



UTILIZAÇÃO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS PARA AUTOMAÇÃO DE SELEÇÃO DE PLACAS DE NANO COMPONENTES PARA APLICAÇÕES TERMELÉTRICAS

Trabalho de Conclusão de Curso

Engenharia da Computação

Fellipe Tenório Férrer

Orientador: Prof. Fernando Buarque de Lima Neto, DIC PhD



UNIVERSIDADE
DE PERNAMBUCO

**Universidade de Pernambuco
Escola Politécnica de Pernambuco
Graduação em Engenharia de Computação**

FELLIPE TENÓRIO FÉRRER

**UTILIZAÇÃO DE PROCESSAMENTO
DIGITAL DE IMAGENS PARA
AUTOMAÇÃO DE SELEÇÃO DE
PLACAS DE NANO COMPONENTES
PARA APLICAÇÕES TERMELÉTRICAS**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Computação pela Escola Politécnica de Pernambuco – Universidade de Pernambuco.

Recife, Novembro de 2011.

De acordo

Recife

____/____/____

Orientador da Monografia

*Aos meu pais, Dona Cida e Baltazar, que não mediram esforços para me oferecer a
melhor educação.*

Agradecimentos

A Deus, pela minha saúde, determinação para concluir a graduação no curso de Engenharia da Computação. A Jesus Cristo, meu Salvador, que morreu por mim na Cruz do Calvário.

À minha família, especialmente meus pais, Dona Cida e Baltazar, pelo suporte, amor incondicional e incentivo aos estudos a minha vida toda e principalmente na conclusão desta etapa em minha vida.

Aos professores do eComp-UPE, pelo alto nível das aulas ministradas e do conhecimento a mim exposto.

Agradeço ao meu orientador, Professor Fernando Buarque de Lima Neto, pelos ensinamentos e motivações nunca vistas em outras aulas. Pelo incentivo e interesse em retribuir à sociedade, principalmente a Pernambucana, a minha formação superior em uma universidade gratuita e estatual. Pelas atividades de extensão que ocorreram fora da sala de aula e pela oportunidade de ajudar pessoas em situações menos privilegiadas. E por me incentivar a desenvolver um senso crítico, tão ausente na sociedade atual.

Agradeço aos parceiros de Pesquisa do Prof. Fernando Buarque na Universidade de Duisburg-Essen, Profa. Dra Gabi Schierning que forneceu as imagens para nossa análise.

Ao grupo de Computação Inteligente da Universidade de Pernambuco (CIRG) por apresentar a mim o mais alto nível de conhecimento e pesquisa, de renome internacional, em inteligência computacional.

Aos meu amigos e parceiros de sushi, Andréa Gomes, Edgar Welligton, Débora Nathalia, Tarcísio Meira, Luís Fernando, Demócrito, Rodrigo pelo companheirismo durante todas as lutas da graduação.

E a todos que contribuíram de direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho e que por uma questão de espaço não foram citados.

“Dá instrução ao sábio, e ele se fará mais sábio ainda;
Ensina ao justo, e ele crescerá em prudência”.

Pv 9:9

Resumo

O desenvolvimento de materiais nano compostos para aplicações termelétricas é feito através de uma linha de produção onde ao fim, uma placa com os nano compostos produzidos é fotografada através de microscopia de alta resolução. Nesta imagem adquirida há uma tarefa importante que é a de avaliar a qualidade dos nano cristais. No entanto, esta tarefa envolve uma contagem sujeita a erros humanos, a fim de determinar a efetividade do processo de produção (ou seja, se as nano-partículas possuem a qualidade desejada). A participação humana aumenta o tempo de desenvolvimento e pode diminuir a qualidade pelo erro associado à contagem. Este trabalho propõe uma implementação de um filtro de segmentação e uma sequência de aplicações de métodos capazes de auxiliar de maneira satisfatória a detecção e o reconhecimento dos nano cristais.

Palavras-chaves: Processamento Digital de Imagens, Nano Componentes, Microscopia, Filtro de Segmentação.

Abstract

O desenvolvimento de materiais nano compostos para aplicações termelétricas é feito através de uma linha de produção onde ao fim, uma placa com os nano compostos produzidos é fotografada através de microscopia de alta resolução. Nesta imagem adquirida há uma tarefa importante que é a de avaliar a qualidade dos nano cristais. No entanto, esta tarefa envolve uma contagem sujeita a erros humanos, a fim de determinar a efetividade do processo de produção (ou seja, se as nanopartículas possuem a qualidade desejada). A participação humana aumenta o tempo de desenvolvimento e pode diminuir a qualidade pelo erro associado à contagem. Este trabalho propõe uma implementação de um filtro de segmentação e uma sequência de aplicações de métodos capazes de auxiliar de maneira satisfatória a detecção e o reconhecimento dos nano cristais.

Keywords: Digital Image Processing, Nano Components, Microscopy, Segmentation Filter.

Sumário

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIII
TABELA DE SÍMBOLOS E SIGLAS.....	XIV
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 METODOLOGIA	2
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	5
2.1.1 REPRESENTAÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS.....	7
2.1.2 FUNDAMENTOS DE PDI.....	8
2.1.3 RUÍDOS EM IMAGENS DIGITAIS	11
2.1.4 FILTROS ESPACIAIS.....	12
2.1.5 FILTROS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	13
2.1.6 TRANSFORMADA DE HOUGH.....	14
CAPÍTULO 3 SISTEMA PROPOSTO	19
3.1 FILTRO DE SEGMENTAÇÃO.....	19
3.1.1 FILTRO FTF	21
3.2 ANÁLISE DE OUTRAS OPERAÇÕES.....	22
3.2.1 MÉTODO DE PREWITT.....	23
3.2.2 MÉTODO DE SOBEL	23
CAPÍTULO 4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS.....	25
4.1 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS	25
4.1.1 SEQUÊNCIA A	25
4.1.2 SEQUÊNCIA B	26
4.1.3 SEQUÊNCIA C	28
4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS	30
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	31

5.1	CONTRIBUIÇÕES.....	31
5.2	DISCUSSÃO.....	32
5.3	TRABALHOS FUTUROS	32
	BIBLIOGRAFIA.....	34
	APÊNDICE A EXEMPLOS DE PLACAS	35

Índice de Figuras

Figura 1.	Fotografia digital de 1921 (McFarlane, 1972).....	6
Figura 2.	Imagem representada graficamente como uma superfície.....	7
Figura 3.	Imagem representada como uma matriz de intensidade visual	7
Figura 4.	Imagem na forma de matriz numerica.....	8
Figura 5.	Diagrama com passos fundamentais do PDI	8
Figura 6.	Aquisição de imagem	9
Figura 7.	Pré-processamento de uma imagem	9
Figura 8.	Segmentação de imagem	10
Figura 9.	Representação e Descrição	10
Figura 10.	Representação e Reconhecimento	10
Figura 11.	Exemplo de ruído Gaussiano	11
Figura 12.	Exemplo de ruído <i>Salt-and-Pepper</i>	11
Figura 13.	Vizinhança do ponto (x, y)	12
Figura 14.	Aplicação de filtro de Mediana	13
Figura 15.	Plano xy.....	15
Figura 16.	Espaço de parâmetros	15
Figura 17.	Parametrização da reta no plano xy	16
Figura 18.	Curvas senoidais do plano $\rho\theta$	16
Figura 19.	Plano circular de Hough	17

Figura 20.	Área para localização de círculos utilizando a transformada de Hough .	18
Figura 21.	Exemplo de imagem de nano composto	19
Figura 22.	Aplicação do filtro FTF.....	22
Figura 23.	Método Prewitt aplicado na Figura 21	23
Figura 24.	Aplicação do método de Sobel na Figura 21	24
Figura 25.	Diagrama da Sequência A.....	25
Figura 26.	Resultado da sequência A.....	26
Figura 27.	Diagrama da Sequência B.....	27
Figura 28.	Resultado da Sequência B	27
Figura 29.	Diagrama da Sequência C	28
Figura 30.	Resultado da sequência C	29

Índice de Tabelas

Tabela 1. Parâmetros de entrada da Figura 26	26
Tabela 2. Parâmetros de entrada da Figura 28	27
Tabela 3. Parâmetros de entrada da Figura 30	29

Tabela de Símbolos e Siglas

CI – Circuito Integrado

IC – Inteligência Computacional

Nm - Nanômetros

PDI – Processamento Digital de Imagens

Capítulo 1 Introdução

Neste capítulo estão descritas a motivação para o trabalho juntamente com os seus objetivos, metodologia utilizada em sua elaboração e por fim sua estrutura.

1.1 Motivação

Nano componentes se tornaram cada vez mais essenciais para o todos os setores da sociedade. Educação, pesquisa, indústria fazem uso de dispositivos elétricos capazes de computar bilhões de calculos por segundo. Alguns circuitos integrados (CI) podem conter um bilhão de transistores em um espaço menor que 100 nanometros(nm) (WONG, 2005).

A aplicação de nanotecnologia é bastante vasta, sendo algumas das possível aplicações de nanotecnologia: (i) eficiência energética, como por exemplo células de combustível e energia solar; (ii) tecnologia ambiental, como por exemplo ciclos e eliminação de materiais; (iii) tecnologia da informação, com formas de armazenamento e processamento mais eficientes, dentre outras.

A produção de nano componentes é feita através de uma linha de produção onde, ao final do processo, é registrada uma imagem de microscopia de alta resolução dos componentes (SCHIERNING;CLAUDIO;THEISSMANN, 2010). Nesta imagem gerada existe a necessidade de avaliar tanto a qualidade quanto a quantidade de nano cristais presentes, determinando quais estão dentro do padrão de qualidade esperado e quais não estão. Para essa fase é necessário um tempo relativamente grande, podendo ser responsável por até metade do tempo total de produção dos nano cristais. Mesmo com esse tempo relativamente grande e com a importância desta fase, a avaliação do nano material é feita manualmente. Esta fase de produção está sujeita a erros humanos em ambas as partes, contagem e seleção.

Pelos motivos expostos anteriormente e com a importância dos nano materiais a utilização de um sistema capaz de auxiliar a contagem e avaliação de

maneira satisfatória dos nano componentes gerados é indicado, fortemente. Sendo, este sistema, o resultado principal que se espera deste trabalho.

1.2 Objetivos

O trabalho proposto tem como objetivo a criação de um sistema capaz de contribuir com a produção de nano componentes, utilizados em aplicações termelétricas. Este sistema irá auxiliar melhorando a precisão do processo de contagem diminuindo o tempo necessário para a contagem de nano compostos registrados por microscopia de alta resolução e também avaliar de maneira mais precisa a qualidade dos nano cristais que formam os nano compostos, feito hoje de maneira manual. Para obtenção deste objetivo serão utilizados métodos e algoritmos de Processamento Digital de Imagens (PDI) de maneira que seja possível reconhecer formas geométricas (e.g. círculos) e propriedades destas formas, como por exemplo média dos raios e desvio padrão.

Para o desenvolvimento deste sistema será proposto um filtro de segmentação para remoção do ruído existente nas imagens. Será proposta também uma sequência de métodos que, utilizando o filtro proposto, será aplicada nas imagens para reconhecimento dos nano componentes.

1.3 Metodologia

Inicialmente, foram estudados os principais métodos e algoritmos de PDI normalmente utilizados no processo de detecção e reconhecimento de formas geométricas. A partir daí, foi necessário o estudo e desenvolvimento de métodos criados a partir de modificações dos métodos de PDI estudados. Ao final, foi executado um experimento para validar e verificar o resultado obtido pela implementação das técnicas escolhidas e investigadas. Desta maneira, as atividades principais realizadas são enumeradas:

1. Revisão bibliográfica: foi realizada uma coleta de material científico (e.g. artigos, livros) para estudo de teorias e conceitos da área de PDI.

-
2. Estudo e implementação consistente dos principais métodos de PDI para tratamento de imagens que serão utilizados ou adaptados para a resolução do problema.
 3. Implementação de algoritmos de PDI capazes de solucionar características específicas do problema.
 4. Desenvolvimento do sistema: aplicação capaz de requisitar e avaliar as imagens dos nano componentes.
 5. Análise dos resultados: durante a implementação do sistema foram realizadas as análises dos resultados obtidos pelo sistema.

1.4 Estrutura do trabalho

A organização do trabalho apresentado é detalhado a seguir. Primeiramente, foram abordados os conteúdos teóricos que sustentam os desenvolvimentos e determinações escolhidas neste trabalho. Por fim, seguem as apresentações dos resultados experimentais e perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 1: Contém a motivação para o trabalho juntamente com os objetivos, metodologia utilizada e estrutura do trabalho.

Capítulo 2: É constituído dos fundamentos teóricos necessários para a boa compreensão do trabalho apresentado. Dentre os fundamentos teóricos, os mais importantes são filtros espaciais, suas aplicações através de janelas e vizinhanças, e possíveis modificações para soluções do problema. Será dada ênfase à teoria da transformada de Hough (HOUGH, 1962) devido sua importância para este trabalho.

Capítulo 3: Neste capítulo, é abordado como se deu a aplicação dos métodos e algoritmos de PDI pesquisados e/ou criados, bem como a ordem das sequências utilizadas.

Capítulo 4: São apresentadas as simulações dos modelos propostos no capítulo 3.

Capítulo 5: Aqui, resume-se o trabalho, apresentam-se as dificuldades encontradas, discussões geradas e quais as conclusões adquiridas, como também as possíveis melhorias e trabalhos futuros.

Capítulo 2 Fundamentação Teórica

Este capítulo aborda o conteúdo teórico necessário para solucionar o problema explanado na introdução. A seção 2.1 apresenta os fundamentos necessários sobre Processamento Digital de Imagens (PDI), como por exemplo deslizamento de janela pela imagem, métodos que trabalham no domínio espacial ou domínio da frequência da imagem. Explica também conceitos básicos sobre imagens, como por exemplo representação de imagens digitais e definição de tipos de ruídos. Explica também os métodos utilizados para as soluções expostas.

2.1 Processamento Digital de Imagens

Processamento Digital de Imagens (PDI) faz referência ao processamento de imagens digitais por meio de um computador. Cada imagem digital é composta por um número finito de elementos, onde cada um destes elementos possui uma localização e valor. A esse elementos dar-se o nome de *elementos pictóricos*, *elementos de imagem*, *pels* ou *pixels*.

A visão exerce a função de sentido mais avançado (GONZALEZ; WOODS, 2010) e conseqüentemente, imagens, digitais ou analógicas, possuem um papel fundamental na percepção humana. Aparelhos de processamento computacional utilizados para processarem imagens digitais possuem a capacidade de cobrir qualquer espectro Eletromagnético, de ondas gama a ondas de rádio, em contrapartida aos seres humanos, limitados à banda visual do espectro. Por esta razão PDI se tornou um ramo da computação de grande importância.

Aplicações de PDI foram originalmente aplicadas em jornais, onde imagens eram enviadas por cabo submarino entre Londres e Nova York. A transmissão de imagens era feita por uma implementação de um sistema feito por meio de cabos submarinos, utilizando sistema Bartlane, no início da década de 1920 e reduziu de semanas para poucas horas o tempo necessário para o transporte de imagens e fotografias através do oceano. A Figura 1 mostra uma fotografia digital produzida em

1921 baseada em uma fita codificada por uma impressora telegráfica com fontes especiais.



Figura 1. Fotografia digital de 1921 (McFarlane, 1972)

Alguns dos primeiros problemas encontrados para a melhoria dessas primeiras imagens era a escolha de procedimentos de impressão e a de distribuição dos níveis de intensidade. Os primeiros sistemas Bartlane tinham a capacidade de codificar imagens em cinco níveis distintos de cinza. Em 1929 esta capacidade foi aumentada para 15. Esses sistemas Bartlane não utilizavam computadores para a transmissão de imagens digitais. Por isso esses exemplos citados muitas vezes não serem considerados resultados de processamento digital de imagens, justamente por não utilizarem computador.

Apesar de PDI possuir aplicações há décadas, a história de processamento de imagens digitais possui um estreito laço com a própria história do computador. Isso se dá porque imagens digitais necessitam tanto de capacidade de armazenamento quanto de processamento computacional. Isso resulta que o progresso na área de PDI está estreitamente relacionado com o desenvolvimento dos computadores ao longo do tempo.

Os primeiros computadores com capacidade suficiente para realizarem tarefas de PDI com valores significativos remetem para o início da década de 1960. A evolução do processamento de imagens dependeu, por muitos anos, da disponibilidade dessas máquinas e do início do programa espacial. Esses dois avanços trouxe à tona a atenção ao potencial existente em PDI. A utilização de técnicas computacionais para melhoria de imagens produzidas por uma sonda espacial teve início em 1964 quando imagens da lua transmitida por um satélite foram processadas por um computador para corrigir distorções provindas de

influências externas eletromagnéticas e distorções inerentes à câmera a bordo do satélite.

2.1.1 Representação de imagens digitais

Uma imagem digital pode ser representada basicamente de 3 formas. Uma destas maneiras é representar a imagem graficamente, com dois eixos determinando a localização no espaço (eg. x e y), e o terceiro (e.g. z) representando as intensidades como sendo uma função das variáveis dos dois outros eixos. A Figura 2 mostra um exemplo desta representação. Este tipo de representação é útil no manuseio de imagens em tons de cinza.

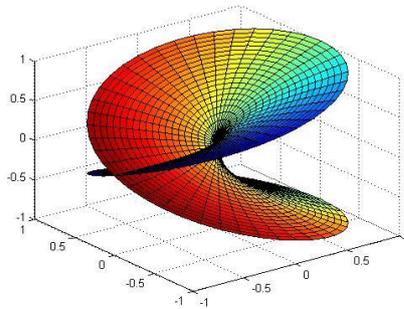


Figura 2. Imagem representada graficamente como uma superfície

Uma outra forma de representação é a representação da imagem digital como uma matriz de intensidade visual, como mostra a Figura 3. Essa representação é mais comum pois é a maneira usualmente utilizada por monitores ou fotografias para exibição de imagens.

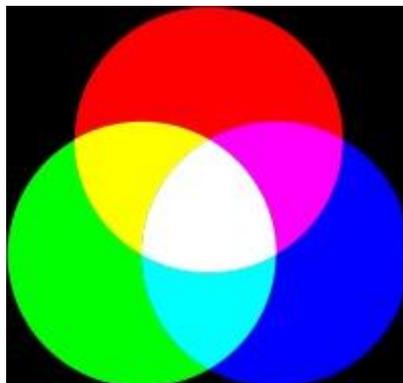


Figura 3. Imagem representada como uma matriz de intensidade visual

A terceira representação é ilustrada pela Figura 4. Nessa, são exibidos os valores numéricos de cada pixel de uma imagem na forma de matriz. Esta é a maneira utilizada por computadores para efetuar operações na imagem.

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	6	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1	0	0	1
2	0	1	0	0	0	1	1	2
3	0	0	0	2	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	0	1	1
5	0	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	1	0	0	0
7	0	1	2	1	1	0	0	2

Figura 4. Imagem na forma de matriz numerica

2.1.2 Fundamentos de PDI

A Figura 5 mostra o diagrama clássico utilizado para processamento de imagens (FILHO; NETO, 1999). Este diagrama mostra um exemplo geral e dependendo da utilização e do domínio do problema, alguns passos podem ser deixados de lado, repetidos ou até mesmo novos passos podem ser inseridos. Cada passo exibido representa a parte do processamento nas imagens utilizada para determinar a saída, geralmente uma imagem, com as informações desejadas acessíveis ao computador.

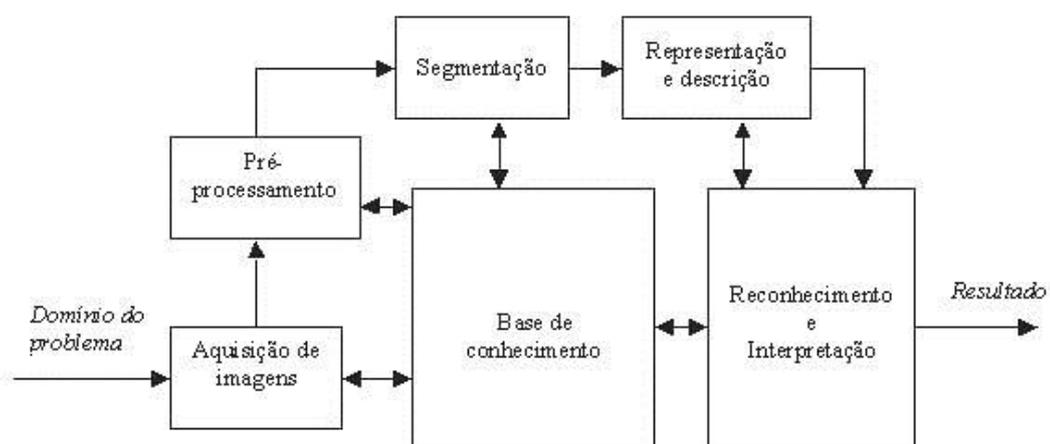


Figura 5. Diagrama com passos fundamentais do PDI

Aquisição da imagem é a parte responsável por adquirir uma imagem digital. Para esta aquisição se faz necessária a utilização de um sensor (e.g. câmera fotográfica) para mapeamento e imageamento com a capacidade de tornar digital o sinal produzido pelo sensor. A Figura 6 mostra um exemplo da aquisição de uma imagens de algumas moedas a partir de uma câmera fotográfica.

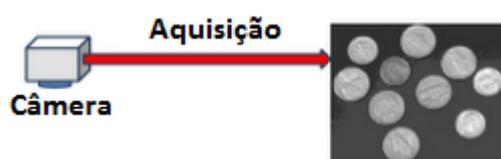


Figura 6. Aquisição de imagem

Pré-processamento é o passo executado logo após a aquisição da imagem. Este passo possui um papel fundamental em PDI pois geralmente é utilizado para melhoramento da imagem de maneira a torna-lá adequada para a aplicação específica desejada. A Figura 7 mostra um exemplo de pré-processamento de imagem.

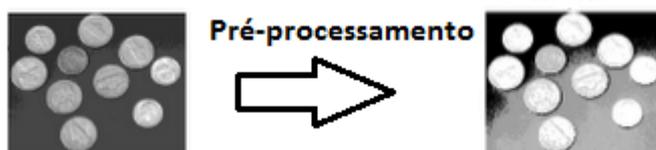


Figura 7. Pré-processamento de uma imagem

Segmentação é responsável por dividir a imagem vinda do passo de pré-processamento em seus objetos constituintes. Estes objetos, por sua vez, têm que uma regra clara para sua contituição para o domínio do problema. Nem sempre os objetos que se deseja evidenciar em uma imagem são os mais intuitivos. Uma segmentação robusta aumenta bastante a chance de sucesso dos passos seguintes (FILHO; NETO, 1999). Um exemplo de saída do passo de segmentação pode ser os *pixels* da fronteira de um objeto ou os *pixels* que o compõem. A Figura 8 mostra um exemplo de segmentação de imagem.

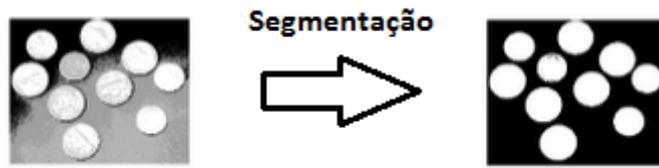


Figura 8. Segmentação de imagem

Representação e Descrição ou Extração de Características procuram extrair dos dados as características que possam resultar em alguma informação de interesse para extratificar os objetos da imagem em classes. Por exemplo, em reconhecimento de caracteres, a descrição poderia reconhecer e extrair informações como buracos e/ou concavidades, assim como outras características que auxiliem na diferenciação das letras do alfabeto. A Figura 9 mostra um exemplo de representação e descrição de uma imagem.

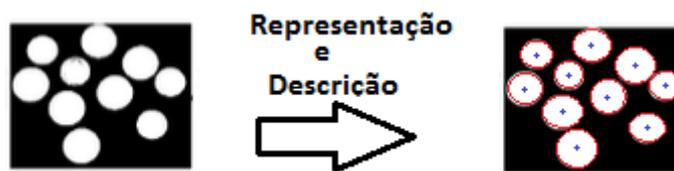


Figura 9. Representação e Descrição

Por fim, o Reconhecimento e a Interpretação procura atribuir rótulos e informações subjetivas ao conjunto de informações adquiridas pelos passos anteriores. Seria neste passo, por exemplo, que os caracteres provindos do passo de Representação e Descrição, seriam atribuídos às respectivas letras dos alfabetos. A Figura 10 mostra um exemplo de Reconhecimento e Interpretação de um imagem. Neste exemplo foi identificado o valor de cada moeda a partir do raio do círculo.

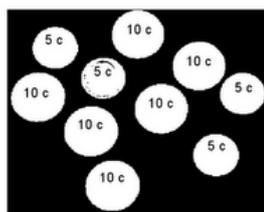


Figura 10. Representação e Reconhecimento

2.1.3 Ruídos em imagens digitais

Normalmente, na aquisição das imagens, alguns erros de transmissão ou processamento podem acontecer. Erros como estes produzem o chamado ruído. Ruído em imagens digitais nada mais é do que a alteração de tons e valores de *pixels*. Os ruídos podem depender ou não do conteúdo da imagem.

Alguns tipos de ruídos são: ruído branco, onde a intensidade é independente da frequência do sinal, ruído gaussiano, onde o ruído segue uma distribuição descrita por uma Gaussiana, ruídos impulsivos, que ocorre quando a imagem apresenta-se corrompida por *pixels* ruidosos com brilho muito diferente dos seus vizinhos. Este tipo de ruído pode ser criado por interferências eletromagnéticas e está exemplificado na Figura 11. O ruído *salt-and-pepper* é um tipo de ruído onde *pixels* com intensidades saturadas (preto ou branco para imagens em tons de cinza) corrompem as imagens. A Figura 12 mostra um exemplo de ruído *salt-and-pepper*.



Figura 11. Exemplo de ruído Gaussiano

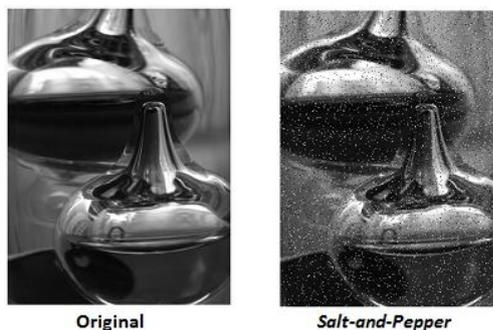


Figura 12. Exemplo de ruído *Salt-and-Pepper*

2.1.4 Filtros espaciais

Domínio espacial é o termo que se refere ao plano da imagem. Os métodos, também chamados de filtro, de PDI que trabalham neste domínio se baseiam na manipulação direta de *pixels* da imagem. Nessa classe de métodos, as duas principais categorias de processamento são as transformações de intensidade e as filtragens espaciais. Transformações de intensidade trabalham nos *pixels* de maneira isolada e são utilizadas principalmente para reconhecimento e manipulações de contrastes e limiarizações de imagens.

Os métodos do domínio espacial podem ser expressos por (1), onde $f(x, y)$ é a imagem de entrada, $g(x, y)$ é a imagem de saída e T é um operador em f definido em uma vizinhança do ponto (x, y) .

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (1)$$

A Figura 13 representa de maneira suficiente a aplicação de (1). O ponto (x, y) é uma posição qualquer da imagem e a grade, também chamada de janela, que possui (x, y) no centro possui os pontos chamados de vizinhos do ponto.

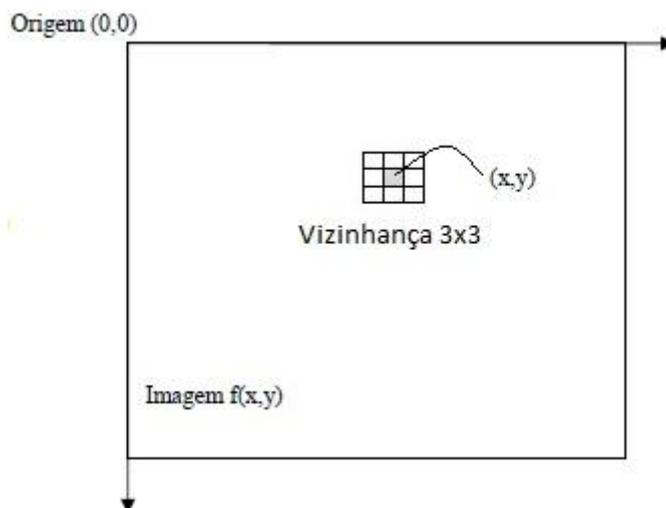


Figura 13. Vizinhança do ponto (x, y)

A aplicação do operador na imagem consiste em movimentar a janela de um *pixel* para outro aplicando o operador a cada transição da janela, gerando, com o resultado do processamento dos *pixels* contidos na janela, a imagem de saída.

Existe um conjunto muito grande de filtros espaciais. Para cada domínio de problema existe um conjunto de técnicas que podem ser utilizados para alcançar um objetivo desejado. Mesmo com um conjunto grande de possibilidades, muitas vezes as peculiaridades de um problema requerem a adaptação de um filtro existente para sua solução. Outras vezes se faz necessária a criação de filtros com propriedades que satisfazem exclusivamente a solução deste problema.

Por exemplo, para imagens com rúidos aleatórios normalmente aplica-se filtros espaciais lineares de suavização. Este filtro trabalha substituindo o valor de um *pixel* por um valor estatístico da sua vizinhança, como a média das intensidades dos vizinhos. É importante considerar que o tamanho da janela é fundamental para uma boa suavização da imagem. Algumas imagens produzem um resultado melhor quando é aplicada uma janela 3x3, outras imagens 5x5, etc. Para determinar qual a melhor janela a melhor maneira é através de testes. A Figura 14 mostra a aplicação de um filtro de mediana em uma imagem de raio-X de uma placa de circuito integrado corrompida de com ruído *salt-and-pepper*.

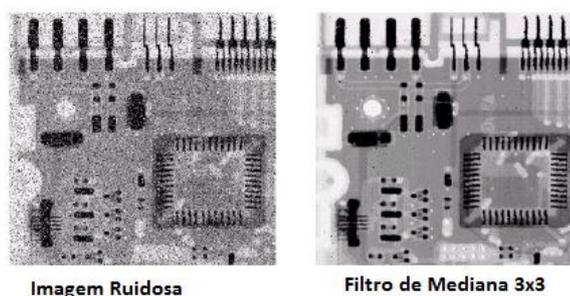


Figura 14. Aplicação de filtro de Mediana

2.1.5 Filtros no domínio da frequência

A filtragem no domínio da frequência consiste em modificar a transformada de Fourier de uma imagem e depois calcular a transformada inversa para obter o resultado processado.

Fundamentação teórica sobre as transformadas, séries, espectro ou transformada inversa de Fourier ou conceitos necessários para seu entendimento, como números complexos, fogem ao escopo deste trabalho.

Existem 3 tipos principais de filtragem no domínio da frequência, são eles: Filtros passa-baixa, que preservam as baixas frequências espaciais e suprime as altas frequências, Filtros passa-alta, que preservam as altas frequências espaciais e suprime as baixas e os Filtros passa-faixa, que preservam faixas específicas de frequências espaciais suprimindo todas as outras. Filtros passa-baixa são utilizados para suavização e borrimento. Filtros passa-alta servem para realce das bordas e aguçamento. Por último, Filtros passa-faixa são utilizados principalmente para restauração de imagens.

2.1.6 Transformada de Hough

Pelo papel fundamental da transformada de Hough neste trabalho, esta seção explicará a transformada de Hough.

É comum em PDI lidarmos com imagens não estruturadas onde tudo que se possui é uma imagem da borda e não sabe-se a localização dos objetos de interesse. Uma abordagem para esse reconhecimento é feita através de mapeamento de elementos geométricos específicos podendo, assim, identificar linhas retas, círculos, entre outras.

A transformada de Hough (HOUGH, 1962) propõe uma abordagem para reconhecimento de retas e curvas em um determinado conjunto de pontos n de uma imagem. Dado um ponto com coordenadas (x_i, y_i) em um plano cartesiano xy e a equação geral de uma reta na forma inclinação-interseção:

$$y_i = ax_i + b \tag{2}$$

Onde a e b são constantes. Infinitas retas passam por (x_i, y_i) , mas todas elas satisfazem a equação (2) para diferentes valores de a e b . Uma outra forma de escrever a equação é:

$$b = -ax_i + y_i \tag{3}$$

Considerando a equação (3), o plano ab (ou *espaço de parâmetros*) produz a equação de uma única reta para o par (x_i, y_i) . Além disso, um segundo ponto (x_j, y_j) possui também uma reta associada no *espaço de parâmetros* e, ao menos que sejam paralelas, esta reta cruza a reta associada ao primeiro ponto (x_i, y_i) em algum ponto (a', b') , em que a' é a inclinação e b' é a interseção da reta contendo os dois pontos (x_i, y_i) considerados.

A Figura 15 representa o plano xy e a Figura 16 representa o espaço de parâmetros.

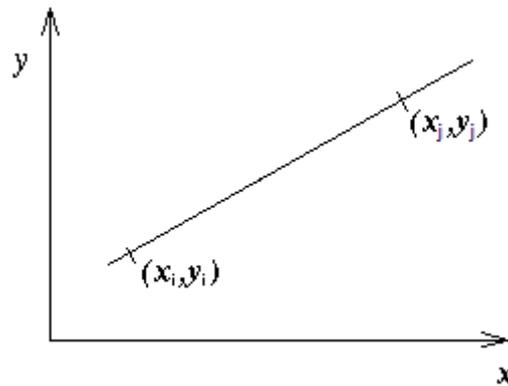


Figura 15. Plano xy

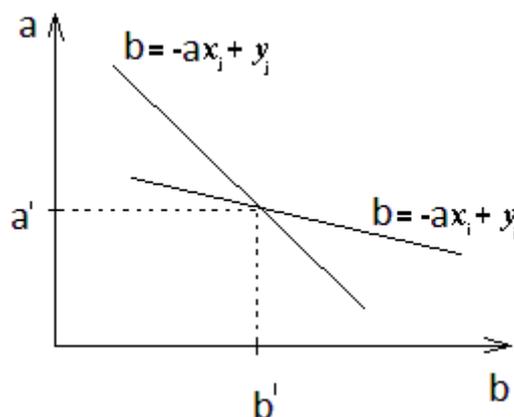


Figura 16. Espaço de parâmetros

Um empecilho com esta abordagem é que a (inclinação da reta) se aproxima do infinito conforme a reta vai se tornando vertical. A solução para isso é representar a reta em coordenadas polares.

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (4)$$

A Figura 17 interpreta geometricamente os parâmetros ρ e θ e a Figura 18 interpreta as curvas senoidais do plano $\rho\theta$.

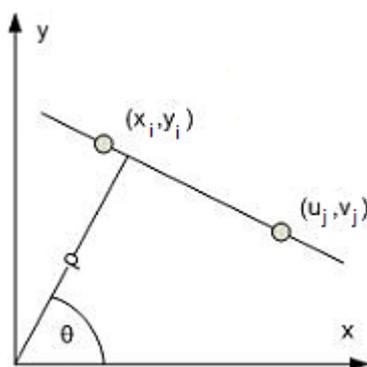


Figura 17. Parametrização da reta no plano xy

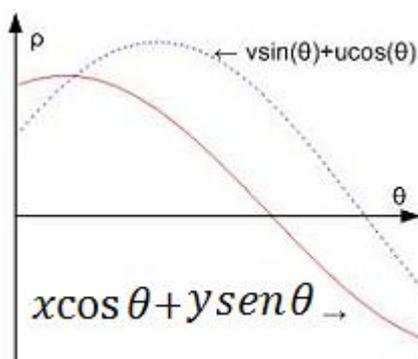


Figura 18. Curvas senoidais do plano $\rho\theta$.

Para a construção da transformada de Hough, todos os pontos da imagem no plano espacial acrescenta um voto para se descobrir as possíveis linhas que passam por ele. Ou seja, como mostrado na Figura 18, cada ponto da imagem no plano espacial cria uma senoidal no plano $\rho\theta$ (plano de Hough). Cada ponto ao longo da senoidal recebe um voto para cada ponto do plano espacial que esteja associada ou próxima a ela. A superposição de senoidais vindas de muitos pontos no plano

espacial faz com que os votos destes pontos se somem nos pontos onde se cruzam. Estes cruzamentos de pontos de senoidais ocorrem em valores de ρ e θ que permitem identificar várias linhas que passam por vários pontos na imagem do espaço real.

A transformada de Hough original pode ser modificada para reconhecer outras formas que não apenas linhas, porém o tamanho e a dimensionalidade do plano de Hough utilizado para acumular os votos aumenta com a complexidade da forma. Para detectar círculos nas imagens através da transformada de Hough não é necessário que os pontos formem um círculo completo. Por exemplo, este método tem sido utilizado para medir a curvatura de cerâmicas históricas (RUSS, 2011).

A transformada de Hough circular requer um plano tridimensional, uma vez que 3 parâmetros são necessário para se definir um círculo (as coordenadas x e y do centro do círculo e o *raio*). Desta maneira, cada ponto no plano espacial produz um cone de votos dentro do plano de Hough, como mostrado na Figura 19, correspondendo a todos os círculos de raios diferentes e posições de centro que podem ser traçados através do ponto.

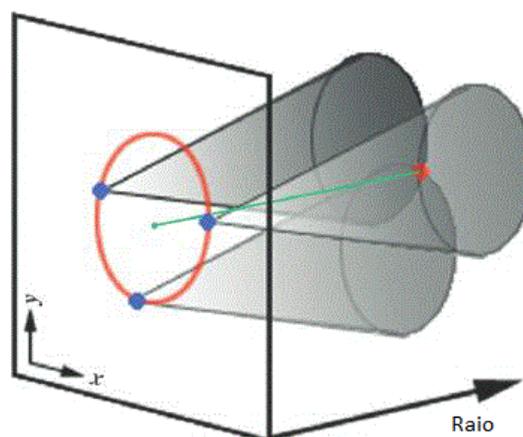


Figura 19. Plano circular de Hough

A Figura 20 mostra um exemplo da utilização de Hough circular para localizar a melhor posição de círculos possíveis dentro do padrão de difração selecionado.

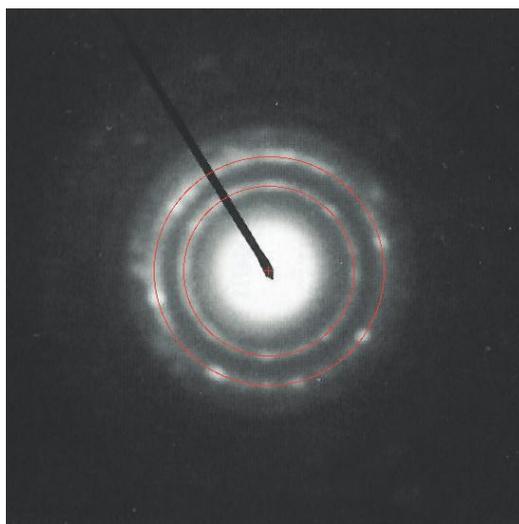


Figura 20. Área para localização de círculos utilizando a transformada de Hough

Capítulo 3 Sistema Proposto

Neste capítulo consta como os conceitos e teorias estudados (a partir da fundamentação teórica) foram aplicados na construção do sistema de detecção e reconhecimento das formas dos nano cristais presentes nos nano componentes. Serão apresentados os métodos utilizados para resolver problemas intermediários, como por exemplo, a remoção do ruído. A seção 3.1 propõe um novo filtro para a segmentação com o objetivo de homogeneizar os objetos de fundo. A Seção 3.2 apresenta uma análise outros métodos de segmentação comparados ao proposto na seção 3.1.

3.1 Filtro de Segmentação

A Figura 21 mostra um exemplo de imagem de nano componentes produzida e fotografada ao fim da linha de produção.

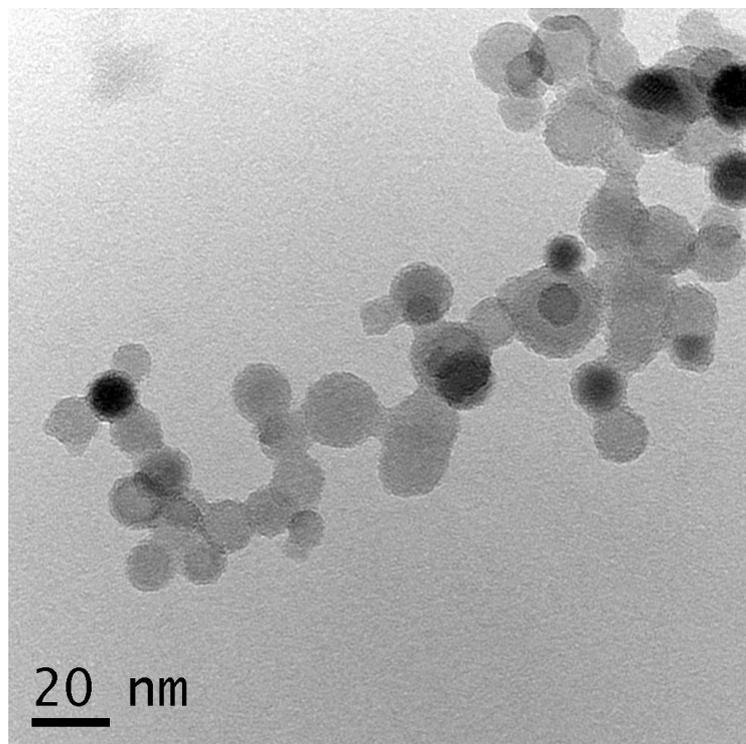


Figura 21. Exemplo de imagem de nano composto

Esta imagem é composta em tons de cinza, onde cada *pixel* possui uma intensidade que vai de 0 a 255 para representar a cor. Um *pixel* com valor 0 possui a cor preta e o *pixel* com valor 255 possui a cor branca.

É facilmente notável que esta imagem é bastante ruidosa e que pontos de interesse, em algumas regiões, se confunde facilmente com pontos de fundo. Ela é composta por vários nano componentes representados pelos círculos mais escuros. Outra característica desses nano cristais é que algumas áreas de círculos estão mais escura que outras. Isso ocorre devido à existência de sobreposição de nano cristais. Ou seja, quanto mais escura uma área, mais círculos sobrepostos estão presentes.

Uma característica bastante indesejada é a presença de objetos de fundo com ruído muito repetitivo e com intensidade semelhante a algumas áreas com nano cristais. Por causa dessas características de área de fundo com ruído atípico, com valores iguais a alguns círculos, a aplicação de técnicas tradicionais de Processamento Digital de Imagens (PDI) para segmentação e remoção de ruído, como filtros passa-baixa (MÜLLER; DARONCO, 2010), global ou com estatística local, Prewitt, Sobel, entre outros, se mostraram ineficazes para remover o ruído de maneira satisfatória e segmentar a imagem em área de fundo e área de interesse, mesmo com a aplicação de outros métodos auxiliares.

De fato, algumas áreas de fundo somente se diferenciam de um círculo pela presença de círculos vizinhos que possuem boas características para detecção e reconhecimento. O ruído das imagens possuem valores de intensidade altos (próximos da cor branca). Esse comportamento do ruído permite a criação de um filtro capaz de detectar o ruído e segmentar a imagem pelo valor apresentado pelo ponto e seus vizinhos, determinados pela janela. Baseado na dificuldade de segmentação e remoção do ruído, e da peculiaridade dos componentes vizinhos, foi criado um filtro de segmentação de imagem baseado em componentes vizinhos. Este filtro será representativamente chamado como filtro FTF.

3.1.1 Filtro FTF

Este filtro se assemelha a outros filtros de PDI por também utilizar uma janela para aplicação do operador.

O filtro FTF trabalha no domínio espacial. Por uma questão de simplicidade foi utilizado uma janela com dimensões ímpares, para facilitar o cálculo do *pixel* central. A equação (5) mostra o cálculo do somatório feito a cada passo da janela, onde $S(i, j)$ é o valor final do somatório no ponto localizado em (i, j) , M é a largura da janela e N é a altura.

$$S(i, j) = \sum_{j=0}^M \sum_{i=0}^N p(i, j) \quad (5)$$

A equação (6) mostra a etapa seguinte ao cálculo do somatório feito (5), Onde $p(i, j)$ é o *pixel* central da janela, p_f é o *pixel* com valor de objeto de fundo, t é *thresholding* determinado por parâmetro de entrada, p_{po} é o valor do *pixel* da imagem original da posição central da janela.

$$p(i, j) = \begin{cases} p_f, & \text{se } S(i, j) > t \\ p_{po}, & \text{cc.} \end{cases} \quad (6)$$

A cada passo da janela pelos *pixel* o filtro trabalha da seguinte forma: soma-se os valores de todos os *pixels* presentes dentro da janela, de acordo com a equação (5). Se o resultado desta forma for maior que um *thresholding*, cujo valor é determinado por parâmetro de entrada para o filtro, o valor do *pixel* central da janela receberá um valor de fundo. Para esse trabalho, um elemento de fundo é o que possui a cor branca. Caso contrário, ou seja, se o somatório for menor ou igual ao *thresholding*, o *pixel* central receberá o valor original daquela posição. A Figura 22 mostra o resultado obtido da aplicação do filtro FTF na Figura 21 com a marca da escala removida. Foi utilizado um *thresholding* igual a 30000 e uma janela 13x13.

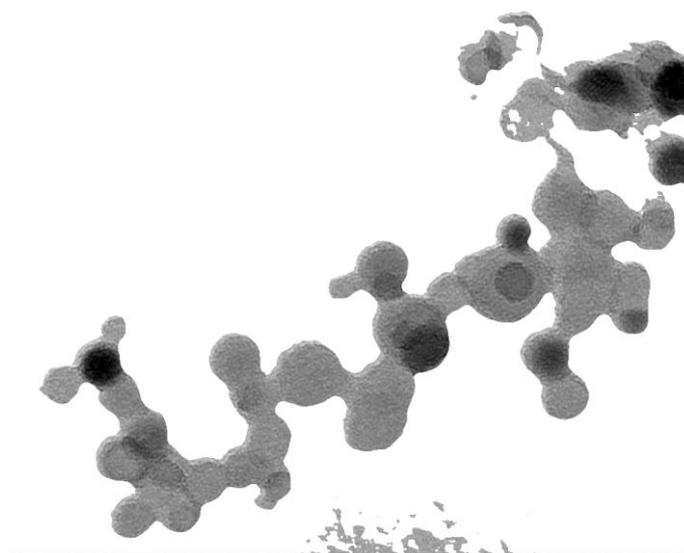


Figura 22. Aplicação do filtro FTF

Algumas características são bastante visíveis. Pode-se notar que grande parte do ruído presente na Figura 21 foi removido. Uma característica indesejada foi que alguns *pixels* de objetos, principalmente na parte superior da imagem, foram transformados em *pixel* de fundo. Um ponto de nota é que os pontos próximos das bordas direitas e inferior, formando uma faixa lateral e outra inferior, continuaram com os valores originais, mesmo sendo eles ruídos. Esse comportamento ocorreu porque o filtro não alterava os valores dos pontos onde a janela ultrapassava os limites da imagem. A faixa da borda direita permaneceu porque sua largura era menor que a da janela e a faixa da broda inferior porque sua altura era menor que a altura da janela. Algum ruído na parte inferior da imagem permaneceu depois da aplicação do filtro. Isso aconteceu porque esta área possui vizinho com valores semelhantes aos vizinhos de uma área de interesse.

3.2 Análise de Outras Operações

O problema analisado se encaixa na classe de detecção e reconhecimento de imagens ruidosas. Para tal classe o pré-processamento para segmentação e remoção do ruído da imagem é um passo fundamental para uma boa detecção e reconhecimento. Existem métodos de segmentação clássicos desenvolvidos para este fim, porém, o resultado da aplicação de um desses métodos não garante o

sucesso de sua aplicação em outros problemas com características semelhantes. A seguir serão analisados os resultados de aplicações de métodos normalmente utilizados em PDI para segmentação.

3.2.1 Método de Prewitt

Este método trabalha da seguinte maneira: em cada ponto da imagem, o resultado do operador de Prewitt é o vetor gradiente correspondente ou a norma desse vetor. O operador de Prewitt é baseado na convolução da imagem com um filtro pequeno e separável aplicado na horizontal e na vertical e possui baixo custo computacional. A Figura 23 mostra um exemplo de aplicação do método de Prewitt.

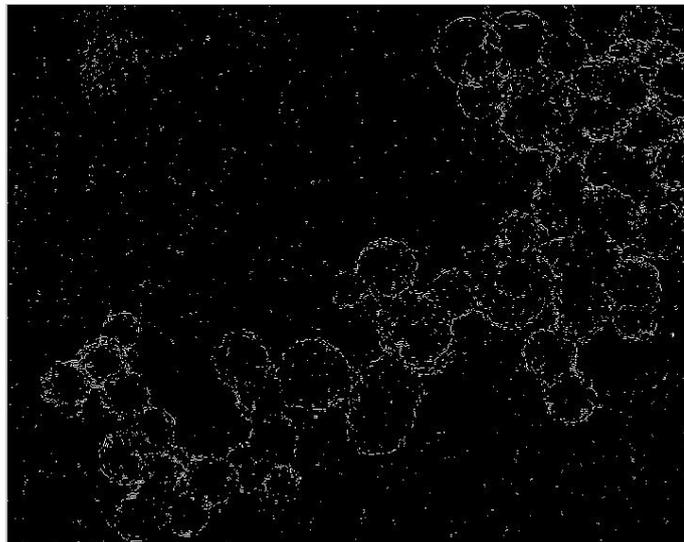


Figura 23. Método Prewitt aplicado na Figura 21

É verificado que os objetos de interesse não ficaram segmentados. Isso ocorreu porque o filtro de Prewitt necessita que os componentes estejam com seus pontos de borda bem definidos, o que não é o caso das imagens deste problema.

3.2.2 Método de Sobel

Este método (SOBEL, 1949) trabalha na segmentação através de reconhecimento de bordas. O filtro de Sobel calcula o gradiente da intensidade da imagem em cada ponto, dando a direção da maior variação de intensidade nesta direção. Desta forma, obtem-se uma noção de como varia a luminosidade em cada

ponto, de forma mais suave ou abrupta. Desta forma consegue-se estimar a presença de uma transição claro-escuro e qual a sua orientação.

Assim, consegue-se estimar a presença de uma transição e qual a orientação desta. A Figura 24 mostra o resultado da aplicação do método de Sobel.

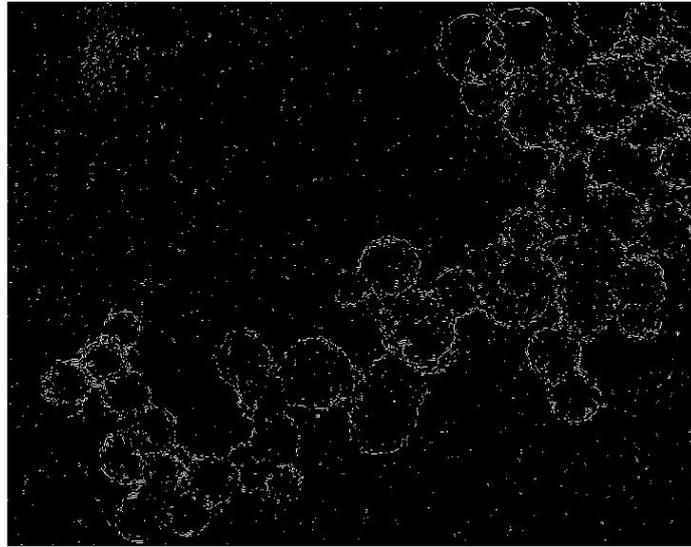


Figura 24. Aplicação do método de Sobel na Figura 21

Pode-se verificar grande semelhança com o resultado da aplicação do método de Prewitt. Os resultados obtidos são também

Capítulo 4 Experimentos e Resultados

Este capítulo objetiva descrever os experimentos realizados como também analisar os resultados obtidos.

4.1 Descrição dos experimentos

Os experimentos realizados aconteceram com a aplicação de métodos a partir das imagens originais dos nano componentes. Algumas sequências de aplicações de métodos e filtros foram utilizadas para a solução do problema. A escolha dessas sequências foi realizada com base nos principais métodos utilizados para resolver problemas com características semelhantes. Para cada sequência foram calculados a quantidade de círculos, a média dos raios e o desvio padrão dos círculos. Cada sequência apresenta também, após os resultados, uma tabela com os valores dos parâmetros de entrada e os valores obtidos.

4.1.1 Sequência A

Esta sequência seguiu a seguinte ordem de aplicação, de acordo com a Figura 25:



Figura 25. Diagrama da Sequência A

A Figura 26 exibe o resultado da sequência C e a tabela 1 os parâmetros dos métodos.

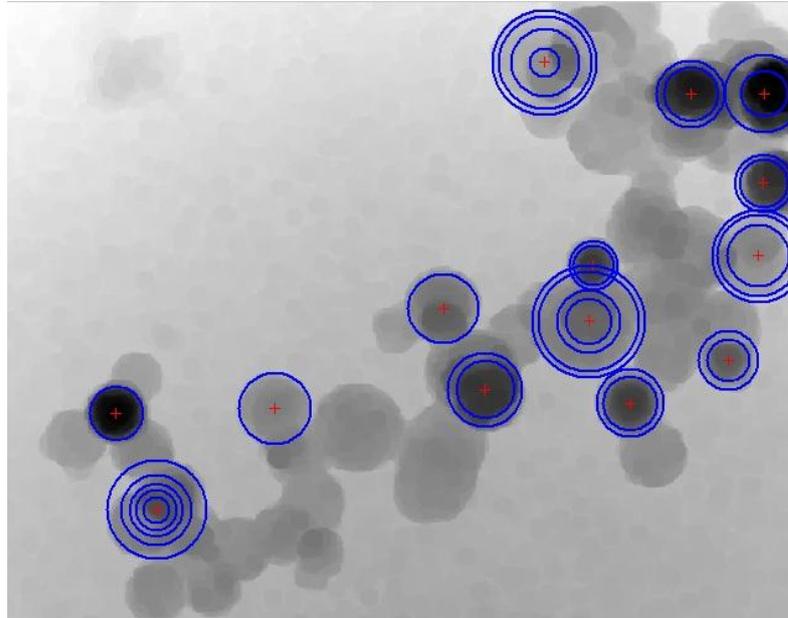


Figura 26. Resultado da sequência A

Tabela 1. Parâmetros de entrada da Figura 26

Tresholding do Filtro Prewitt	Elemento Estruturante da Dilatação	Elemento Estruturante da Erosão	Janela do Filtro de Média	Valores de raio aceitos
Calculado automático	Formato de bola, 3 x 3 <i>pixels</i>	Formato de disco com raio 7 <i>pixels</i>	3 x 3	De 10 a 50

Na sequência A foram reconhecidos 33 círculos, com média de raio 33,4 com desvio padrão de 11,11.

4.1.2 Sequência B

Esta sequência seguiu a seguinte ordem de aplicação, de acordo com a Figura 27.

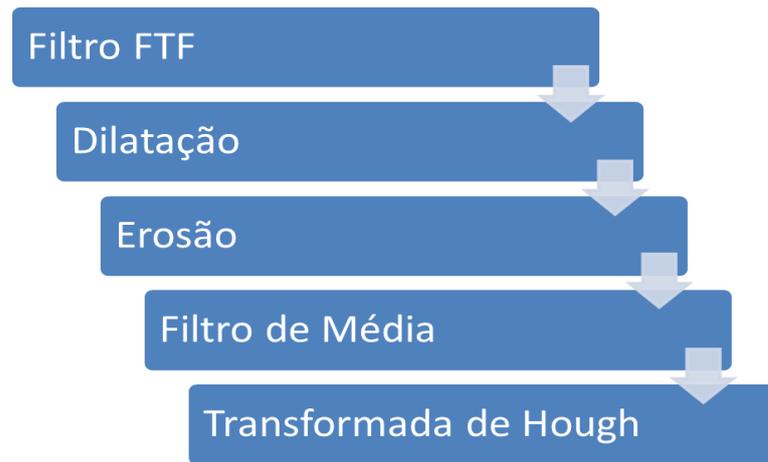


Figura 27. Diagrama da Sequência B

A Figura 28 mostra o resultado obtido pela sequência B com os valores de parâmetros da Tabela 2.

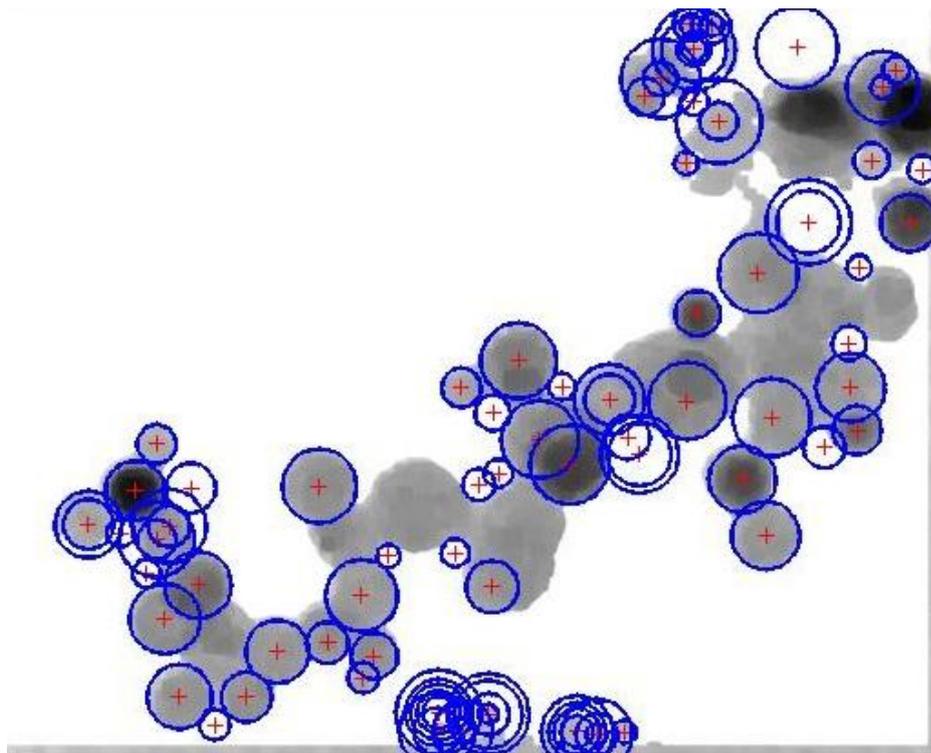


Figura 28. Resultado da Sequência B

Tabela 2. Parâmetros de entrada da Figura 28

Tresholding do	Elemento Estruturante da	Elemento Estruturante da	Janela do Filtro de	Valores de
----------------	--------------------------	--------------------------	---------------------	------------

Filtro FTF	Dilatação	Erosão	Média	raio aceitos
20.000	Formato de bola, 3 x 3 <i>pixels</i>	Formato de disco com raio 7 <i>pixels</i>	3 x 3	De 10 a 50

Neste conjunto de parâmetros foram encontrados 94 círculos com média de raios igual a 28,3 *pixels*, com desvio padrão de 11,13 *pixels*. Pode-se notar que em algumas áreas das imagens que contêm vários círculos não foram encontrados círculos. Isso ocorreu por causa da existência de um conjunto de nano componentes que não possuía círculos que contivessem raios dentro do valor dos parâmetros aceitos. É constatado também que o algoritmo falhou em outros pontos que visivelmente seriam de fácil detecção dos círculos. A sequência também falhou na área que possui ruído, aumentando em muito a quantidade de círculos encontrados, de maneira que foram obtidos 54,2% de falso-positivos.

4.1.3 Sequência C

Esta sequência seguiu a seguinte ordem de aplicação, de acordo com a Figura 29:

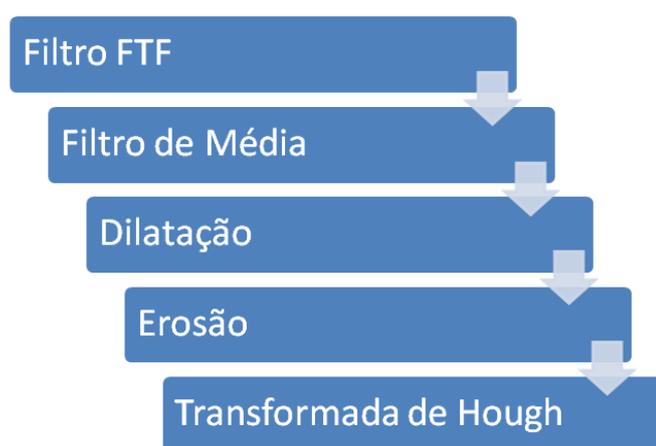


Figura 29. Diagrama da Sequência C

A Figura 30 exibe o resultado da sequência C e a Tabela 2 os parâmetros dos métodos.

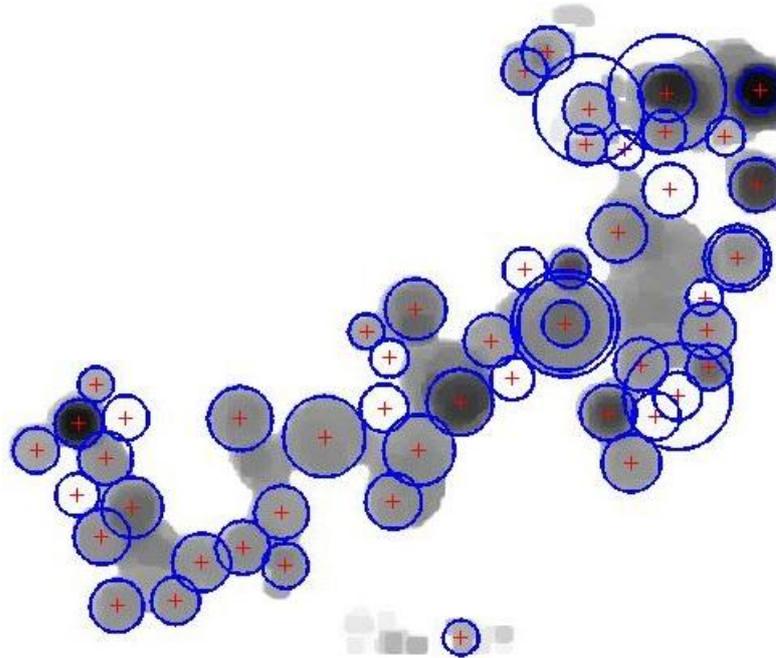


Figura 30. Resultado da sequência C

Tabela 3. Parâmetros de entrada da Figura 30

Tresholding do Filtro FTF	Elemento Estruturante da Dilatação	Elemento Estruturante da Erosão	Janela do Filtro de Média	Valores de raio aceitos
20.000	Formato de bola, 3 x 3 pixels	Formato de disco com raio 7 pixels	3 x 3	De 10 a 50

Foram encontrados 56 círculos, com média de 21,85 e desvio padrão de 7,38. Os valores dos parâmetros são os mesmos. A diferença para a sequência B foi a troca da aplicação do filtro de média. Nesta sequência este método veio após a aplicação do filtro FTF (na sequência A ele vinha após a erosão). É bastante visível a diferença de resultados obtidos da sequência B para a sequência C. Considerando que a única diferença entre elas é simplesmente a troca de posição da aplicação de um único método. Isso mostra a dificuldade em generalizar a aplicação de métodos e filtros em PDI. Na Figura 30 pode-se notar a grande diminuição da influência do ruído inferior, existente na Figura 21. Foram detectados, também, círculos

sobrepostos. Esta sequência encontrou 28,5% de falso-positivos. A massa de círculos onde não foram detectados círculos na sequência A, também não foram encontrados na sequência B, porém, mesmo a olho nu, a detecção dos círculos nessa massa de nano cristais poderia ser súbia.

4.2 Análise dos Resultados

De acordo com as sequências apresentadas, foi verificado que a sequência C apresentou melhores resultados. Alguns resultados de outros experimentos, com outros métodos e parâmetros, foram omitidos por terem seus resultados considerados menos relevantes para o problema ou sem contribuição significativa.

Os melhores resultados foram obtidos a partir de pesquisas de métodos e sequências de maneira empírica e/ou orientada por especialistas, de maneira que ficou clara a potencialidade e também complexidade da área de PDI.

Os resultados obtidos demonstraram a importância da etapa de pré-processamento das imagens para tratar a escala em que se encontraram. Esta etapa é de fundamental importância, pois mesmo que sejam cristais iguais, só que em escalas diferentes, as imagens possuem características bastante diferentes. Por exemplo, uma imagem em uma escala menor, os limites de raio dos círculos aceitos, serão menores. O Apêndice A apresenta imagens de placas de nano componentes em várias escalas.

Diante do que foi exposto nesse capítulo, ficou clara a necessidade de um sistema que possua a capacidade de se adaptar automaticamente a cada imagem adquirida.

Capítulo 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Nesta monografia foram estudadas alternativas para um sistema de Processamento Digital de Imagens, composto por uma aplicação de uma sequência de métodos, para a detecção, reconhecimento e contagem de círculos em imagens de microscopia de alta resolução de nano componentes. Para esta solução foi criado um filtro para remoção de ruído, chamado simbolicamente de Filtro FTF, para detecção e remoção de ruídos e elementos de fundo das imagens.

O uso desse sistema objetiva diminuir o tempo de contagem dos nano componentes, diminuir a probabilidade de erro na contagem, avaliar de maneira mais precisa se os nano cristais são aceitáveis ou não e calcular de maneira precisa as dimensões de cada nano cristal.

Os resultados obtidos pela aplicação de várias sequências dentro do sistema deixaram claro que esse sistema ainda possui algumas classificações que não são verdadeiras, porém detectando e reconhecendo de maneira satisfatória a maioria dos nano componentes presentes nas imagens. Isto nos leva a concluir que esse sistema pode facilmente trabalhar auxiliando um humano no processo de avaliação das imagens, alcançando os objetivos originalmente desejados.

Com isto, o sistema proposto possui um grande potencial de pesquisa, uma vez que existem poucas ferramentas voltadas para este fim, fazendo com que este sistema possa se tornar referência para futuras aplicações e adaptações.

5.1 Contribuições

Foi realizado um estudo acerca de maneiras de resolver o problema e foi desenvolvido um filtro para segmentação baseado em objetos de interesse vizinhos.

Foram obtidos os seguintes resultados:

-
1. Filtro para segmentação da imagens, removendo objetos de fundo, baseado em objetos vizinhos;
 2. Sequência de aplicação de métodos, capazes de detectar e reconhecer nano cristais em imagens digitais de microscopia de alta resolução, auxiliando na avaliação das placas e dos nano componentes;

5.2 Discussão

Uma das principais dificuldades encontradas neste trabalho foi o grande volume de material teórico a ser pesquisado necessário para a criação dos métodos aplicados. Além disso, a falta de tempo foi outro fator que dificultou a produção deste trabalho, uma vez que o mesmo foi produzido em paralelo com outras disciplinas, projetos na empresa onde trabalho e atividades exta-pesquisa e extra-curriculares.

Com o projeto, ficou evidente a complexidade na construção de sistemas de PDI, uma vez que cada problema exige uma solução que pode ser muito diferente de problemas aparentemente parecidos.

Com as grandes variações de resultados, originidas por pequenas mudanças feitas nas sequências, ficou claro a necessidade de estudo e pesquisas de outras abordagens, por exemplo que utilizem inteligência computacional, para tentativa de refinamento do sistema.

5.3 Trabalhos Futuros

- Para trabalho futuro, é sugerido inserir no sistema uma técnica de Inteligência Computacional (IC), tornando o sistema adaptativo às variações das imagens, uma vez que pequenas alterações nas abordagens geraram grandes diferenças nos resultados obtidos. Uma abordagem de IC tornaria o sistema capaz de aprender com os resultados obtidos a partir das variações.

-
- Além disso, é sugerido também inserir no sistema novos métodos capazes de reconhecer automaticamente novas formas de nano componentes, como nano cristais em forma de triângulo.
 - É sugerido também aperfeiçoar o Filtro FTF, pesquisando sua aplicação em outras classes de imagens e em outras classes de segmentação e ruídos, podendo desensolver um método que seja satisfatório para segmentação com intensidades semelhantes aos pontos de objetos.
 - É sugerido também a criação de um hardware específico para ser aplicado ao fim da linha de produção dos nano componentes, diminuindo o tempo de resposta do sistema e aumentando o desempenho na avaliação das imagens.
 - Experimentos mais exaustivos que permitam chegar a conclusões estatisticamente válidas.

Bibliografia

FILHO, Ogê M.; NETO, Hugo V. **Processamento Digital de Imagens**. Brasport, 1999.

GONZALEZ, Rafael C.; Woods, Richard E. **Processamento Digital de Imagens**. Pearson, 2010. 3ed.

HOUGH, P. V. C. **Method And Means For Recognizing Complex Patterns**. U. S. Patent 3,069,654.

MCFARLANE, M. D. **Digital Pictures Fifty Years Ago**. Proc. IEEE, v. 60 n. 7, 768-770 p.

MÜLLER, Daniel N.; DARONCO, Everaldo L. **Filtros Espaciais Passa-Baixa**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Maio de 2010.

RUSS, J. C. **The Image Processing handbook**. Universidade da Carolina do Norte. CRC Press, 6ed.

SCHIERNING, G.; CLAUDIO, T.; THEISSMANN, R.; STEIN, N.; PETERMANN, N.; BECKER, A.; DENKE, J.; WIGGER, H.; HERMANN, R. P.; SCHMECHEL, R. **Nanocrystalline Silicon Compacted by Spark-Plasma Sintering: Microstructure and Thermoelectric Properties**. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. vol 1267, 9-14. 2010.

SOBEL, I. E. **Camera Model e Machine Perception**. Dissertação de Ph.D. Universidade de Standford.

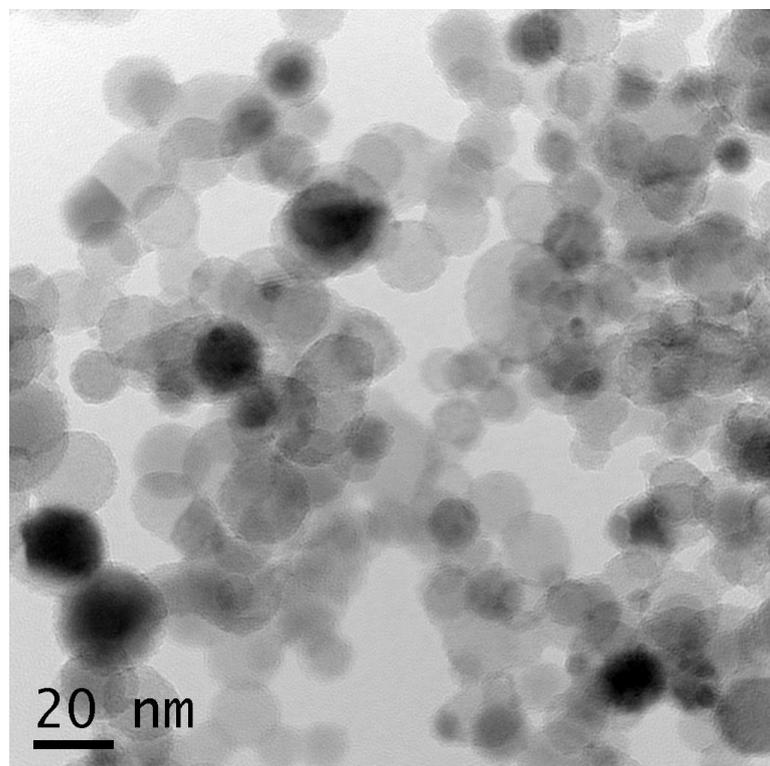
WONG, Ban P. **Nano-CMOS Circuit And Physical Design**. Wiley-Interscience, 2005.

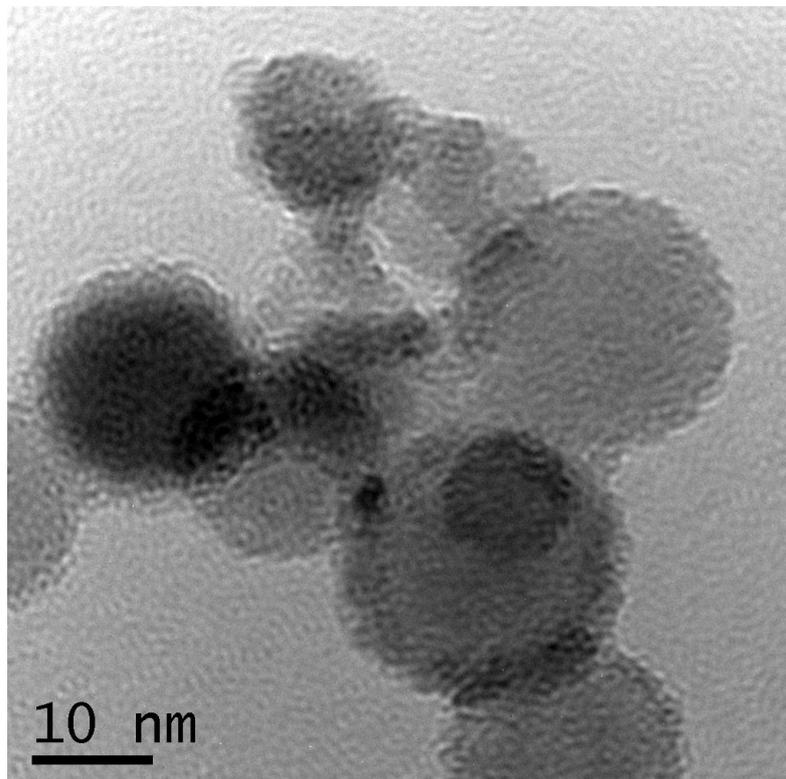
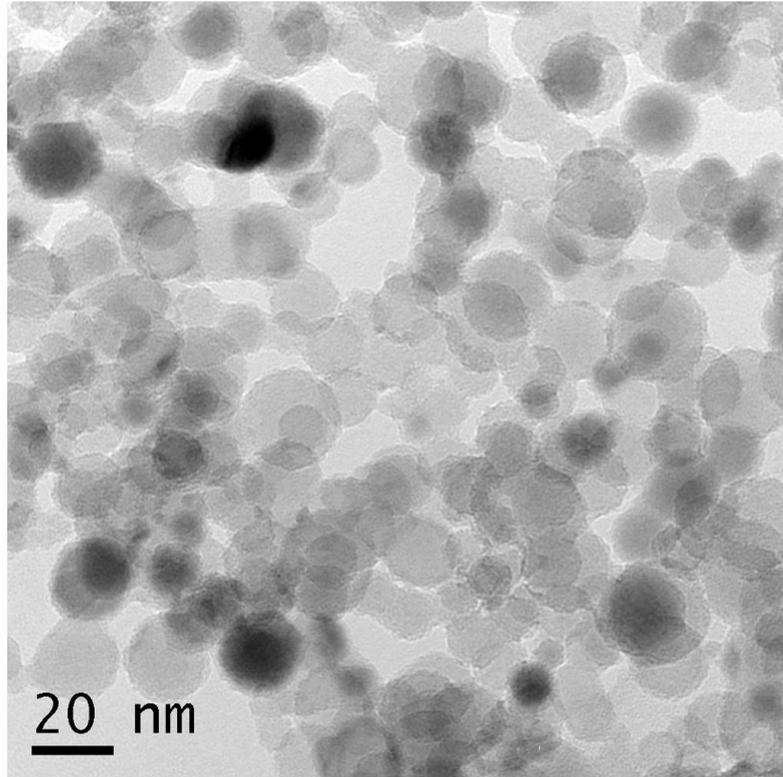
Apêndice A

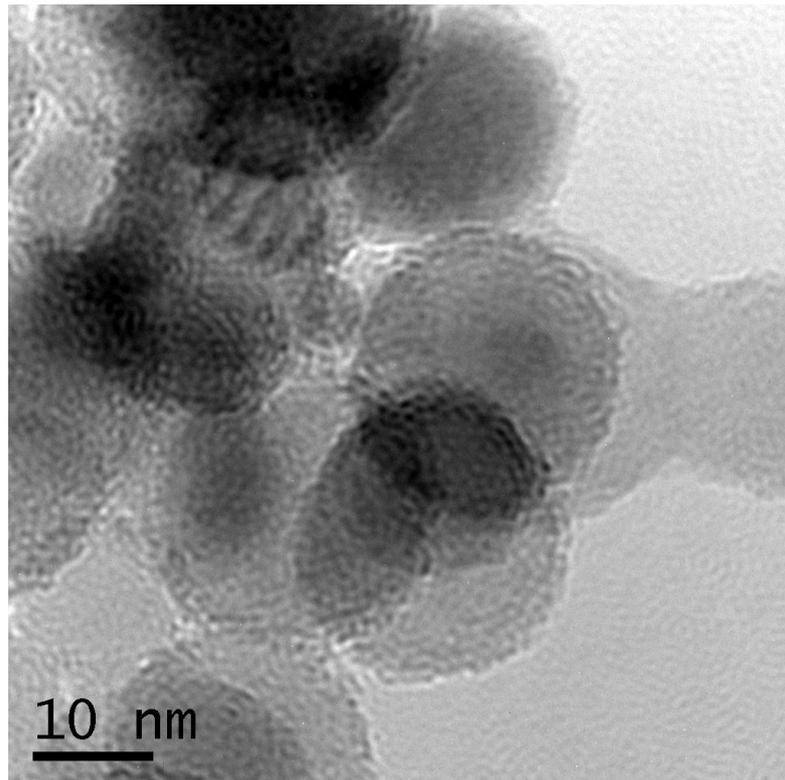
Exemplos de Placas

Abaixo estão três conjuntos de figuras para exemplificar a variabilidade de forma, escala e arranjos de nano partículas.

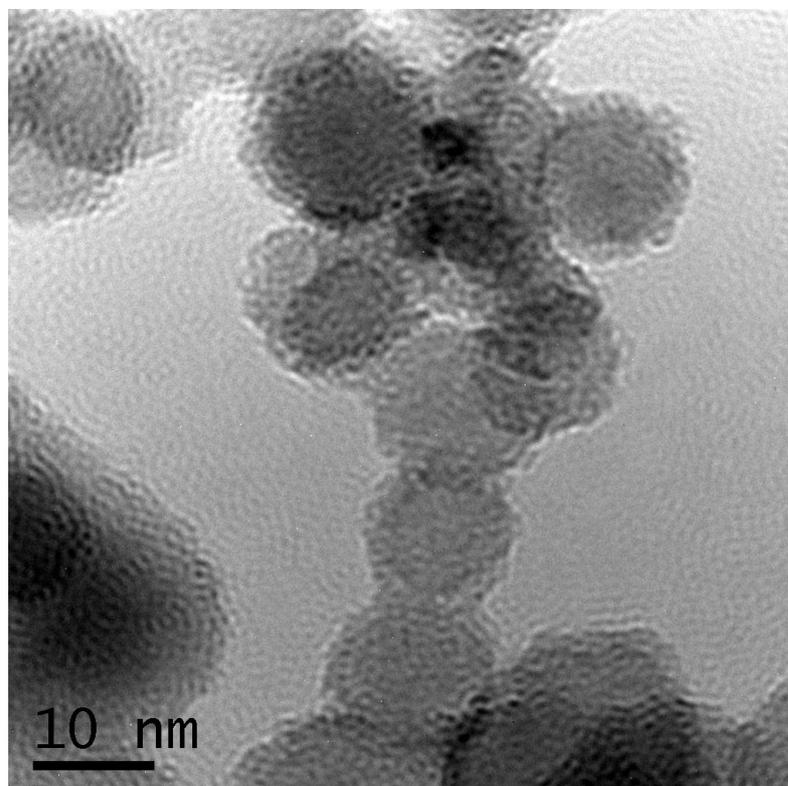
Abaixo exemplos do conjunto A.

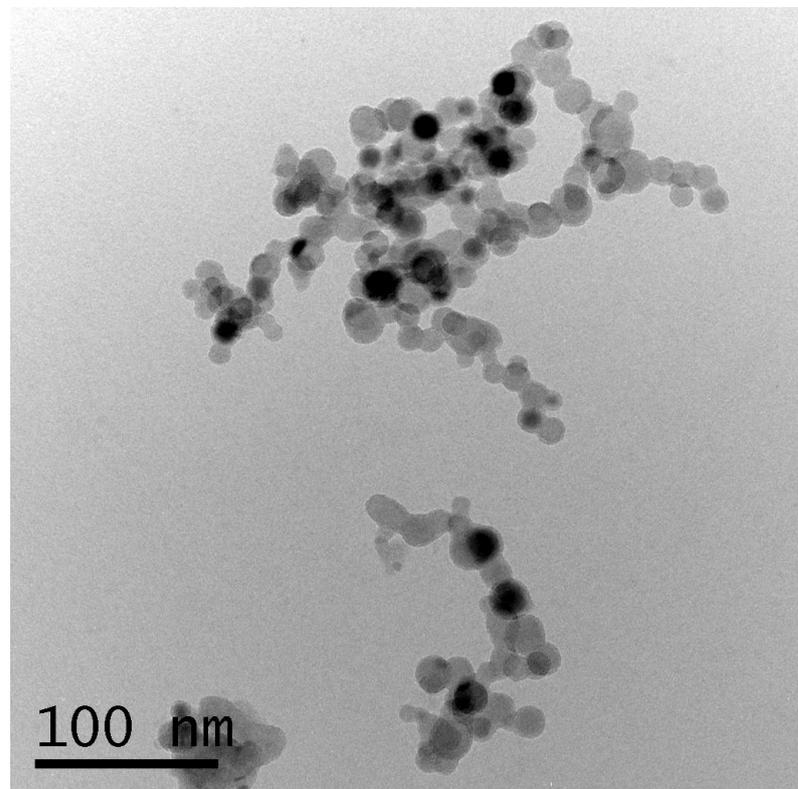
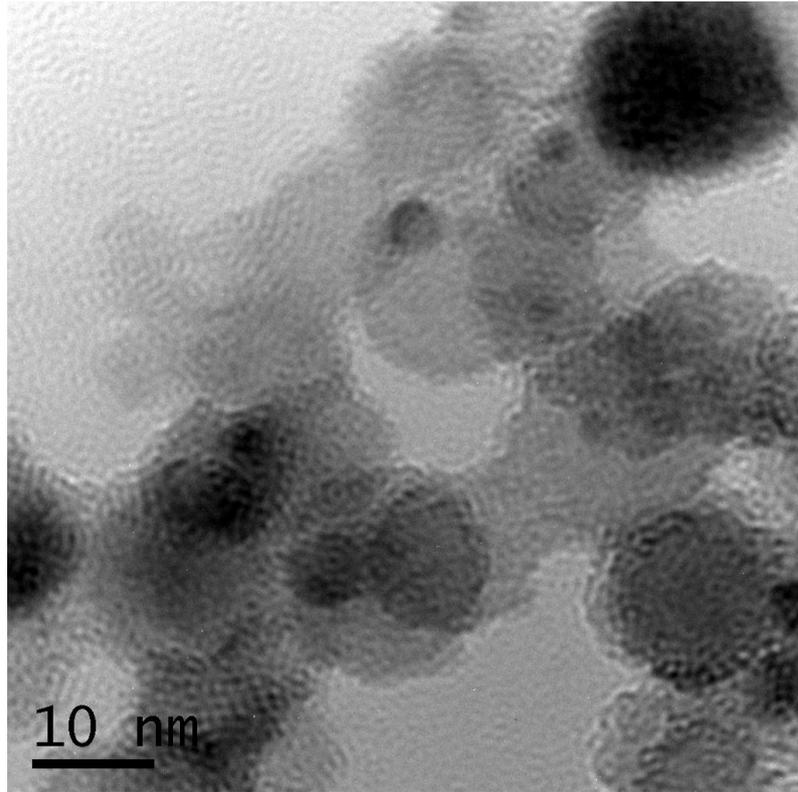


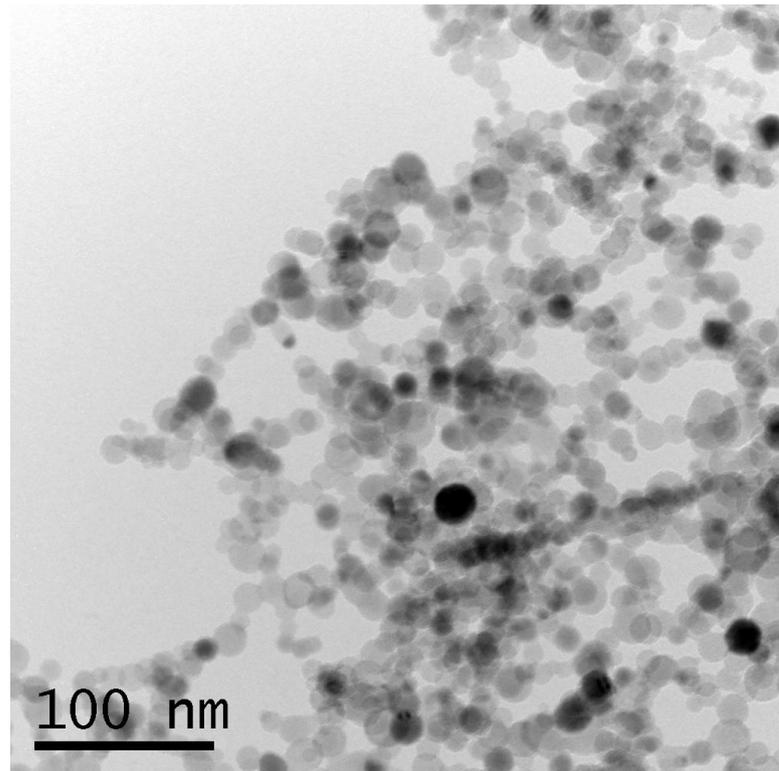




Abaixo exemplos do conjunto B.







Abaixo exemplos do conjunto C.

