(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}} \quad (2.2)$$

Porém, para valores muito grandes ou muito pequenos de z , a derivada resultante, utilizada no gradiente, tende a ser nula tanto para a sigmoide quanto para a tangente hiperbólica (NG, 2020) o que geralmente causa lentidão no treinamento (MISRA, 2019). Para que isso não ocorra, utiliza-se a função ReLU, do inglês *Rectified Linear Unit*, mostrada na Figura 8c e definida na Equação 2.3. A ReLU é a função de ativação mais utilizada (NG, 2020) e é a função padrão recomendada para uso com a maioria das redes neurais (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

$$f(z) = \text{ReLU}(z) = \max(0, z) \quad (2.3)$$

Com a evolução das Redes Neurais na última década, diversas funções de ativação vem sendo propostas com o objetivo de melhorar o desempenho do

treinamento. Um exemplo delas é a Mish (Figura 8d), proposta por Misra (2019) cuja função é definida pela Equação 2.4.

$$f(z) = z \cdot \tanh(\ln(1 + e^z)) \quad (2.4)$$

Segundo Misra (2019), ao contrário da ReLU, a função Mish é continuamente diferenciável, evitando efeitos colaterais indesejados quando utiliza-se a otimização baseada no método do gradiente.

2.2.3 Conjunto de Dados

Utiliza-se para o treinamento da Rede Neural um conjunto de dados, conhecido no inglês como *Dataset*. Geralmente, o conjunto de testes é dividido em três conjuntos menores: Treinamento, utilizado para o treinamento da rede neural; Teste, que é utilizado para saber até quando deve-se prosseguir com o treinamento; e o Conjunto de Validação, que é independente dos outros dois conjuntos (CROWTHER; COX, 2005).

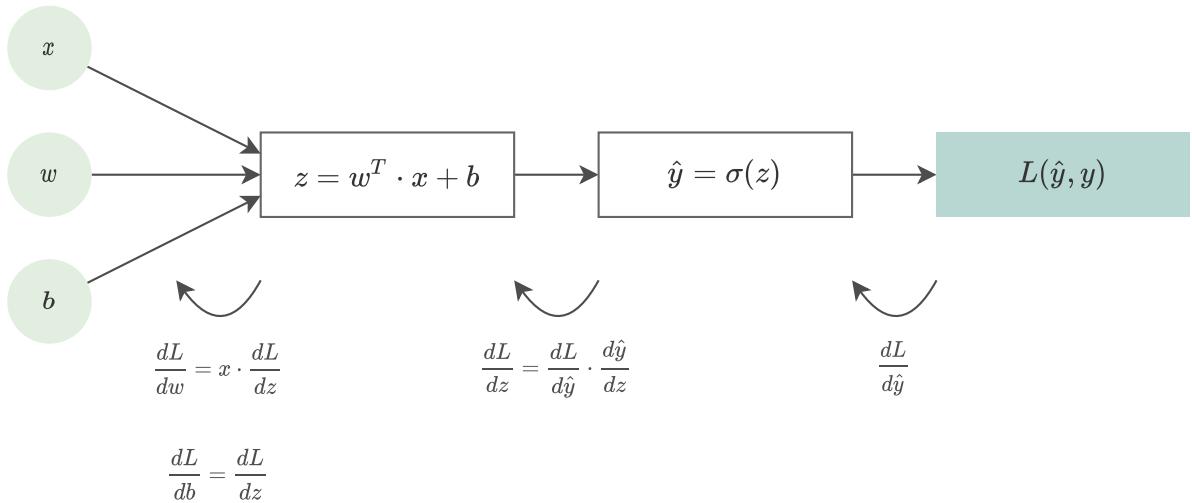
2.2.4 Treinamento de Uma Rede Neural

Para o treinamento de uma Rede Neural, utiliza-se um conjunto de exemplos de treinamento $\{(x^{(1)}, y^{(1)}), \dots, (x^{(m)}, y^{(m)})\}$, onde $x^{(i)}, y^{(i)}$ são, respectivamente, a entrada e a saída real do i -ésimo exemplo de treinamento de um conjunto contendo m exemplos de treinamento (NG, 2020). Para cada um desses exemplos, o objetivo é fazer o cálculo dos pesos w e b de forma que a saída estimada $\hat{y}^{(i)}$ seja próxima da saída real $y^{(i)}$.

O peso b é chamado de *bias* e não é multiplicado a nenhum valor da entrada para caso todos os valores de x sejam nulos, a saída $\hat{y}^{(i)}$ seja diferente de zero. O cálculo desses pesos é feito de forma iterativa e geralmente são iniciados de forma aleatória.

O processo de cálculo considerando um nó de uma rede neural está ilustrado na Figura 9, onde a função de ativação utilizada é a sigmoide e todos os valores calculados e os de entrada são representados na forma vetorial.

A primeira etapa a ser computada após a passagem das entradas pela função de ativação é função de perda, que mede quão boa é a saída prevista \hat{y} em comparação aos valores verdadeiros de y para apenas um conjunto de treinamento (NG, 2020).

Figura 9 – Estapas da atualização dos pesos de um nó em uma Rede Neural.

Fonte: Adaptado de Ng (2020).

Um exemplo de função de perda que compara \hat{y} com y pode ser definida pela Equação 2.5 (NG, 2020), onde o objetivo do treinamento é obter $L(y, \hat{y}) = 0$.

$$L(y, \hat{y}) = -(y \cdot \log(\hat{y}) + (1 - y) \cdot \log(1 - \hat{y})) \quad (2.5)$$

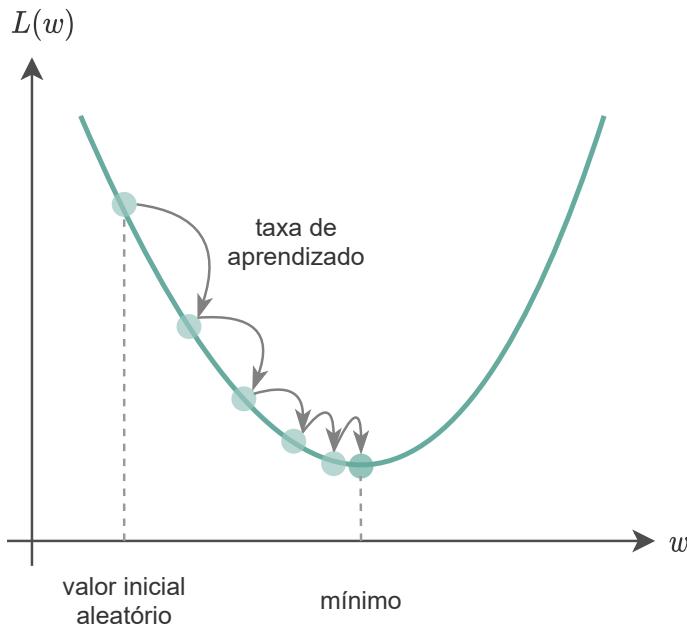
Dessa forma, como $\hat{y} = f(w, b)$, é necessário encontrar valores para os pesos w e b que minimizem a função de perda $L(y, \hat{y})$. Para isso, utiliza-se o método do gradiente, um algoritmo de primeira ordem iterativo utilizado em otimização para encontrar o mínimo local de uma função (YAN, 2021), exemplificado na Figura 10 para uma função de perda considerando apenas a variável w .

Após serem computadas as derivadas da Figura 9, os pesos w e b são atualizados conforme a Equação 2.6 e a Equação 2.7 onde α representa uma taxa de aprendizado (NG, 2020).

$$w = w - \alpha \cdot \frac{dL}{dw} \quad (2.6)$$

$$b = b - \alpha \cdot \frac{dL}{db} \quad (2.7)$$

A atualização desses pesos é feita até que a função de perda resulte valores muito próximos de zero ou quando o erro está dentro de uma faixa aceitável de acordo com a métrica de avaliação utilizada.

Figura 10 – Método do gradiente para uma variável.

Fonte: Adaptado de Sauer (2020).

2.2.5 Métricas de Avaliação

Determinar os objetivos de treinamento em uma rede neural em termos de qual métrica de erro será utilizada é uma etapa necessária, já que para a maioria das aplicações é impossível obter erro zero absoluto. (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

2.2.5.1 Matriz de Confusão

A Matriz de Confusão é uma técnica muito popular usada em problemas de classificação binária, representando a contagem dos resultados da predição feitos pela rede neural em comparação com os valores reais (KULKARNI; CHONG; BATARSEH, 2020), na forma de verdadeiros positivo, verdadeiros negativo, falsos positivo e falsos negativo. Um exemplo de matriz de confusão utilizada em classificações binárias está na Figura 11.

2.2.5.2 Acurácia

Uma das métricas mais comuns utilizadas durante a classificação é a Acurácia (KULKARNI; CHONG; BATARSEH, 2020), que pode ser calculada a partir da matriz de confusão utilizando a Equação 2.8, definida pela razão entre o número de previsões

Figura 11 – Matriz de Confusão para classificação binária.

		Classe Prevista	
		A	B
Classe Observada	A	Verdadeiros Negativos (VN)	Falsos Positivos (FP)
	B	Falsos Negativos (FN)	Verdadeiros Positivos (VP)

Fonte: Adaptado de Kulkarni, Chong e Batarseh (2020).

corretas e o número total de previsões.

$$\text{Acurácia} = \frac{VN + VP}{VN + FP + FN + VP} \quad (2.8)$$

A Acurácia pode causar uma impressão incorreta se utilizada como métrica no treinamento de um conjunto de dados desequilibrados, portanto outros métodos baseados na matriz de confusão podem ser utilizados (KULKARNI; CHONG; BATARSEH, 2020), como os métodos de Precisão e Sensibilidade.

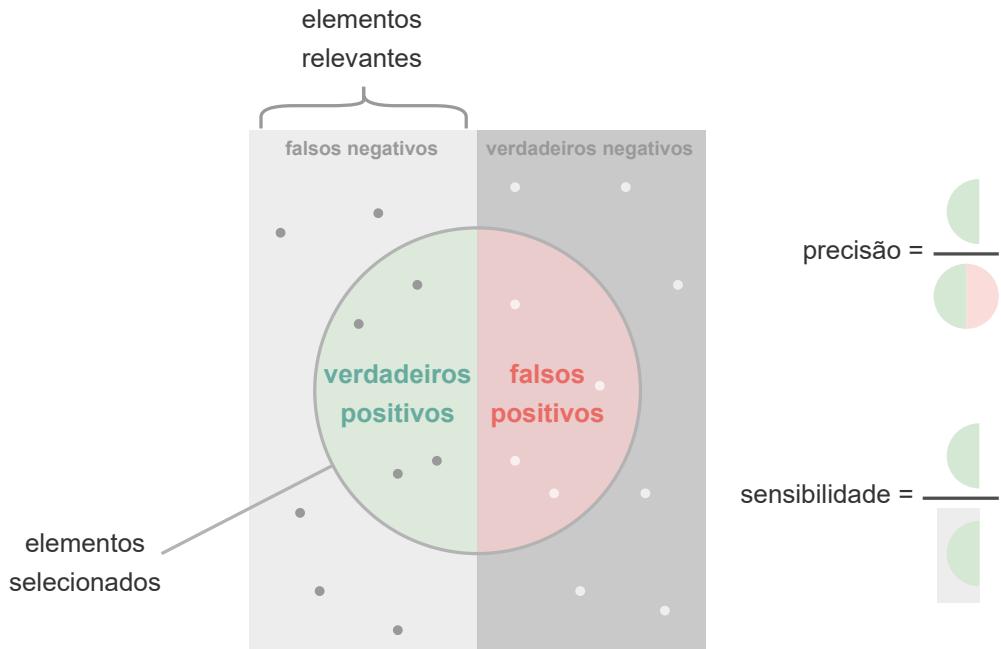
2.2.5.3 Precisão e Sensibilidade

A medida de Precisão (do inglês *Precision*), definida pela Equação 2.9, representa a fração de detecções feitas de forma correta; enquanto a Sensibilidade, conhecida do inglês como *Sensitivity* ou *Recall*, representa apenas a fração das previsões verdadeiras (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016), como mostra a Equação 2.10. Ambas métricas fornecem informações importantes a respeito do treinamento, porém o objetivo é melhorar a Sensibilidade sem que a Precisão seja afetada (CHAWLA, 2005 apud KULKARNI; CHONG; BATARSEH, 2020). Uma ilustração das medidas de Precisão e Sensibilidade está na Figura 12.

$$\text{Precisão} = \frac{VP}{VP + FP} \quad (2.9)$$

$$\text{Sensibilidade} = \frac{VP}{VP + FN} \quad (2.10)$$

Figura 12 – Ilustração das medidas de Precisão e Sensibilidade.



Fonte: Adaptado de Tan (2019).

Uma curva de Precisão em função da Sensibilidade pode ser construída ao variar o *threshold* da probabilidade de um resultado pertencer a determinada classe (STEEN, 2020). Um exemplo dessa curva está na Figura 13, onde o eixo horizontal indica a Sensibilidade e o eixo vertical, a Precisão para quatro classes distintas.

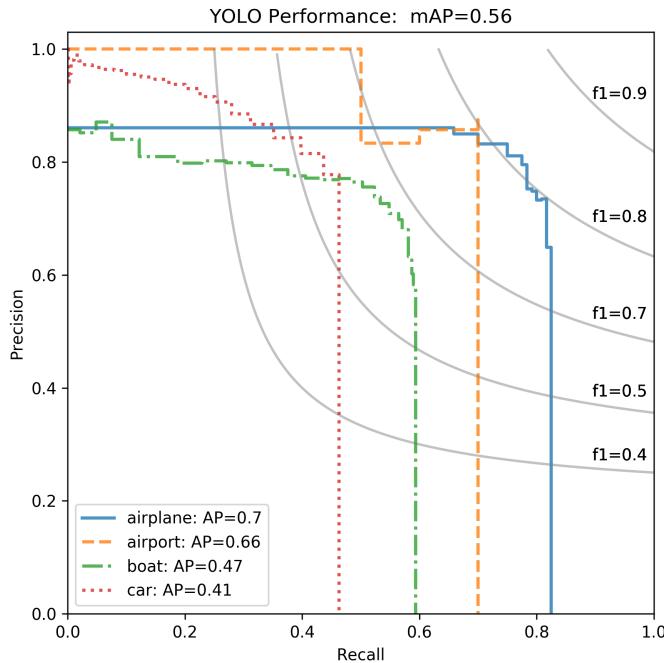
2.2.5.4 Precisão Média

O valor da Precisão Média de cada classe, do inglês Average Precision (AP), é encontrado ao calcular a área sob a curva da Precisão em função da Sensibilidade. Já a média desses valores, conhecida no inglês como Mean Average Precision (mAP) é feita como maneira de avaliar um conjunto de treino completo, levando em conta todas as classes treinadas (TAN, 2019).

2.2.5.5 F-Score

A medida de *F-Score* procura encontrar o equilíbrio entre a Precisão e a Sensibilidade (MISHRA, 2018) e é feita por meio de uma média harmônica ponderada entre essas medidas (KULKARNI; CHONG; BATARSEH, 2020), conforme a Equação 2.11. O resultado está sempre dentro do intervalo entre zero e um e quanto maior o valor de

Figura 13 – Curva da Precisão em função da Sensibilidade para quatro classes distintas.



Fonte: Etten (2018).

F-Score, melhor é a performance do modelo (MISHRA, 2018).

$$F - \text{Score} = 2 \cdot \frac{\text{Precisão} \cdot \text{Sensibilidade}}{\text{Precisão} + \text{Sensibilidade}} \quad (2.11)$$

2.2.5.6 Intersecção sobre União

Para avaliar o treinamento da rede neural para detecção de objetos e encontrar os valores das métricas baseadas na matriz de confusão, utiliza-se o conceito de Intersecção sobre União.

A Intersecção sobre União, do inglês *Intersection over Union* (IoU), também conhecida como índice de Jaccard, é a métrica mais usada para comparar a similaridade entre duas formas arbitrárias (REZATOFIGHI et al., 2019). De forma geral, o IoU pode ser calculado pela Equação 2.12 (REZATOFIGHI et al., 2019), onde a área das formas arbitrárias são representadas pelas letras A e B.

$$\text{IoU} = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (2.12)$$

No caso da detecção de objetos em imagens, as formas utilizadas são as caixas delimitadoras desenhadas ao redor dos objetos na imagem, de forma que a IoU é calculada por meio da comparação entre a caixa delimitadora detectada pela rede neural e a localização real do objeto, como ilustra a Figura 14.

Figura 14 – Exemplo de caixa delimitadora prevista por uma rede neural em comparação com a localização real do objeto para o cálculo da IoU.



Fonte: Adaptado de Sivarajkumar (2019).

As métricas de AP e mAP discutidas na subseção 2.2.5.4 são obtidas variando a IoU para cada classe em um conjunto de imagens treinadas, onde uma detecção é considerada como um verdadeiro positivo se a IoU é maior que certo limiar (SIVARAJKUMAR, 2019) .

2.2.6 Redes Neurais Convolucionais

Redes Neurais Profundas são caracterizadas por sua grande quantidade de camadas ocultas. Cada uma das camadas é responsável pelo treinamento de um conjunto distinto de dados com base na saída da camada anterior, de forma que quanto mais há avanço pela rede neural, mais complexos são as características que os nós podem reconhecer (NICHOLSON, 2020), como ilustrado na Figura 4.

Redes Neurais Convolucionais, do inglês *convolutional neural networks* (CNN), são um tipo de rede neural profunda, originalmente projetadas para análise de imagens (ZHU et al., 2018) e tem sido empregadas para esse tipo de processamento desde 1995 (YAN, 2021). O uso de CNNs reduz os requisitos de memória e possui uma melhor eficiência estática quando comparada a redes neurais tradicionais (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

CNNs sempre contém dois tipos de operações básicas: as operações de convolução e *pooling* (ZHU et al., 2018), além de utilizarem funções de ativação. Os

componentes de uma CNN típica estão ilustrados na Figura 15.

Figura 15 – Componentes de uma Rede Neural Convolucional típica.



Fonte: Adaptado de Goodfellow, Bengio e Courville (2016).

2.2.6.1 Operação de Convolução

Convolução é uma operação matemática onde duas funções produzem uma terceira função que expressa como o formato de uma é modificado ou filtrado pela outra (YAN, 2021). A operação de convolução em uma rede neural utiliza múltiplos tipos de *kernel* para extrair as características do conjunto de dados da entrada (ZHU et al., 2018), geralmente uma imagem, e cria mapas de características a partir dela (GHOLAMALINEZHAD; KHOSRAVI, 2020). O *kernel* usualmente é um vetor de parâmetros multidimensional que é adaptado pelo algoritmo de aprendizado (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016), assim como ocorre a atualização dos pesos w e b vistos na subseção 2.2.4.

Na sua forma discreta, a operação de convolução pode ser definida pela Equação 2.13 (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016), onde x representa a entrada e w representa o *kernel* utilizado.

$$y[n] = (x * w)[n] = \sum_{a=-\infty}^{\infty} x[a] \cdot w[n-a] \quad (2.13)$$

Para imagens, as convoluções ocorrem em mais que um eixo ao mesmo tempo. Se a entrada é uma imagem bidimensional I , o *kernel* K provavelmente também será bidimensional, como define a Equação 2.14 (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

$$Y[i, j] = (I * K)[i, j] = \sum_m \sum_n I[m, n] \cdot K[i - m, j - n] \quad (2.14)$$

Porém, utilizando a propriedade comutativa da convolução ao inverter a ordem dos fatores I e K , a implementação se torna mais direta, já que há menos variação no intervalo válido de valores de m e n (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016), pois o *kernel* é menor. Além disso, para desinverter o *kernel* em relação à imagem, utiliza-se a operação chamada correlação cruzada (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016), como mostra a Equação 2.15.

$$Y[i, j] = (I * K)[i, j] = \sum_m \sum_n I[i + m, j + n] \cdot K[m, n] \quad (2.15)$$

Um exemplo de uma convolução descrita pela Equação 2.15 utilizando um *kernel* de 2 x 2 está na figura Figura 16.

Exemplos de convolução em imagem utilizando distintos tipos de *kernel* está na Figura 17.

2.2.6.2 Operação de Pooling

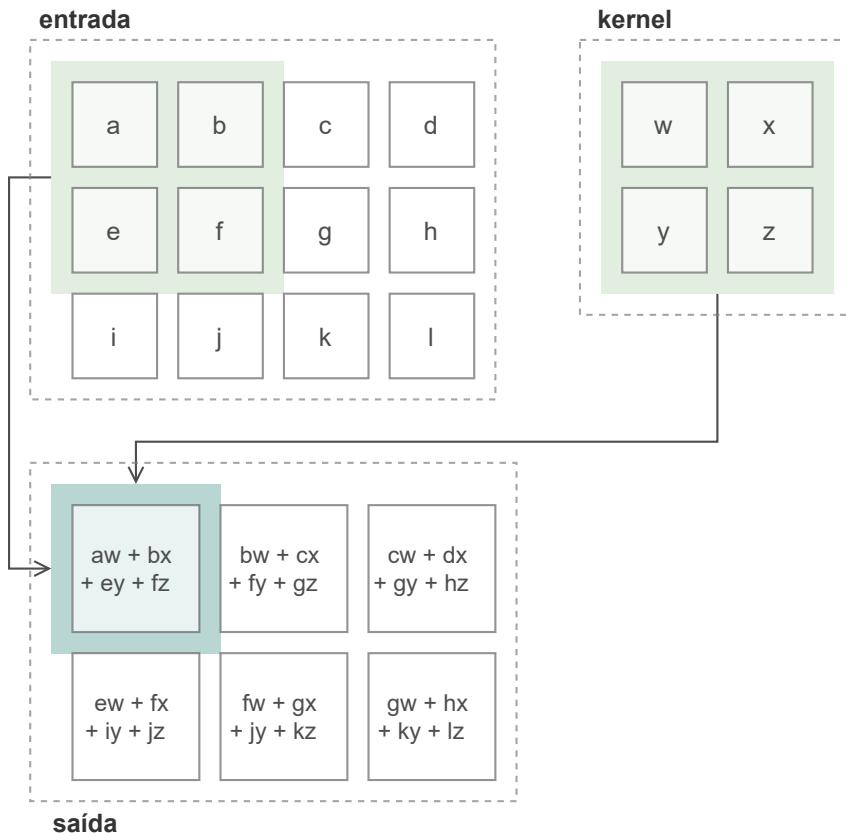
As operações de *pooling* geralmente são utilizadas após as camadas de convolução para simplificar as informações das saídas dessas camadas (NIELSEN, 2018) ao reduzir o tamanho do mapa de características (GHOLAMALINEZHAD; KHOSRAVI, 2020) e ajudam a tornar as saídas aproximadamente invariantes a pequenas modificações da entrada (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016).

Espera-se que uma camada de *pooling* ideal extraia somente as informações úteis e descarte detalhes irrelevantes (GHOLAMALINEZHAD; KHOSRAVI, 2020). A Figura 18 apresenta algumas das funções de *pooling*. A operação de *Max-Pooling* seleciona o pixel com maior valor dentre os pixels de uma região (Figura 18b) e a operação de *Pooling* médio (Figura 18a) faz a média entre esses pixels.

2.2.6.3 You Only Look Once

You Only Look Once (YOLO), cuja tradução direta do inglês é “você olha apenas uma vez”, é uma rede neural de passagem única (YAN, 2021) onde, ao contrário

Figura 16 – Exemplo de convolução entre dois vetores bidimensionais.



Fonte: Adaptado de Goodfellow, Bengio e Courville (2016).

de outras abordagens, uma única rede neural é aplicada na imagem para fazer a localização e a detecção do objeto, dividindo a imagem em regiões menores e fazendo a previsão e a probabilidade da detecção para cada uma das regiões (REDMON; FARHADI, 2018).

A rede neural YOLO possui 24 camadas convolucionais seguidas por duas camadas totalmente conectadas (YAN, 2021). A arquitetura básica da primeira versão está na Figura 19.

Atualmente, a rede neural YOLO está na versão 4, apresentando otimização em funções de ativação (utilizando a função Mish da Figura 8d para algumas camadas), processamento dos dados, treinamento, funções de perda, etc, em comparação com a versão anterior (WANG et al., 2021).

Uma comparação de desempenho com outras redes neurais utilizadas para detecção de objetos em tempo real está no gráfico da Figura 20, que avalia a precisão média em função da quantidade de *frames* por segundo que a rede consegue processar, utilizando o *dataset Microsoft COCO: Common Objects in Context* (LIN et al., 2014).

Figura 17 – Operações de convolução em uma imagem.

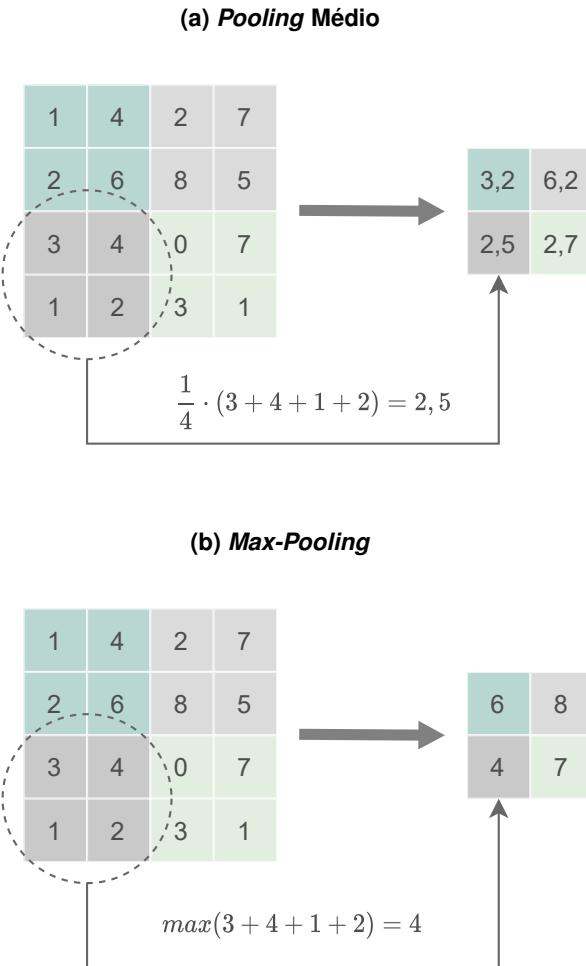
Operação	Kernel	Imagen Resultante
identidade	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	
detecção de borda	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$	

Fonte: Adaptado de Albawi, Mohammed e Al-Zawi (2017).

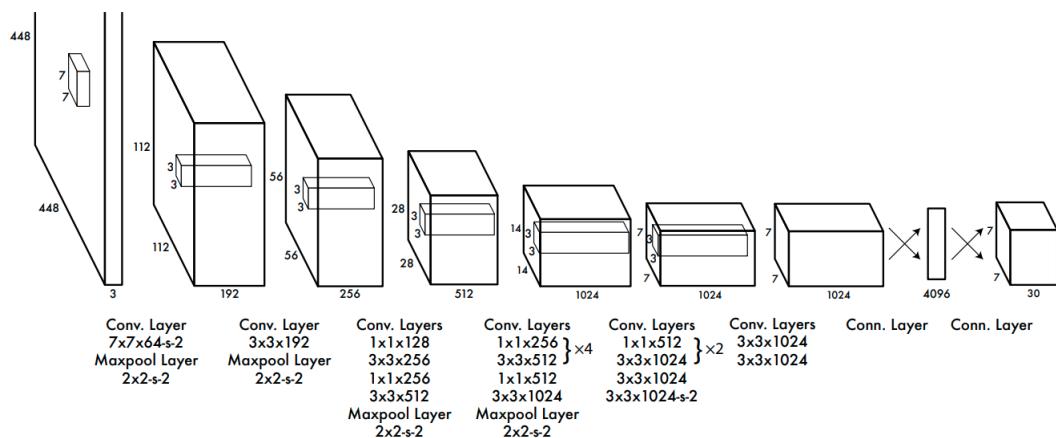
A YOLO divide a imagem em imagens menores no formato de uma grade, e para cada uma dessas divisões, são previstas caixas delimitadoras, com suas confianças e probabilidades (REDMON et al., 2015). A maioria dessas divisões não contém um objeto detectado e a filtragem é feita com base na probabilidade da classe do objeto, onde apenas as caixas delimitadoras de maior probabilidade permanecerão (SIVARAJKUMAR, 2019). Esse processo é ilustrado na Figura 21.

A camada final é responsável por prever as probabilidades das classes treinadas e as coordenadas das caixas delimitadoras (REDMON et al., 2015). Tanto a largura e a altura das caixas delimitadoras quanto as coordenadas x e y são normalizadas pela altura e largura da imagem, de modo que os valores fique dentro do intervalo entre zero e um (REDMON et al., 2015).

Para o treinamento, são necessárias algumas configurações de arquivos, além da adição das imagens do *dataset* utilizado, a partir do *download* do repositório do projeto disponibilizado por Bochkovskiy (2020). As instruções a serem seguidas,

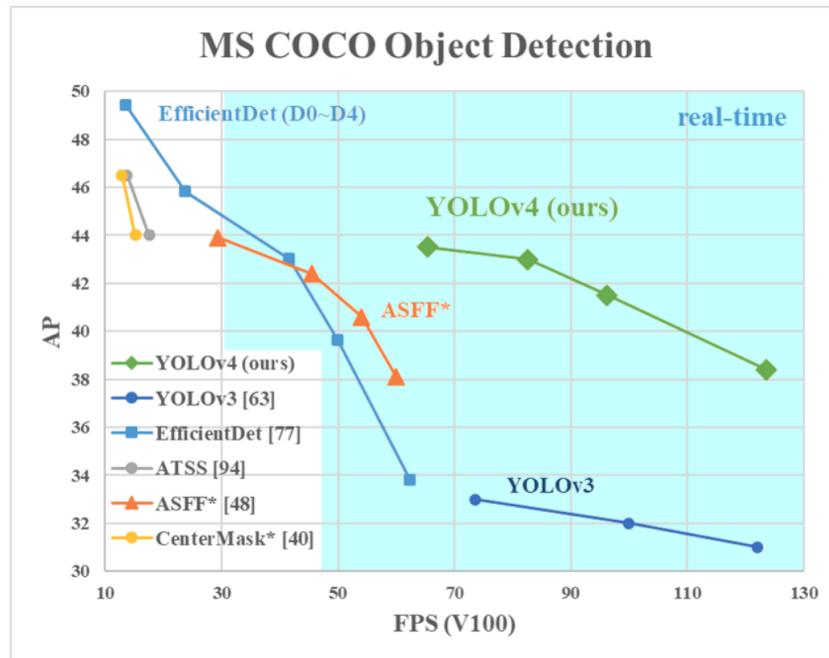
Figura 18 – Exemplos de funções utilizadas para operação de pooling.

Fonte: Adaptado de Gholamalinezhad e Khosravi (2020).

Figura 19 – Arquitetura da Rede Neural YOLO.

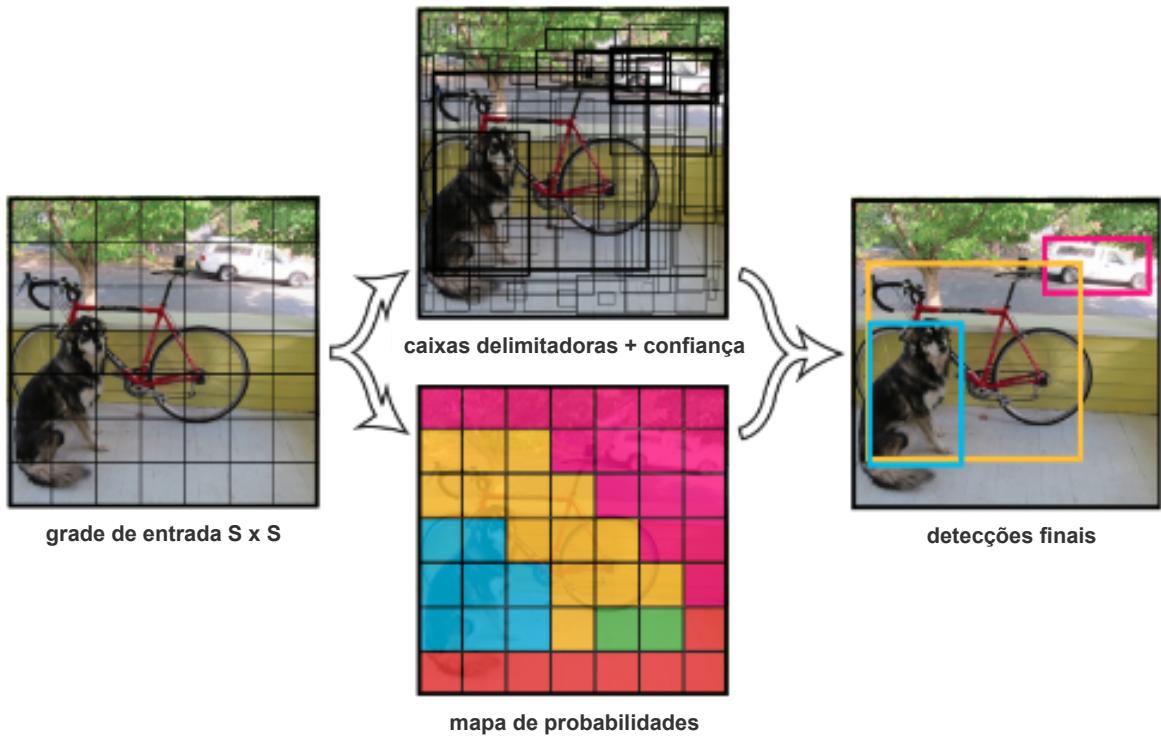
Fonte: Redmon et al. (2015).

Figura 20 – Comparação da precisão média em função do processamento em frames por segundo para diferentes redes neurais utilizadas em detecção de objetos.



Fonte: Bochkovskiy, Wang e Liao (2020).

Figura 21 – Processo de detecção e classificação na rede neural YOLO.



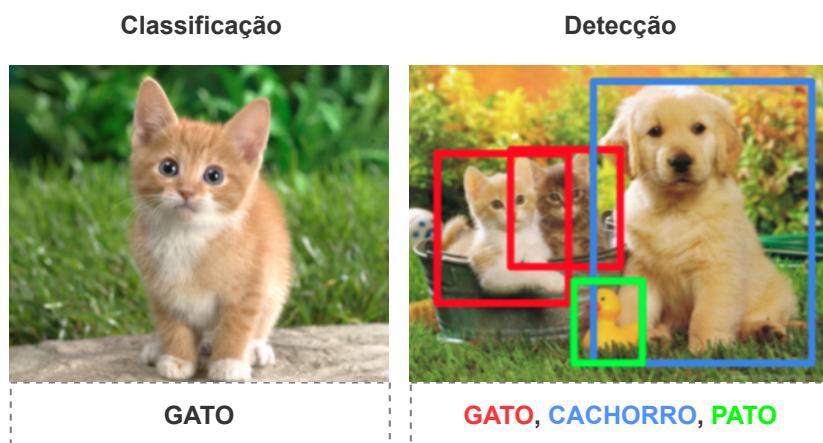
Fonte: Adaptado de Redmon et al. (2015).

conforme Bochkovskiy (2020), estão no Apêndice B.

2.3 Classificação e Detecção de Defeitos em Placas de Circuito Impresso

A classificação e detecção de um objeto em uma imagem são duas tarefas distintas. Segundo Chen et al. (2015), “a tarefa de classificação de objetos visa prever a existência de objetos dentro das imagens, enquanto a tarefa de detecção de objetos visa localizar os objetos”, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Diferença entre as tarefas de classificação e detecção de objetos em uma imagem.



Fonte: Adaptado de Sivarajkumar (2019).

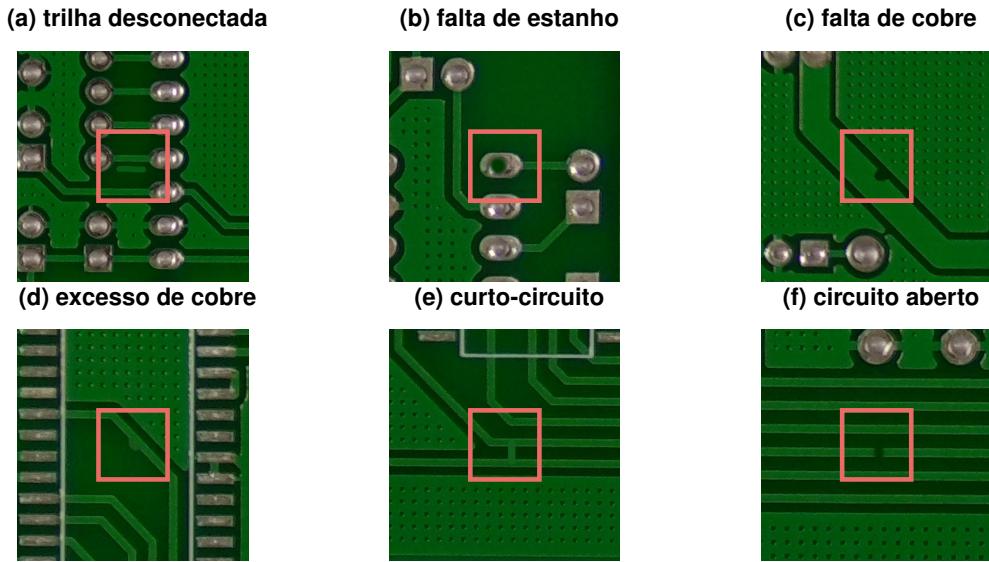
Considerando Placas de Circuito Impresso (PCIs), os defeitos da etapa de fabricação são localizados e detectados antes da etapa de soldagem dos componentes. Esses defeitos podem ser classificados como circuito aberto, curto-circuito, falta de cobre, cobre excessivo, trilha desconectada e falta de estanho (DING et al., 2019), conforme a Figura 23.

2.3.1 Métodos Automatizados de Extração de Defeitos

Assim como os componentes eletrônicos utilizados em PCIs estão ficando cada vez menores, as placas de circuito impresso também estão diminuindo e se tornando mais delicadas e sofisticadas (HU; WANG, 2020). Dessa forma, utilizar técnicas automatizadas para detecção e classificação dos defeitos em PCIs é indispensável, já que a inspeção humana além de imprecisa, está associada também à subjetividade, fadiga, lentidão e alto custo (LETA; FELICIANO; MARTINS, 2008).

Diversos métodos de detecção e classificação de defeitos em PCIs vêm sendo utilizados nas últimas décadas, podendo ser classificados como métodos comparativos, não-referenciais e híbridos (MOGANTI et al., 1996 apud DING et al., 2019).

Figura 23 – Tipos de defeito de fabricação em placas de circuito impresso.



Fonte: Adaptado de Huang et al. (2020).

2.3.1.1 *Métodos Comparativos*

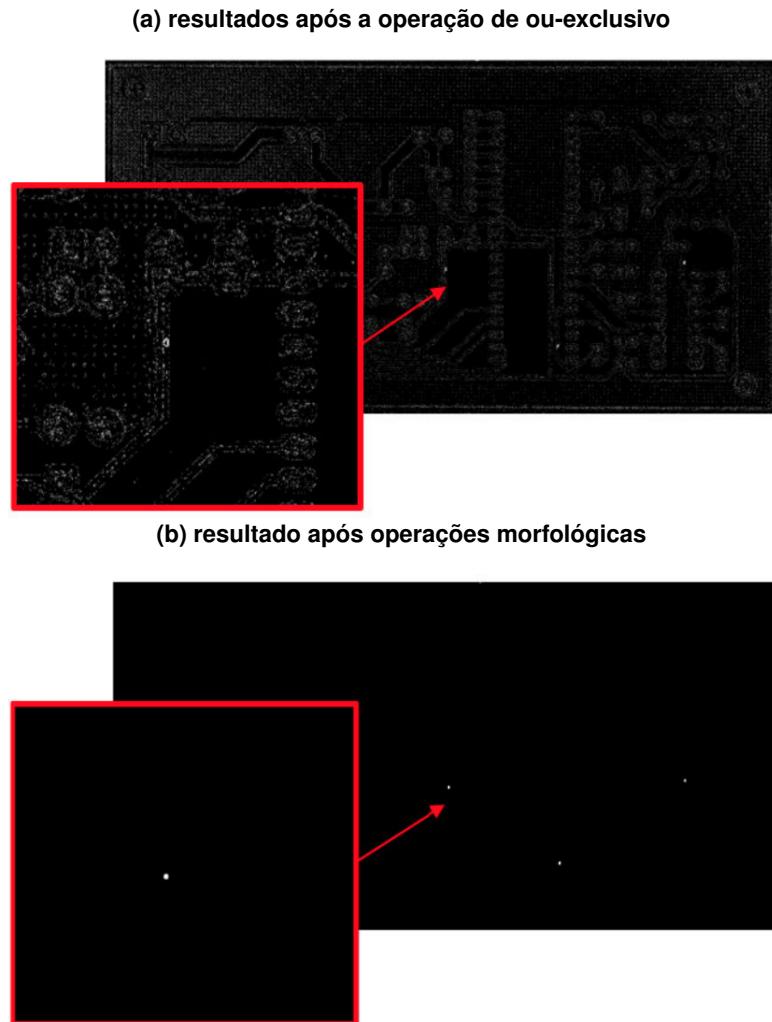
Os métodos comparativos de detecção, também conhecidos como métodos referenciais, utilizam uma imagem de referência para extrair os objetos da imagem a ser testada.

Uma das formas de fazer a extração dos defeitos é utilizando a operação lógica de ou-exclusivo (XOR) entre as duas imagens binarizadas, de forma que se o pixel da imagem a ser testada corresponde com o pixel da imagem de referência, o resultado será um, do contrário, o resultado será zero (HUANG et al., 2020).

A grande dificuldade da operação XOR é determinar o alinhamento preciso entre as duas imagens (DING et al., 2019), além de que ruídos externos podem mascarar os defeitos. Huang et al. (2020) propõe o uso de algoritmos de registro de imagem para corrigir o desalinhamento entre as imagens. Esses algoritmos extraem as características de ambas imagens, calculando uma matriz de transformação que rotacionará a imagem teste deixando na mesma orientação da imagem de referência (HUANG et al., 2020). Já para remover os ruídos externos, é proposto por Huang et al. (2020) a utilização de operações morfológicas, tais como filtros medianos e operações morfológicas de fechamento e abertura. Essas operações são feitas após a operação de XOR, e uma comparação entre o resultado antes e depois das operações morfológicas está na Figura 24.

No entanto, de acordo com Ding et al. (2019), obter uma imagem de referência totalmente sem defeitos em um ambiente de produção é considerado fora da realidade, além de que problemas críticos de desalinhamento, variação de cor, variação de luz, e outras variações, tornam essa tarefa ainda mais custosa.

Figura 24 – Extração de defeitos em placas de circuito impresso utilizando métodos comparativos.



Fonte: Huang et al. (2020).

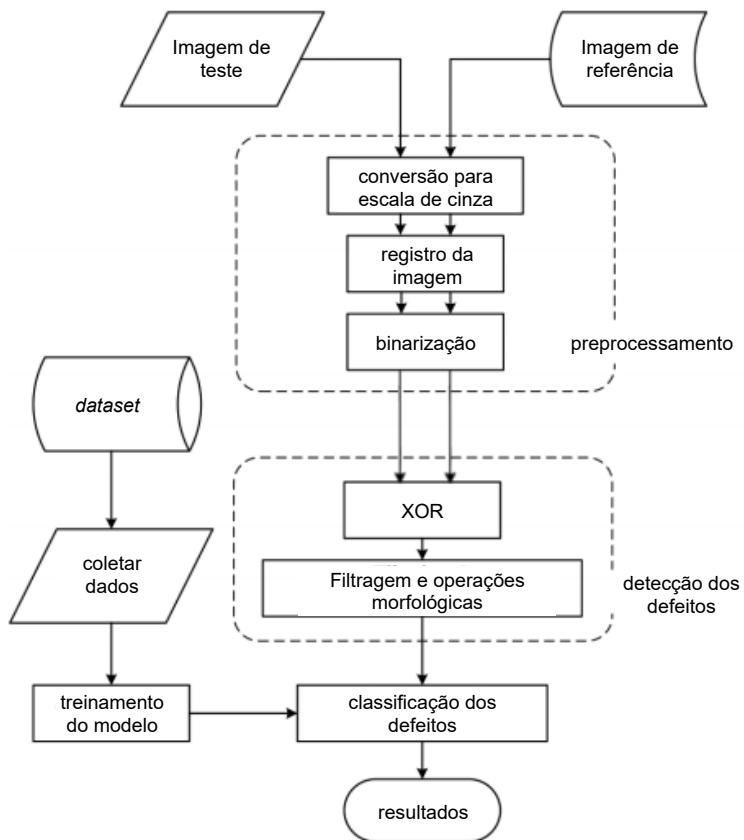
2.3.1.2 *Métodos Não-Referenciais*

De acordo com Ding et al. (2019), os métodos não-referenciais para detecção e classificação de defeitos são baseados na verificação de regras gerais de projeto e, nos últimos anos, o uso de redes neurais profundas tem sido empregadas nessa tarefa. Contudo, conforme Tang et al. (2019), usar redes neurais para essa aplicação implica em encontrar um equilíbrio entre eficiência e a alta precisão, já que detecções mais precisas requerem modelos de redes neurais mais profundas para obter características de mais alto nível e detecções mais eficientes precisam de modelos menos profundos para processamentos mais rápidos.

2.3.1.3 Métodos Híbridos

Os métodos híbridos combinam os métodos comparativo e não-referencial para a detecção e classificação de defeitos. Um exemplo para a aplicação de detecção e classificação de defeitos é a abordagem RBCNN proposta por Huang et al. (2020), onde os defeitos são inicialmente localizados utilizando métodos comparativos e posteriormente, redes neurais convolucionais são utilizadas para a classificação, conforme o fluxograma da Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma das etapas para classificação e detecção de defeitos utilizadas na abordagem híbrida RBCNN.



Fonte: Adaptado de Huang et al. (2020).

2.4 Frameworks e Bibliotecas para Detecção e Classificação de Objetos

Frameworks e Bibliotecas são códigos utilizados para resolver problemas comuns, evitando a criação de códigos repetidos. Uma biblioteca é responsável por oferecer um conjunto de funcionalidades prontas para o uso, enquanto frameworks são um conjunto de bibliotecas que não fornecem apenas funcionalidades, mas também a arquitetura para o desenvolvimento (TAMENAOUL, 2020).

2.4.1 Darknet

Darknet é um *framework* de código aberto para redes neurais escrito em C e CUDA, com fácil instalação e suporte a computação em CPU e GPU (REDMON, 2016).

2.4.2 Flask

3 TREINAMENTO DA REDE NEURAL PARA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DEFEITOS EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Nesse capítulo serão discutidas a escolha e as etapas de preparação do *dataset* para o treinamento, detalhes de configurações da rede neural utilizada e os resultados obtidos.

3.1 Seleção da Rede Neural e do *Framework* para o Treinamento

Defeitos em placas de circuito impresso ocupam pequenas regiões da PCI, de forma que a proporção entre a área do objeto a ser detectado e a imagem inteira é muito pequena. Sendo assim, a escolha da rede neural deve considerar um bom desempenho para detecção de pequenos objetos. Segundo Redmon e Farhadi (2018), a partir da versão três, a YOLO apresentou uma melhor performance para esse tipo de detecção, sendo recomendada para essa aplicação por Valenti et al. (2020), quando o tempo de treinamento não é tão relevante. Já a versão quatro da YOLO apresenta melhor desempenho para o treinamento em GPUs quando comparada a sua versão anterior.

Sendo assim, a rede neural escolhida para o treinamento da detecção de defeitos em PCIs foi a YOLO em sua quarta versão, proposta por Bochkovskiy, Wang e Liao (2020) em conjunto com *framework* Darknet, que possui funções de cálculo das métricas de avaliação, desenho das caixas delimitadoras, entre outras.

3.2 Seleção do Conjunto de Dados

Para a detecção e classificação de objetos, o conjunto de dados escolhido deve incluir além das imagens, a localização e classificação dos objetos de interesse. O *Dataset* escolhido para a detecção e localização de defeitos em PCIs é o *HRIPCB: a challenging dataset for PCB defects detection and classification*, proposto por Huang et al. (2020).

As imagens das placas são capturadas por uma câmera do tipo industrial com dezesseis megapixel de resolução equipada com um sensor C-MOS (HUANG et al., 2020). Após a captura e ajustes, seis tipos de defeitos são adicionados manualmente em um *software* de edição de imagens, onde cada imagem contém de dois a seis defeitos da mesma categoria em diferentes lugares da placa (HUANG et al., 2020). A distribuição dos defeitos está na Tabela 1.

Para cada uma das imagens, existe um arquivo com extensão *.xml* que mapeia as informações das caixas delimitadoras de cada defeito. Um exemplo desse arquivo está no Apêndice C. As anotações do HRIPCB não estão normalizadas e são mapeadas em coordenadas cartesianas em pixels x_{min} , x_{max} , que variam entre zero e a

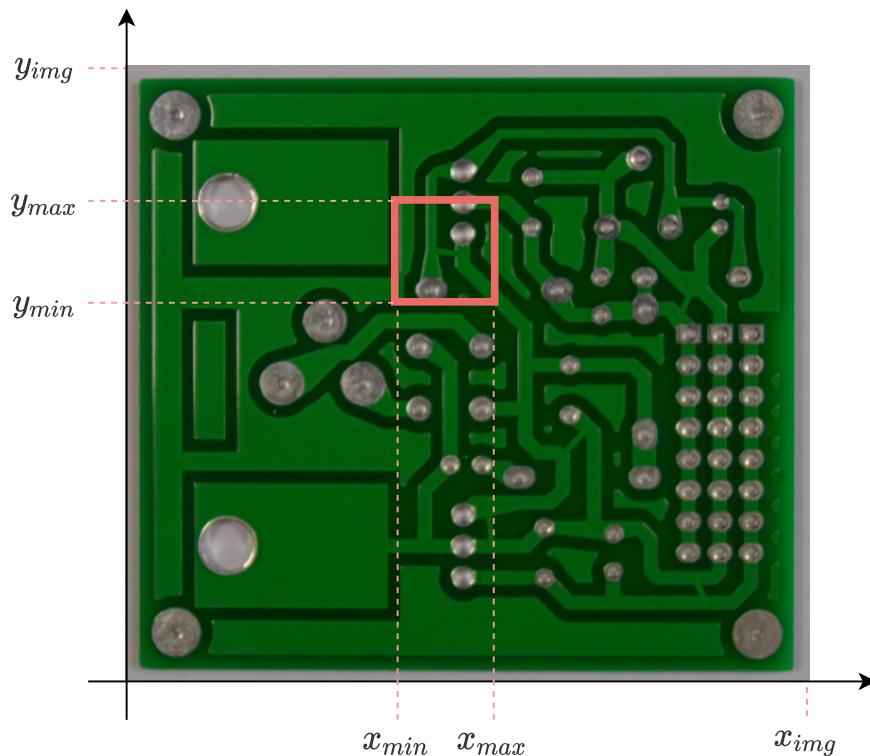
Tabela 1 – Distribuição dos defeitos no conjunto de dados HRIPCB.

Tipo do Defeito	Número de Imagens	Quantidade Total de Defeitos
Falta de Estanho	115	497
Falta de Cobre	115	492
Circuito Aberto	116	482
Curto-Circuito	116	491
Excesso de Cobre	115	488
Trilha Desconectada	116	503

Fonte: Huang et al. (2020).

largura da imagem e y_{min} , y_{max} , que variam entre zero e a altura da imagem, conforme a Figura 26.

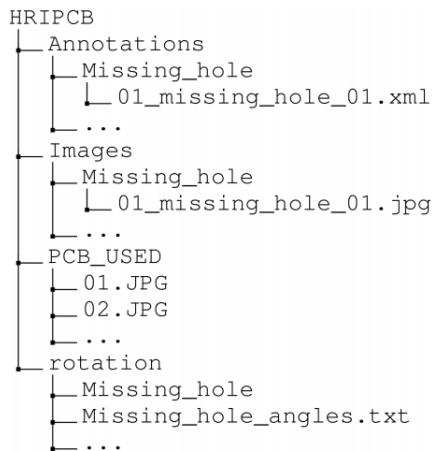
Figura 26 – Anotações das caixas delimitadoras do dataset HRIPCB.



Fonte: Adaptado de Huang et al. (2020).

A estrutura de arquivos do *dataset* está na Figura 27. Os arquivos dentro da pasta *rotation* não foram utilizados já que não possuem as delimitações dos defeitos em arquivos de anotação.

Figura 27 – Estrutura de arquivos do dataset HRIPCB.



Fonte: Huang et al. (2020).

3.3 Configuração dos Arquivos para o Treinamento

Para o treinamento, é necessário que os arquivos do *dataset* escolhido estejam de acordo com o padrão utilizado pela YOLO e as imagens estejam separadas nos subconjuntos de teste e treinamento.

Os arquivos de anotação do *dataset* HRIPC foram convertidos de *.xml* para *.txt* utilizando o textitscript em Python que está no Apêndice D. Esse *script* percorre as pastas de anotação de cada defeito (Figura 27), abrindo os arquivos *.xml*, convertendo os dados conforme o padrão necessário para o treinamento e salvando esses dados em um arquivo de texto.

A conversão segue as Equações 3.1 e 3.2 para as coordenadas centrais x_{center} e y_{center} das caixas delimitadoras e as Equações 3.3 e 3.4 para a largura (*width*) e altura (*height*) das caixas delimitadoras, onde os resultados estão normalizados pela largura x_{img} e altura y_{img} da imagem conforme indicado nos passos do Apêndice B.

$$x_{center} = \frac{1}{x_{img}} \cdot (x_{min} + \frac{x_{max} - x_{min}}{2}) \quad (3.1)$$

$$y_{center} = \frac{1}{y_{img}} \cdot (y_{min} + \frac{y_{max} - y_{min}}{2}) \quad (3.2)$$

$$width = \frac{1}{x_{img}} \cdot (x_{max} - x_{min}) \quad (3.3)$$

$$height = \frac{1}{y_{img}} \cdot (y_{max} - y_{min}) \quad (3.4)$$

Além da conversão das coordenadas da caixa delimitadora, é necessário também especificar de maneira numérica qual é o defeito indicado por ela. Os defeitos estão numerados de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Representação dos defeitos do conjunto de dados HRIPCB para o treinamento da Rede Neural.

Defeito	Representação Numérica
Circuito Aberto	1
Curto-Circuito	2
Falta de Cobre	3
Excesso de Cobre	4
Trilha Desconectada	5
Falta de Estanho	6

Fonte: Elaboração própria (2021).

O resultado da conversão do arquivo de anotação em *.xml* do Apêndice C está no Código 3.1, onde cada linha representa um defeito suas coordenadas seguindo o padrão indicado por Bochkovskiy (2020) no Apêndice B.

Código 3.1 – Exemplo de arquivo de anotação para treinamento com YOLO.

```
1 5 0.8220171390903098 0.8203026481715007 0.023401450230718525 0.03467843631778058
2 5 0.5425181278839816 0.23013871374527112 0.021753460777851022 0.03909205548549811
3 5 0.5804218852999341 0.519546027742749 0.023401450230718525 0.03783102143757881
```

O *dataset* foi dividido aleatoriamente nos sub-conjuntos treinamento e teste utilizando o *script* do Apêndice E, com 20% para testes e o restante para o treinamento.

O arquivo de configuração *obj.names*

Código 3.2 – Arquivo de configuração *obj.data*.

```
1 classes = 6
2 train = data/train.txt
3 valid = data/test.txt
4 names = data/obj.names
5 backup = backup/
```

Código 3.3 – Arquivo de configuração *obj.names*.

```
1 open
2 short
3 mousebite
4 spur
5 copper
6 pin-hole
```

3.4 Treinamento

O treinamento foi feito no Google Colaboratory, um ambiente que permite a execução de códigos Python em *notebooks* Jupyter, adequado para Aprendizado de Máquina, análise de dados e educação, oferecendo recursos de computação como GPUs de forma gratuita (COLABORATORY..., 2021).

3.4.1 Tranferência de Aprendizado

3.5 Resultados

4 INTERFACE DE APLICAÇÃO

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, T. et al. Contributors. In: COHEN, S. (Ed.). *Artificial Intelligence and Deep Learning in Pathology*. Elsevier, 2021. p. xiii–xiv. ISBN 978-0-323-67538-3. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323675383010022>>. Citado na página 12.
- ALBAWI, S.; MOHAMMED, T. A.; AL-ZAWI, S. Understanding of a convolutional neural network. In: *2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*. IEEE, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109%2Ficengtechnol.2017.8308186>>. Citado na página 29.
- BOCHKOVSKIY, A. *Darknet*. 2020. Disponível em: <<https://github.com/AlexeyAB/darknet>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 32 e 40.
- BOCHKOVSKIY, A.; WANG, C.-Y.; LIAO, H.-Y. M. *YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection*. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 37.
- BROWNLEE, J. *Difference Between a Batch and an Epoch in a Neural Network*. 2018. Disponível em: <<https://machinelearningmastery.com/difference-between-a-batch-and-an-epoch/>>. Citado na página 51.
- CHAWLA, N. V. Data mining for imbalanced datasets: An overview. In: _____. *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. Boston, MA: Springer US, 2005. p. 853–867. ISBN 978-0-387-25465-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/0-387-25465-X_40>. Citado na página 22.
- CHEN, Q. et al. Contextualizing object detection and classification. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, v. 37, n. 1, p. 13–27, 2015. Citado na página 32.
- CHIN, R. T.; HARLOW, C. A. Automated visual inspection: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-4, n. 6, p. 557–573, 1982. Citado na página 11.
- COLABORATORY - Frequently Asked Questions. 2021. Acesso em: março/21. Disponível em: <<https://research.google.com/colaboratory/faq.html>>. Citado na página 41.
- CROWTHER, P. S.; COX, R. J. A method for optimal division of data sets for use in neural networks. In: KHOSLA, R.; HOWLETT, R. J.; JAIN, L. C. (Ed.). *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 1–7. ISBN 978-3-540-31997-9. Citado na página 19.
- DICK, S. Artificial intelligence. *Harvard Data Science Review*, v. 1, n. 1, 7 2019. <Https://hdsr.mitpress.mit.edu/pub/0aytgrau>. Disponível em: <<Https://hdsr.mitpress.mit.edu/pub/0aytgrau>>. Citado na página 12.
- DING, R. et al. Tdd-net: A tiny defect detection network for printed circuit boards. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, v. 4, 04 2019. Citado 3 vezes nas páginas 32, 33 e 34.

- EDGAR, T. W.; MANZ, D. O. Chapter 6 - machine learning. In: EDGAR, T. W.; MANZ, D. O. (Ed.). *Research Methods for Cyber Security*. Syngress, 2017. p. 153–173. ISBN 978-0-12-805349-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128053492000066>>. Citado na página 13.
- ETTEN, A. V. Satellite imagery multiscale rapid detection with windowed networks. *CoRR*, abs/1809.09978, 2018. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1809.09978>>. Citado na página 24.
- GHOLAMALINEZHAD, H.; KHOSRAVI, H. *Pooling Methods in Deep Neural Networks, a Review*. 2020. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 30.
- GOODFELLOW, I. J.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. *Deep Learning*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2016. <<http://www.deeplearningbook.org>>. Citado 12 vezes nas páginas 12, 13, 14, 15, 16, 18, 21, 22, 25, 26, 27 e 28.
- HU, B.; WANG, J. Detection of pcb surface defects with improved faster-rcnn and feature pyramid network. In: . [S.I.: s.n.], 2020. v. 8, p. 108335–108345. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 32.
- HUANG, W. et al. Hripcb: a challenging dataset for pcb defects detection and classification. *The Journal of Engineering*, v. 2020, 01 2020. Citado 6 vezes nas páginas 33, 34, 35, 37, 38 e 39.
- KULKARNI, A.; CHONG, D.; BATARSEH, F. A. 5 - foundations of data imbalance and solutions for a data democracy. In: BATARSEH, F. A.; YANG, R. (Ed.). *Data Democracy*. Academic Press, 2020. p. 83–106. ISBN 978-0-12-818366-3. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128183663000058>>. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 23.
- LAWLESS, W. F.; MITTU, R.; SOFGE, D. A. Chapter 4 - context: Separating the forest and the trees—wavelet contextual conditioning for ai. In: *Human-Machine Shared Contexts*. Academic Press, 2020. p. 67–91. ISBN 978-0-12-820543-3. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128205433000043>>. Citado na página 12.
- LESORT, T. et al. State representation learning for control: An overview. *Neural Networks*, v. 108, p. 379–392, 2018. ISSN 0893-6080. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608018302053>>. Citado na página 13.
- LETA, F. R.; FELICIANO, F. F.; MARTINS, F. P. R. Computer vision system for printed circuit bord inspection. In: *ABCM Symposium Series in Mechatronics*. [S.I.: s.n.], 2008. v. 3, p. 623 – 632. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 32.
- LIN, T. et al. Microsoft COCO: common objects in context. *CoRR*, abs/1405.0312, 2014. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1405.0312>>. Citado na página 28.
- MAO, S. et al. Opportunities and challenges of artificial intelligence for green manufacturing in the process industry. *Engineering*, v. 5, n. 6, p. 995–1002, 2019. ISSN 2095-8099. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809919300074>>. Citado na página 13.

- MISHRA, A. misc, *Metrics to Evaluate your Machine Learning Algorithm*. towardsdatascience.com, 2018. Disponível em: <<https://towardsdatascience.com/metrics-to-evaluate-your-machine-learning-algorithm-f10ba6e38234>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- MISRA, D. Mish: A self regularized non-monotonic neural activation function. *arXiv preprint arXiv:1908.08681*, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 19.
- MITCHELL, R.; MICHALSKI, J.; CARBONELL, T. *An artificial intelligence approach*. [S.I.]: Springer, 2013. Citado na página 12.
- MOGANTI, M. et al. Automatic pcb inspection algorithms: A survey. *Computer Vision and Image Understanding*, v. 63, n. 2, p. 287–313, 1996. ISSN 1077-3142. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S107731429690020X>>. Citado na página 32.
- NG, A. Notas de Aula, *Introduction To Deep Learning*. 2020. COURSERA: Neural Networks and Deep Learning. Disponível em: <<https://www.coursera.org/learn/neural-networks-deep-learning>>. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19 e 20.
- NICHOLSON, C. misc, *A Beginner’s Guide to Neural Networks and Deep Learning*. Pathmind A.I. Wiki, 2020. Disponível em: <<https://wiki.pathmind.com/neural-network#define>>. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 25.
- NIELSEN, M. A. misc, *Neural Networks and Deep Learning*. Determination Press, 2018. Disponível em: <<http://neuralnetworksanddeeplearning.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 27.
- RASHID, T. *Make Your Own Neural Network*. 1. ed. [S.I.]: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. ISBN 1530826608, 9781530826605. Citado na página 12.
- REDMON, J. *Darknet: Open Source Neural Networks in C*. 2016. <<http://pjreddie.com/darknet/>>. Citado na página 36.
- REDMON, J. et al. You only look once: Unified, real-time object detection. *CoRR*, abs/1506.02640, 2015. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1506.02640>>. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.
- REDMON, J.; FARHADI, A. Yolov3: An incremental improvement. *arXiv*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 37.
- REZATOFIGHI, H. et al. Generalized intersection over union. June 2019. Citado na página 24.
- ROBINS, M. The difference between artificial intelligence, machine learning and deep learning. *Intel Artificial Intelligence*, 5 2020. Disponível em: <<https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/artificial-intelligence/posts/difference-between-ai-machine-learning-deep-learning.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- SAUER, A. misc, *Quick Guide to Gradient Descent and It’s Variants*. Morioh, 2020. Disponível em: <<https://morioh.com/p/15c995420be6>>. Citado na página 21.

- SHARMA, S. Activation functions in neural networks. *towards data science*, v. 6, 2017. Citado na página 17.
- SIVARAJKUMAR, S. misc, *Image Classification And Object Detection*. medium.com, 2019. Disponível em: <<https://medium.com/@sonish.sivarajkumar/image-classification-and-object-detection-c9803f854923>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 29 e 32.
- STEEN, D. misc, *Precision-Recall Curves*. medium.com, 2020. Disponível em: <<https://medium.com/@douglaspsteen/precision-recall-curves-d32e5b290248>>. Citado na página 23.
- TAMENAOU, H. misc, *Framework vs library vs package vs module: The debate*. medium.com, 2020. Disponível em: <<https://medium.com/ieee-ensias-student-branch/framework-vs-library-vs-package-vs-module-the-debate-e1013a3e114d>>. Citado na página 35.
- TAN, R. J. misc, *Breaking Down Mean Average Precision (mAP)*. towardsdatascience.com, 2019. Disponível em: <<https://towardsdatascience.com/breaking-down-mean-average-precision-map-ae462f623a52>>. Citado na página 23.
- TANG, S. et al. Online PCB defect detector on A new PCB defect dataset. *CoRR*, abs/1902.06197, 2019. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1902.06197>>. Citado na página 34.
- VALENTI, C. F. et al. An evaluation of deep learning methods for small object detection. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2020. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/jece/2020/3189691/>>. Citado na página 37.
- WALCZAK, S.; CERPA, N. Artificial neural networks. In: MEYERS, R. A. (Ed.). *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. Third edition. New York: Academic Press, 2003. p. 631–645. ISBN 978-0-12-227410-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105008371>>. Citado na página 15.
- WANG, C. et al. Citrus recognition based on yolov4 neural network. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, v. 1820, n. 1, p. 012163, mar 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012163>>. Citado na página 28.
- WOOLF, B. P. Chapter 7 - machine learning. In: WOOLF, B. P. (Ed.). *Building Intelligent Interactive Tutors*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2009. p. 221–297. ISBN 978-0-12-373594-2. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123735942000071>>. Citado na página 13.
- WU, W.-Y.; WANG, M.-J. J.; LIU, C.-M. Automated inspection of printed circuit boards through machine vision. *Computers in Industry*, v. 28, n. 2, p. 103–111, 1996. ISSN 0166-3615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0166361595000631>>. Citado na página 11.
- YAN, W. Q. *Computational Methods for Deep Learning: Theoretic, Practice and Applications*. [S.I.]: Springer, 2021. (Texts in Computer Science). ISBN 3030610802, 9783030610807. Citado 5 vezes nas páginas 20, 25, 26, 27 e 28.

ZHU, W. et al. Deep learning based soft sensor and its application on a pyrolysis reactor for compositions predictions of gas phase components. In: *13th International Symposium on Process Systems Engineering (PSE 2018)*. Elsevier, 2018, (Computer Aided Chemical Engineering, v. 44). p. 2245–2250. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444642417503694>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

ZUMBAHLEN, H. Chapter 12 - printed circuit-board design issues. In: ZUMBAHLEN, H. (Ed.). *Linear Circuit Design Handbook*. Burlington: Newnes, 2008. p. 821–895. ISBN 978-0-7506-8703-4. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750687034000122>>. Citado na página 11.

APÊNDICES

APÊNDICE A – NOTAÇÕES UTILIZADAS EM REDES NEURAIS

Standard notations for Deep Learning

This document has the purpose of discussing a new standard for deep learning mathematical notations.

1 Neural Networks Notations.

General comments:

- superscript (i) will denote the i^{th} training example while superscript [l] will denote the l^{th} layer

Sizes:

· m : number of examples in the dataset

· n_x : input size

· n_y : output size (or number of classes)

· $n_h^{[l]}$: number of hidden units of the l^{th} layer

In a for loop, it is possible to denote $n_x = n_h^{[0]}$ and $n_y = n_h^{[\text{number of layers} + 1]}$.

· L : number of layers in the network.

Objects:

· $X \in \mathbb{R}^{n_x \times m}$ is the input matrix

· $x^{(i)} \in \mathbb{R}^{n_x}$ is the i^{th} example represented as a column vector

· $Y \in \mathbb{R}^{n_y \times m}$ is the label matrix

· $y^{(i)} \in \mathbb{R}^{n_y}$ is the output label for the i^{th} example

· $W^{[l]} \in \mathbb{R}^{\text{number of units in next layer} \times \text{number of units in the previous layer}}$ is the weight matrix, superscript [l] indicates the layer

· $b^{[l]} \in \mathbb{R}^{\text{number of units in next layer}}$ is the bias vector in the l^{th} layer

· $\hat{y} \in \mathbb{R}^{n_y}$ is the predicted output vector. It can also be denoted $a^{[L]}$ where L is the number of layers in the network.

Common forward propagation equation examples:

$a = g^{[l]}(W_x x^{(i)} + b_1) = g^{[l]}(z_1)$ where $g^{[l]}$ denotes the l^{th} layer activation function

$$\hat{y}^{(i)} = \text{softmax}(W_h h + b_2)$$

· General Activation Formula: $a_j^{[l]} = g^{[l]}(\sum_k w_{jk}^{[l]} a_k^{[l-1]} + b_j^{[l]}) = g^{[l]}(z_j^{[l]})$

· $J(x, W, b, y)$ or $J(\hat{y}, y)$ denote the cost function.

Examples of cost function:

· $J_{CE}(\hat{y}, y) = -\sum_{i=0}^m y^{(i)} \log \hat{y}^{(i)}$

· $J_1(\hat{y}, y) = \sum_{i=0}^m |y^{(i)} - \hat{y}^{(i)}|$

APÊNDICE B – ETAPAS DE TREINAMENTO UTILIZANDO A REDE NEURAL YOLO

- Criar o arquivo “yolo-obj.cfg” com o mesmo conteúdo de “yolov4-custom.cfg”;
- Alterar “yolo-obj.cfg” para:
 - Considerar *batches* com 64 imagens, onde um *batch* representa o número de amostras a serem trabalhadas antes de atualizar os parâmetros do modelo (BROWNLEE, 2018);
 - Subdividir cada *batch* em 16 imagens (para processamento paralelo em treinamentos utilizando GPUs - Unidade de Processamento Gráfico do inglês *Graphics Processing Unit*);
 - Utilizar um número máximo de *batches* igual ao produto $n_{classes} \cdot 2000$
 - Alterar o número de passos de acordo com o número máximo de *batches*;
 - Alterar a quantidade de filtros considerando a fórmula $(n_{classes} + 5) \cdot 3$.
- Criar o arquivo “obj.names” com os nomes das classes utilizadas, com cada nome em uma linha nova;
- Alterar no arquivo “obj.data” o número de classes utilizadas;
- Colocar as imagens de treinamento e teste no diretório “obj” que se encontra dentro de “data”;
- Criar um arquivo de texto com a extensão “.txt” para cada uma das imagens do *dataset* no mesmo diretório em que elas estão contendo os objetos e suas respectivas coordenadas, seguindo o padrão $<objectclass><x_{center}><y_{center}>< width >< height >$ de forma que cada linha represente um objeto, onde
 - $<objectclass>$ indica a classe do objeto de acordo com a ordem definida no arquivo “obj.names” com valores dentro do intervalo $[0, n_{classes} - 1]$;
 - $<x_{center}><y_{center}>$ são as coordenadas centrais da localização da caixa de limitadora do objeto, valores em ponto flutuante dentro do intervalo $[0.0, 1.0]$, normalizados de acordo com o tamanho da imagem utilizada.
 - $< width >< height >$ são a largura e a altura, respectivamente, da caixa de limitadora do objeto, valores em ponto flutuante dentro do intervalo $[0.0, 1.0]$, normalizados de acordo com o tamanho da imagem utilizada.
- Criar os arquivos de texto “train.txt” e “test.txt” que contém o nome das imagens utilizadas no treinamento e teste, respectivamente, onde para cada imagem utiliza-se uma nova linha;

- Fazer o *download* de pesos pré-treinados, com intuído de acelerar o treinamento;
- Iniciar o treinamento.

APÊNDICE C – EXEMPLO DE ARQUIVO DE ANOTAÇÃO DO CONJUNTO DE DADOS HRIPCB EM XML

cod/anotacoes–HRIPCB.xml

```

1 <annotation>
2   <folder>Missing_hole</folder>
3   <filename>01_missing_hole_01.jpg</filename>
4   <path>/home/weapon/Desktop/PCB_DATASET/Missing_hole/01_missing_hole_01.jpg</path>
5   <source>
6     <database>Unknown</database>
7   </source>
8   <size>
9     <width>3034</width>
10    <height>1586</height>
11    <depth>3</depth>
12  </size>
13  <segmented>0</segmented>
14  <object>
15    <name>missing_hole</name>
16    <pose>Unspecified</pose>
17    <truncated>0</truncated>
18    <difficult>0</difficult>
19    <bndbox>
20      <xmin>2459</xmin>
21      <ymin>1274</ymin>
22      <xmax>2530</xmax>
23      <ymax>1329</ymax>
24    </bndbox>
25  </object>
26  <object>
27    <name>missing_hole</name>
28    <pose>Unspecified</pose>
29    <truncated>0</truncated>
30    <difficult>0</difficult>
31    <bndbox>
32      <xmin>1613</xmin>
33      <ymin>334</ymin>
34      <xmax>1679</xmax>
35      <ymax>396</ymax>
36    </bndbox>
37  </object>
38  <object>
39    <name>missing_hole</name>
40    <pose>Unspecified</pose>
41    <truncated>0</truncated>
42    <difficult>0</difficult>
43    <bndbox>
44      <xmin>1726</xmin>
45      <ymin>794</ymin>
46      <xmax>1797</xmax>
47      <ymax>854</ymax>
48    </bndbox>
49  </object>
50 </annotation>
```

APÊNDICE D – SCRIPT UTILIZADO NA CONVERSÃO DOS ARQUIVOS DE ANOTAÇÃO

cod/HRIPCB_yolo_dataset_config.py

```

1 """
2 Conversão das anotações de "HRIPCB dataset" em xml para as anotações em txt
3 utilizadas no YOLO
4 Referências:
5 https://stackoverflow.com/questions/19772288/python-parse-xml-and-save-as-txt
6 """
7 import os
8 import cv2
9 import numpy as np
10 from tqdm import tqdm
11 import argparse
12 import fileinput
13 import matplotlib.pyplot as plt
14 import xml.etree.ElementTree as ET
15
16 obj_names = ["open_circuit", "short", "mouse_bite", "spur", "spurious_copper", "missing_hole"]
17
18 def convert(splited_filename, coords, group):
19     img_dir = "/home/ana/github/PCB_DATASET/images/" + group + "/" +
20     splited_filename + ".jpg"
21     imagem = cv2.imread(img_dir)
22     coords[2] -= coords[0] # diferença largura (x_fim - x_inicio)
23     coords[3] -= coords[1] # diferença altura (y_fim - y_inicio)
24     x_dif = int(coords[2] / 2) # converte diferença_largura pra int
25     y_dif = int(coords[3] / 2) # converte diferença_altura pra int
26     coords[0] = coords[0] + x_dif # x_inicio + diferença largura
27     coords[1] = coords[1] + y_dif # y_inicio + diferença altura
28     largura = int(imagem.shape[1]) # = largura da imagem
29     altura = int(imagem.shape[0]) # = altura da imagem
30     coords[0] /= largura
31     coords[1] /= altura
32     coords[2] /= largura
33     coords[3] /= altura
34     return coords
35
36 if __name__ == "__main__":
37     annotations_folder = 'Annotations'
38     os.chdir('/home/ana/github/PCB_DATASET')
39     for folder in os.listdir(annotations_folder):
40         if (folder.endswith(".JPG") or folder.endswith(".jpg") or folder.endswith(".TXT") or folder.endswith(".txt")) :
41             pass
42         else:
43             print(' - - - ' + folder + ' - - - ')
44             for filename in tqdm(os.listdir(annotations_folder + '/' + folder)):
45                 if (filename.endswith(".XML") or filename.endswith(".xml")) :
46                     splited_filename = str.split(filename, ".")[0]
47                     annotations = []

```

```
47         tree = ET.parse(annotations_folder+'/'+folder+"/"+filename)
48         root = tree.getroot()
49         annotations = []
50         for object in root.findall('object'):
51             coords = []
52             name = object.find('name').text
53             coords.append(int(object.find('bndbox').find('xmin').text))
54             coords.append(int(object.find('bndbox').find('ymin').text))
55             coords.append(int(object.find('bndbox').find('xmax').text))
56             coords.append(int(object.find('bndbox').find('ymax').text))
57             coords = convert(splited_filename, coords, folder)
58             newline = str(obj_names.index(name)) + " " + str(coords[0])
59             + " " + str(coords[1]) + " " + str(coords[2]) + " " + str(coords[3])
60             annotations.append(newline)
61
62             os.chdir("/home/ana/github/pcb-fabrication-fault-detection/
63             pcb_data/data")
64             with open(splited_filename + ".txt", "w") as outfile:
65                 for line in annotations:
66                     outfile.write(line)
67                     outfile.write("\n")
68                     outfile.close()
69             os.chdir('/home/ana/github/PCB_DATASET')
```

APÊNDICE E – SCRIPT UTILIZADO NA DIVISÃO DO DATASET PARA TREINAMENTO DA REDE NEURAL

cod/dataset_split.py

```

1 """
2 Separação do dataset para treinamento e teste
3 """
4 import os
5 import cv2
6 import numpy as np
7 import fileinput
8 from random import seed
9 from random import random
10 import math
11
12 test_fraction = 0.2
13 train_fraction = 1 - test_fraction
14
15 seed()
16
17 ROOT_DIR = os.getcwd()
18 dir = ROOT_DIR + '/data'
19 os.chdir(dir)
20
21 dataset_size = int(len(os.listdir(dir))/2)
22
23 list = []
24 test_list = []
25 train_list = []
26
27 for filename in os.listdir(os.getcwd()):
28     if filename.endswith(".txt"):
29         file = str.split(filename, ".")[0]
30         list.append(file)
31
32
33 #Colocando aleatoriamente itens dentro da pasta de validacao
34 for x in range(int(test_fraction*dataset_size)):
35     filename = list.pop(int(random()*(dataset_size-x)))
36     os.rename(filename + ".txt", "../valid/" + filename + ".txt")
37     os.rename(filename + ".jpg", "../valid/" + filename + ".jpg")
38     test_list.append(filename)
39
40 #Colocando o restante dos itens dentro da pasta de treinamento
41 for filename in list:
42     os.rename(filename + ".txt", "../obj/" + filename + ".txt")
43     os.rename(filename + ".jpg", "../obj/" + filename + ".jpg")
44     train_list.append(filename)
45
46 # salvando arquivo txt com a lista de teste e treinamento
47 dir = ROOT_DIR + '/../yolov4_train'
48 os.chdir(dir)
49 with open("test.txt", "w") as outfile:
50     for line in test_list:

```

```
51     outfile.write('data/valid/' + line + '.jpg')
52     outfile.write("\n")
53     outfile.close()
54
55 with open("train.txt", "w") as outfile:
56     for line in train_list:
57         outfile.write('data/obj/' + line + '.jpg')
58         outfile.write("\n")
59     outfile.close()
```

APÊNDICE F – CÓDIGO UTILIZADO PARA O TREINAMENTO DA REDE NEURAL NO AMBIENTE GOOGLE COLAB

cod/treinamento.py

```

1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """treinamento_YOLOv4_hripcb.ipynb
3 Automatically generated by Colaboratory.
4 Original file is located at
5     https://colab.research.google.com/drive/10Lco0mSDQbwCXTLOVd0twqukQaZAzJzM
6 """
7 import cv2
8 import matplotlib.pyplot as plt
9 import tensorflow as tf
10
11 !git clone https://github.com/AlexeyAB/darknet
12 !git clone https://github.com/Ixiaohuihui/Tiny-Defect-Detection-for-PCB
13
14 %cd darknet
15
16 !sed -i 's/OPENCV=0/OPENCV=1/' Makefile
17 !sed -i 's/GPU=0/GPU=1/' Makefile #habilitar treinamento em GPU
18 !sed -i 's/CUDNN=0/CUDNN=1/' Makefile
19 !make
20
21 #incluir arquivos de treinamento para a pasta darknet
22 !cp -R /content/pcb_data/obj /content/darknet/data
23 !cp -R /content/pcb_data/valid /content/darknet/data
24 #incluir arquivos de configurações para a pasta darknet
25 !cp /content/yolov4/cfg/obj.data /content/darknet/data
26 !cp /content/yolov4/cfg/obj.names /content/darknet/data
27 !cp /content/yolov4/cfg/yolov4_custom.cfg /content/darknet/cfg
28 !cp /content/yolov4/train.txt /content/darknet/data
29 !cp /content/yolov4/test.txt /content/darknet/data
30
31 #transferencia de aprendizagem
32 !wget https://github.com/AlexeyAB/darknet/releases/download/darknet_yolo_v3_optimal
33 #treinamento
34 !./darknet detector train data/obj.data cfg/yolov4_custom.cfg yolov4.conv.137 -
    dont_show -map

```