

Ana Maria Gonçalves Fernandes

Correlacionador Óptico $4f$ – Alinhamento e Desempenho



Dissertação para obtenção de grau de Mestre em **Instrumentação e Microelectrónica**,
especialização em **Projecto de Sistemas de Instrumentação**, pela **Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra**

Coimbra, 11 de Outubro de 2002

RESUMO

O objectivo do presente trabalho consiste em caracterizar a redução do desempenho de um processador óptico $4f$ devida ao desalinhamento entre a TF do objecto e o filtro de referência, e em apresentar e discutir soluções que permitam minimizar esse efeito adverso.

Apresenta-se uma técnica desenvolvida, capaz de corrigir o efeito indesejável do desalinhamento em questão sob a acção de uma máscara adequada a introduzir no plano do objecto.

A máscara ideal seria realizada por um prisma de índice de refração variável ou (e) de ângulo de abertura também variável que, ao modular a fase do objecto, permitisse deslocar a sua transformada de Fourier no plano das frequências de forma a sobrepô-la exactamente com o filtro.

Na impossibilidade de implementar fisicamente este modulador ideal, apresentam-se e discutem-se soluções alternativas para possíveis máscaras de modulação realizáveis por alguns dos moduladores espaciais de luz (SLM) disponíveis no mercado.

ABSTRACT

The purpose of this work consists on characterizing the reduction in performance that hampers the $4f$ correlator, due to misalignment between the Fourier transform of the object and the reference filter. Solutions that allow overcoming this adverse effect are presented and discussed.

A technique capable of correcting this unwished misalignment effect, under the action of a proper mask that will be introduced in the object plan, is presented.

The ideal mask would be realized by a prism with adjustable refraction index or (and) adjustable aperture angle that, by modulating the object phase, could displace its Fourier transform in the frequency plane randomly, in order to make it perfectly superimposed with the filter.

As the ideal modulator, just outlined, is not yet physically realizable, alternate solutions for equivalent phase masks using available Spatial Light Modulators (SLM), are presented and discussed.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dirigir um agradecimento muito especial ao meu orientador Professor Doutor Carlos Correia, não só pelo desafio inicial proposto mas também por todo o apoio, paciência e confiança depositados, sem os quais a realização deste trabalho não teria sido possível.

Sem menosprezar o apoio de todos os amigos e colegas, nomeadamente os membros do Grupo de Electrónica e Instrumentação (GEI), ressalto um reconhecimento especial à minha amiga e colega Rita Costa Pereira pela sua presença constante, que tanto me ajudou a concluir este trabalho em tempo adequado, e ao amigo e colega Luís Artur Pereira pela prestabilidade e paciência singulares.

ÍNDICE

Resumo	2
Abstract	3
Agradecimentos	4
Índice	5
Lista de Acrónimos	7
Capítulo 1 – Introdução	8
1.1 - Processadores Ópticos.....	8
1.2 - Correlação.....	9
1.3 - Correlacionadores ópticos standard.....	10
Capítulo 2 – Caracterização do alinhamento	16
2.1 – Relação sinal ruído de um processador 4f.....	17
2.2 – Sinal Unidimensional.....	18
2.3 – Sinal Bidimensional.....	19
2.3.1 – Filtro de Fase.....	19
2.3.2 – Desalinhamento relativo ao tipo de objecto.....	23
2.3.3 – Desalinhamento em função da abertura relativa do objecto.....	25
2.3.4 - Desalinhamento relativo ao conteúdo espectral do objecto.....	26
2.3.5 – Desalinhamento relativo à resolução do SLM.....	28
2.4 – Síntese.....	29
Capítulo 3 – Modulação de fase	30
3.1 – Técnica de alinhamento por modulação de fase.....	31
3.2 – Máscara ideal.....	32
3.2.1 - Posicionamento da TF do objecto no plano de frequências.....	33
3.2.2 - Resultado da correlação com modulação de fase.....	35
3.2.3 – Multi objectos.....	36
3.3 - Alinhamento automático.....	38

Capítulo 4 – Síntese de Máscaras	40
4.1 – SLM – Descrição breve.....	40
4.2– SLM contínuo e só de fase.....	41
4.3– SLM binário e só de fase.....	44
4.4– SLM de amplitude.....	45
4.5 – Discussão de resultados.....	46
Capítulo 5 – Conclusão e Trabalho Futuro	48
5.1 – Conclusão.....	48
5.2 – Trabalho Futuro.....	49
Referências	51
Apêndices	54

LISTA DE ACRÓNIMOS

λ	Comprimento de Onda
fft.....	Transformada de Fourier rápida (função do <i>MATLAB</i>)
FWHM.....	Largura a meia altura
JTC.....	Correlacionador de Transformada Conjunta
LCSLM.....	Modulador Espacial de Luz de Cristais Líquidos
rms.....	Valor Eficaz
SLM.....	Modulador Espacial de Luz
TF.....	Transformada de Fourier
VLC.....	Correlacionador de <i>Vanderlugt</i>

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Ao longo da História, o processamento óptico de sinal ou de imagem, baseado em técnicas de análise de Fourier, tem vindo a revelar-se como um marco fundamental para a resolução simples de problemas aparentemente complexos quando utilizados outros tipos de processadores^[1].

Como limitação, na generalidade, os sistemas ópticos sofrem de uma elevada sensibilidade relativa ao alinhamento das suas componentes. O alinhamento deve ser o mais rigoroso possível para que os resultados a obter sejam considerados satisfatórios^[1].

No leque de processadores bastante sensíveis ao alinhamento estão englobados alguns dos correlacionadores ópticos, nomeadamente o correlacionador óptico 4f^[1]. Entre outros parâmetros, o seu desempenho está muito dependente do alinhamento existente entre as componentes presentes no plano de frequências – TF do objecto e filtro de referência.

Motivados pela necessidade de desenvolver fórmulas capazes de reduzir os efeitos indesejáveis do desalinhamento no 4f, desenvolveu-se a técnica apresentada neste trabalho. Esta técnica consiste em compensar o desalinhamento mecânico existente entre a TF do objecto e o filtro no plano de frequências do correlacionador 4f com a introdução de uma máscara de modulação no plano do objecto. Para tal, há que estudar padrões possíveis e seleccionar quais os mais adequados para realizar a máscara em questão.

Neste trabalho começa-se por apresentar uma breve revisão de algumas noções fundamentais do processamento óptico (capítulo I).

No capítulo II é mostrado um estudo efectuado com o intuito de caracterizar a resposta do correlacionador 4f em função do desalinhamento.

A técnica de compensação do alinhamento do correlacionador 4f, baseada numa máscara de modulação ideal, é apresentada no capítulo III.

No capítulo IV sintetizam-se algumas máscaras reais que, embora menos eficazes quando comparadas com a máscara ideal, são capazes de resolver eficientemente o problema do alinhamento.

1.1 - Processadores Ópticos

Por processador óptico entende-se todo o sistema que recorre a meios ópticos para processar informação. O portador de informação num processador óptico é o fóton, o que

permite alcançar uma considerável velocidade de processamento, independentemente do nível de complexidade do sinal a processar. Esta é uma das principais vantagens que justificam o elevado e crescente interesse neste tipo de processadores^[1].

Vários processadores ópticos têm vindo a ser desenvolvidos visando, desde a simples manipulação do espectro da imagem, como é o caso do célebre microscópio de contraste de fase que permitiu galardoar o físico Holandês Frits Zernike com o prémio Nobel da Física (1953)^[2], à resolução de problemas que envolvem uma complexidade de operações considerável (caso dos correlacionadores ópticos)^[1,3].

Os sistemas ópticos podem ser incoerentes ou coerentes, dependendo do tipo de iluminação utilizada. Enquanto um sistema coerente é linear relativamente à amplitude do campo, um sistema incoerente é linear com o quadrado da amplitude da distribuição de campo (energia). Os sistemas incoerentes são mais simples de realizar (menos sensíveis ao alinhamento e às manchas de poeira nos componentes, por ex.). Por outro lado não apresentam um plano de frequências fácil de manipular como os dos sistemas coerentes, com os quais é possível realizar operações, nomeadamente de filtragem, pela simples manipulação da quantidade complexa resultante da TF obtida por uma lente^[1].

Neste trabalho são apenas considerados sistemas ópticos com iluminação coerente.

Considera-se a correlação como sendo o algoritmo mais importante do processamento óptico, e a sua implementação bancada óptica é conceptualmente simples^[1].

Por este motivo, para o desenvolvimento da técnica de alinhamento apresentada toma-se como modelo um processador óptico coerente 4f, que executa o algoritmo da correlação.

1.2 - Correlação

A correlação é um algoritmo matemático capaz de comparar dois sinais, e cujo resultado é função do grau de semelhança entre eles. Em termos matemáticos a correlação ($c_{fg}(x, y)$) entre duas funções bidimensionais pode ser definida pela seguinte equação;

$$c_{fg}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(\varepsilon, \eta) \cdot g^*(\varepsilon - x, \eta - y) d\varepsilon d\eta \quad (1.1)$$

onde $f(\xi, \eta)$ e $g(\xi, \eta)$ representam as funções a correlacionar, e (x, y) a decalagem com que se pretende fazer a avaliação de 1.1^[4,5].

Os sistemas ópticos distinguem-se por permitirem o acesso ao seu plano das frequências, e nele realizar operações^[5], como é o caso dos correlacionadores ópticos.

Chama-se correlacionador óptico ao tipo de processadores vocacionados para efectuar correlação. Estes, para além de operarem literalmente à velocidade da luz reproduzem, com uma quantidade reduzida de componentes ópticos, um correlograma bastante inteligível na saída.

Não considerando a limitação imposta ao tempo de leitura por parte do detector colocado à saída, a taxa de correlações obtidas por unidade de tempo depende somente do rapidez com que se consegue operar a renovação do objecto ou do filtro [6].

A principal aplicação dos correlacionadores ópticos é o reconhecimento de padrões [7, 8].

Tendo sido as aplicações militar as pioneiras na sua utilização (determinação de trajetórias, segurança) [9], os correlacionadores ópticos servem actualmente num elevado número de outras áreas nomeadamente; aplicações industriais (robótica, controlo de qualidade) [9], aplicações médicas (detecção de células específicas em sistemas biológicos [9], velocidade do fluxo sanguíneo e deslocação de tecido [10], confirmação de cancro cervical [11], detecção de HIV-1 RNA por sequência de ácido nucleico usando espectroscopia de correlação por fluorescência [12]), sistemas de radar [5], reconhecimento de imagem (faces, caracteres) [13], sistemas de segurança (bancos) [13], telecomunicações [13], entre muitas outras.

O crescente número de aplicações baseadas em correlação, nomeadamente em aplicações médicas e segurança suscitou inclusive o aparecimento de uma nova sub-área, a biometria.

Na secção seguinte descrevem-se os modelos de correlacionadores ópticos considerados standard.

1.3 - Correlacionadores ópticos standard

O mais básico e pioneiro de todos os correlacionadores ópticos é o chamado correlacionador 4f, representado esquematicamente na figura 1.1;

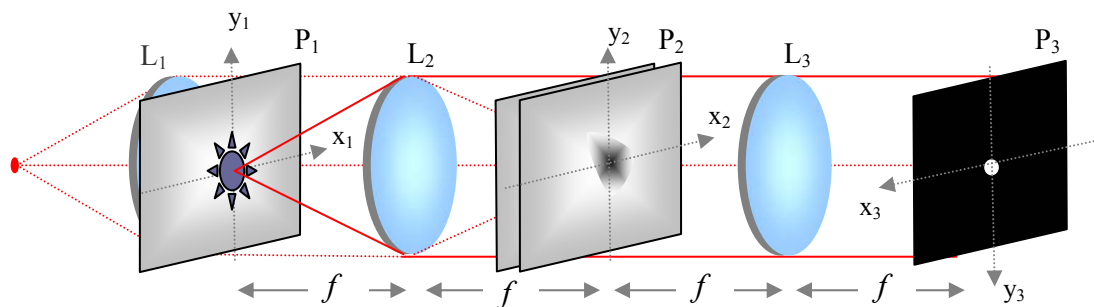


Figura 1.1: Esquema básico de um correlacionador 4f [1, 14].

Neste correlacionador distinguem-se 3 planos essenciais. O plano P₁ contém o objecto a correlacionar. P₂ é o plano onde se forma a TF do objecto, $F(p, q)$, e por esta razão é designado por plano das frequências ou de Fourier. É neste plano que se realiza a operação fundamental da multiplicação (expressão (1.2));

$$F(p, q) \times G^*(p, q) \tag{1.2}$$

em que $G^*(p, q)$ é o conjugado da TF de $g(\xi, \eta)$. Esta operação é realizada pela simples interposição de uma transparência, designada por filtro contendo informação de $G^*(p, q)$.

Em P_3 , plano final ou de saída, forma-se, por acção da lente L_3 , a TF do produto em 1.2 que representa (teorema da correlação) a correlação entre $f(\xi, \eta)$ e $g(\xi, \eta)$, tal como foi definida na expressão 1.1.

Geralmente, se o objecto e a referência forem iguais forma-se em P_3 um único ponto luminoso que se costuma chamar *pico de correlação*. O número de picos presentes no plano de saída é igual ao número de padrões do objecto iguais ao da referência $g(\xi, \eta)$ ^[1, 14].

A localização destes picos no plano de saída reproduz exactamente a posição dos padrões em P_1 ; o algoritmo é pois sensível à posição^[1].

Relativamente às lentes esquematizadas, L_1 serve apenas para colimar, não intervindo no processamento, e L_2 e L_3 são lentes transformadoras de Fourier^[1, 14].

Na prática, a implementação do filtro conjugado no processador 4f é uma tarefa impossível de realizar, caso não haja um dispositivo capaz de reproduzir para o sistema a sua informação complexa.

Para resolver este problema, em 1964 Anthony Vanderlugt, sugeriu uma técnica holográfica de síntese deste filtro complexo. A técnica encontra-se representada na figura 1.2;

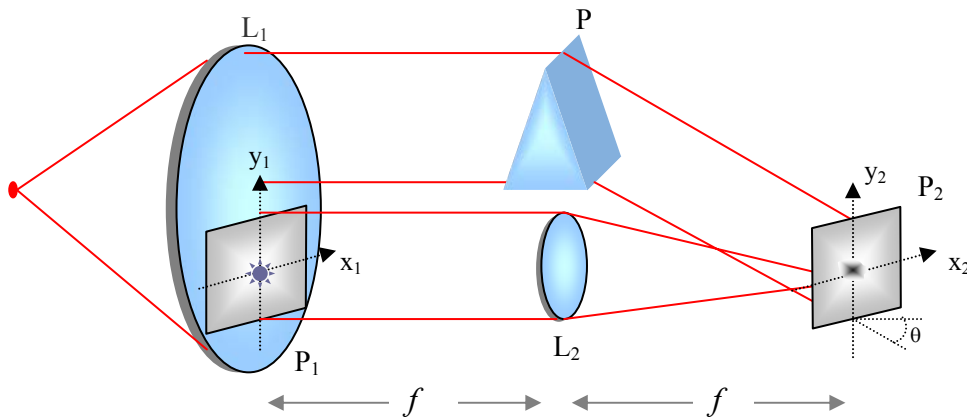


Figura 1.2: Esquema básico da construção do filtro de Vanderlugt^[1, 5, 15].

O filtro é conseguido pela interferência em P_2 da TF da imagem de referência presente em P_1 (obtida pela lente transformadora de Fourier L_2) com a distribuição de campo deflectido de um ângulo θ por interacção do prisma (P)^[1, 5, 15].

A expressão para o filme holográfico resultante em P_2 pode ser representada da seguinte forma (equação 1.3)^[1];

$$I(x_2, y_2) = \left| r_0 \exp(-j2\pi \frac{\sin \theta}{\lambda} y_2) + \frac{1}{\lambda f} H(\frac{x_2}{\lambda f}, \frac{y_2}{\lambda f}) \right|^2 \quad (1.3)$$

O primeiro membro da expressão 1.3 representa a distribuição de campo devolvida pelo prisma e o segundo a TF da referência. As quantidades λ e r_0 representam o comprimento de onda e a amplitude da onda plana incidente^[1].

O padrão de interferência assim obtido é reproduzido numa transparência, cuja transmitância é proporcional à intensidade I expressa pela equação 1.3, a qual é posteriormente introduzida no plano de frequências de um processador 4f convencional (plano P_2 da figura 1.1)^[1, 15].

Este tipo processador, baseado em técnicas holográficas para a construção do filtro, é denominado por correlacionador de *Vanderlugt* (VLC)^[1, 5, 15].

O correlograma no plano de saída (x_3, y_3) do VLC é proporcional à expressão 1.4^[1];

$$\begin{aligned}
 U_3(x_3, y_3) \propto & r_0^2 g(x_3, y_3) + \frac{1}{\lambda^2 f^2} \left[h(x_3, y_3) \otimes h^*(-x_3, -y_3) \right] \\
 & + \frac{r_0}{\lambda f} \left[h(x_3, y_3) \otimes g(x_3, y_3) \otimes \delta(x_3, y_3 + \alpha \lambda f) \right] \\
 & + \frac{r_0}{\lambda f} \left[h^*(-x_3, -y_3) \otimes g(x_3, y_3) \otimes \delta(x_3, y_3 - \alpha \lambda f) \right]
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

com $\alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda}$.

Ao contrário de um processador 4f básico, a energia no plano de saída de um VLC encontra-se distribuída não por uma mas por três zonas distintas. Na análise feita à equação 1.4 conclui-se que o terceiro termo corresponde ao resultado da convolução da imagem do objecto (g) com o filtro de referência (h), centrado nas coordenadas $(0, -\alpha \lambda f)$ do plano (x_3, y_3) , o quatro termo representa a correlação, centrada em $(0, +\alpha \lambda f)$ do plano (x_3, y_3) , entre as mesmas quantidades, e, o primeiro e segundo termo encontram-se centrados na origem do plano (x_3, y_3) e não apresentam utilidade significativa nas operações de filtragem^[1, 15].

Esquemáticamente as três zonas presentes na saída do VLC podem ser representadas da seguinte forma (figura 1.3);

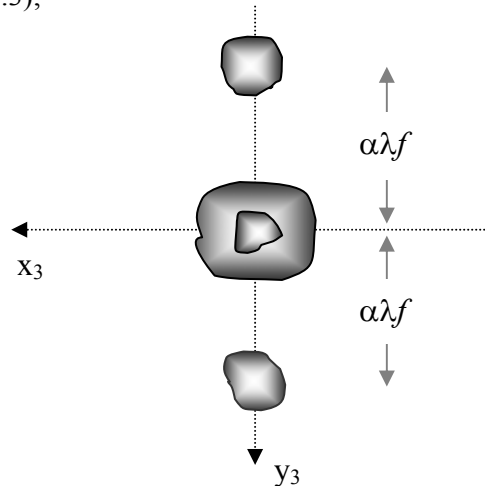


Figura 1.3: Localização dos vários termos no plano de saída do VLC^[1].

De acordo com a figura, verifica-se que a separação entre as zonas centrais e as duas extremas é função da deflexão provocada pelo prisma na distribuição de campo (função do parâmetro α). Para que o pico de correlação seja observável (não se sobreponha com as zonas centrais nem saia fora dos limites do detector) é crucial a escolha adequada deste parâmetro ^[1].

Um outro tipo de correlacionador óptico comum é o chamado correlacionador de transformada conjunta (JTC). Encontra-se esquematicamente representado na figura 1.4 ^[1, 16];

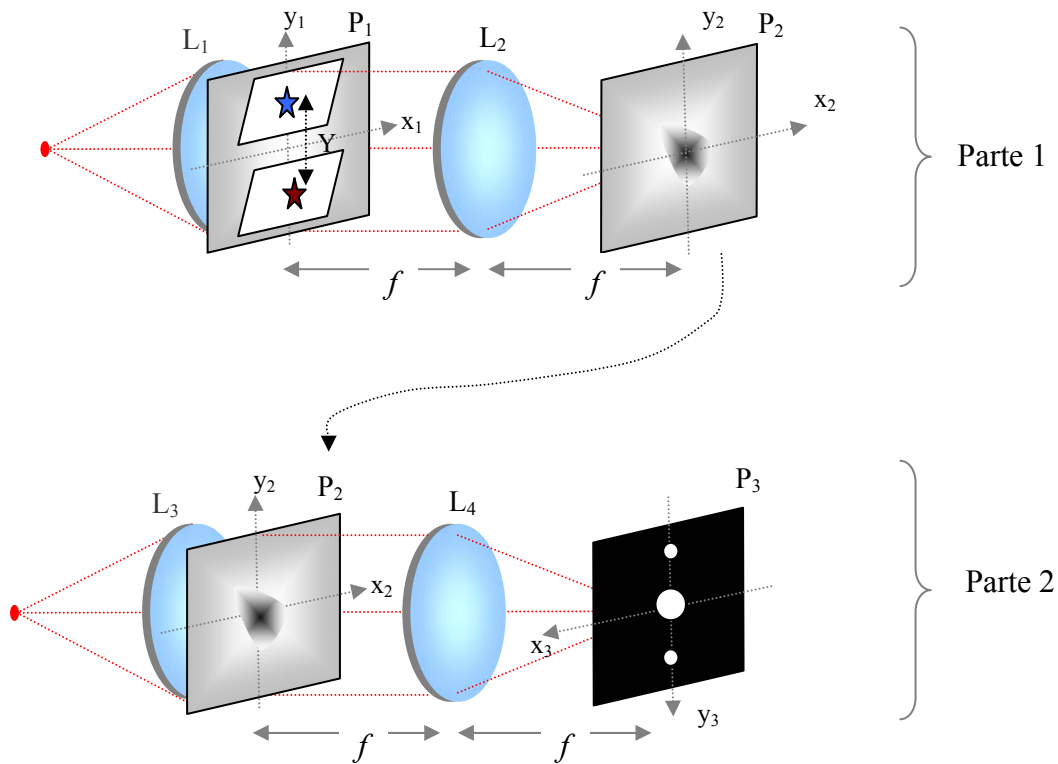


Figura 1.4: Representação esquemática do JTC ^[1, 16].

Neste caso o objecto e a referência são colocados no mesmo plano (P_1). Verifica-se que o JTC é formado por duas partes distintas (parte 1 e parte 2). Relativamente à parte 1, a lente transformadora de Fourier L_2 forma no plano P_2 a TF conjunta das imagens em P_1 . A intensidade da distribuição de campo em P_2 é captada por um detector, sendo, de seguida, novamente introduzida no segundo trajecto óptico (plano P_2 da parte 2). Da passagem da informação pela lente transformadora de Fourier L_4 , resulta o correlograma formado no plano P_3 ^[1, 16].

A distribuição de campo $U_3(x_3, y_3)$ resultante no plano de correlação de um JTC é definida pela equação 1.5 ^[1];

$$\begin{aligned}
 U_3(x_3, y_3) = & \frac{1}{\lambda f} \left[h(x_3, y_3) \otimes h^*(-x_3, -y_3) + g(x_3, y_3) \otimes g^*(-x_3, -y_3) \right] \\
 & + h(x_3, y_3) \otimes g^*(-x_3, -y_3) \otimes \delta(x_3, y_3 - Y) \\
 & + h^*(-x_3, -y_3) \otimes g(x_3, y_3) \otimes \delta(x_3, y_3 + Y)
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

onde g e h são as funções que representam as imagens do objecto e referência, Y a distância que separa o centro das duas imagens no plano P_1 , (x_3, y_3) as coordenadas no plano P_3 , λ o comprimento de onda do feixe utilizado e f a distância focal das lentes transformadoras de Fourier.

Pela análise dos termos presentes na equação 1.5, conclui-se que o JTC também apresenta três zonas distintas no plano de correlação, caso o objecto e a referência sejam idênticos. Também neste caso apenas o quarto termo, centrado em $(0, +Y)$, é relevante para a análise do correlograma. O parâmetro Y deve ser cuidadosamente escolhido para que no plano de correlação as zonas extremas se encontrem suficientemente isoladas^[1].

Os correlacionadores JTC e VLC são os mais utilizados em aplicações de reconhecimento de padrões^[17].

De uma análise comparativa entre o JTC e o VLC conclui-se que o VLC apresenta em termos gerais maior eficiência na detecção. O JTC é, no entanto, favorito nas aplicações em tempo real. Este é mais simples de implementar e não necessita da síntese prévia do filtro. O VLC requer uma maior precisão no alinhamento, nomeadamente entre a TF objecto e o filtro de referência no plano das frequências (deve ser superior a 0,01mm). Como no JTC o objecto e a referência se encontram no mesmo plano, o seu alinhamento não é tão crítico. Sabe-se também que o produto espaço – largura de banda é duas vezes superior no VLC^[1, 18].

Actualmente, com a presença dos chamados SLM (moduladores espaciais de luz) no mercado, é possível construir um correlacionador 4f eficaz, desprovido das limitações anteriormente apresentadas (introdução do filtro complexo ou só de fase no sistema). Os SLM são dispositivos electrónicos estimuláveis por uma tensão variável e permitem reproduzir electronicamente o conteúdo de um filme fotográfico. O mercado dos SLM, em crescente ascensão, oferece já uma vasta gama de escolha, desde SLM's só de amplitude (normalmente utilizados para colocar a imagem do objecto no processador), a SLM's só de fase ou SLM's complexos (ideais para reproduzir o filtro de referência)^[19].

O assunto relativo aos SLM's será referido posteriormente, neste trabalho.

A principal vantagem do processador 4f relativamente ao JTC e VLC encontra-se no plano de correlação. Enquanto que no 4f a correlação apresenta uma única zona onde se concentra grande parte ou mesmo toda a energia presente no sistema, tanto no VLC como no JTC a energia encontra-se distribuída por várias ordens de difracção (3 zonas distintas). Assim sendo, para além da reduzida complexidade do correlograma, a intensidade do pico de correlação de um 4f pode ser bastante superior. Este processador é também o que apresenta maior produto espaço – largura de banda do correlograma.

Pelas razões apresentadas, a análise do correlograma obtido por um 4f é muito mais simples, principalmente na presença de multi objectos (vários padrões presentes na mesma imagem).

As afirmações anteriores permitem justificar a preferência do correlacionador 4f como modelo para o desenvolvimento da técnica de alinhamento apresentada neste trabalho.

CAPÍTULO II

CARACTERIZAÇÃO DO ALINHAMENTO

Num sistema óptico um dos factores que contribui bastante para o sucesso dos resultados é a precisão do alinhamento. O olho humano, por si só, consegue alinhar um sistema óptico com uma precisão de milímetros. No caso do VLC, por exemplo, é exigido que o filtro esteja alinhado com uma precisão superior a 0,01mm, o que é impraticável a olho nu.

Quando o sistema exige rigor relativamente ao alinhamento é muitas vezes necessário recorrer a meios auxiliares. Para o efeito utilizam-se os chamados posicionadores micrométricos ou mesmo nanométricos, existentes no mercado^[20].

Mesmo depois do alinhamento inicial, o processador óptico 4f pode sofrer sucessivos desalinhamentos pela simples renovação do objecto ou filtro espacial, caso estes não sejam endereçados electronicamente. A mudança rápida do filtro permite diminuir o tempo de processamento e obter uma elevada taxa de aquisição à saída do sistema. Em contrapartida, os cuidados com o alinhamento tendem a reduzir, o que afecta a precisão dos resultados. Erros na centragem e rotação aleatória são, entre outros, bastante frequentes^[21, 22].

No caso de endereçamento electrónico, o problema do desalinhamento com a renovação do objecto ou filtro não se coloca, no entanto podem surgir ao longo do tempo erros de alinhamento provocados pelas agressões do meio, nomeadamente movimento, vibrações, alterações do gradiente de pressão e temperatura, entre outros.

Este capítulo dedica-se ao estudo comportamental de um processador 4f em função do grau de desalinhamento entre as componentes DC da TF do objecto e do filtro no plano de frequências.

Podem distinguir-se três tipos de desalinhamento; deslocamento lateral (decalagem dos pontos DC), longitudinal (focagem), ou inclinado relativamente ao eixo (quando as componentes não fazem um ângulo de 90° com o eixo)^[21].

Tomando em consideração a técnica de alinhamento a desenvolver, apenas se irá estudar problemas introduzidos com o desalinhamento lateral.

A forma mais prática e eficaz de analisar a dependência do espectro de correlação do processador 4f com o deslocamento lateral do filtro introduzido no plano das frequências é pela relação sinal ruído (SNR) do correlograma^[21, 23].

2.1 – Relação Sinal Ruído de um processador 4f

A expressão que em geral é usada para calcular a relação sinal-ruído (SNR) é ^[24]

$$SNR = 20 \left(\log \frac{signal}{noise} \right) dB \quad (2.1)$$

onde *signal* é o valor eficaz (rms) da função tomada como sinal e *noise* é o rms do ruído. SNR é geralmente expresso em decibéis (dB), embora em muitos casos também se use a expressão linear desta relação.

A autocorrelação (mesma imagem tomada para objecto e referência) pode ser utilizada como forma de demonstrar o comportamento de um correlograma em função do desalinhamento do filtro, pela análise dos valores obtidos para a SNR.

A SNR no plano de correlação de um processador 4f, simplificada para uma notação unidimensional, pode ser definida pela expressão ^[21, 25]

$$SNR(\Delta p) = \frac{|r_s(0, \Delta p)|^2}{r_n(\Delta p)} \quad (2.2)$$

onde,

$$r_s(x, \Delta p) = \frac{C}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S(p)S^*(p + \Delta p) \exp(jpx)}{|N(p + \Delta p)|^2} dp \quad (2.3)$$

e,

$$r_n(\Delta p) = \frac{C^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|N(p)|^2 |S(p + \Delta p)|^2}{|N(p + \Delta p)|^4} dp \quad (2.4)$$

r_s representa a informação útil (sinal) no plano de correlação, quando o filtro é deslocado de Δp , e r_n o valor quadrático médio do ruído presente no correlograma. Sendo $s(x)$ o sinal (igual à referência), e $n(x)$ o ruído, neste caso considerado uniforme, $S(p)$ e $N(p)$ representam as respectivas transformadas de Fourier. C é uma constante ^[21, 25].

Em termos práticos, a equação 2.2 representa a relação entre a intensidade relativa à informação útil e a intensidade relativa ao ruído, presentes no plano de correlação.

A SNR pode também ser definida pela relação entre o pico de correlação e o rms dos valores que se encontram fora da região limitada pela largura a meia altura (FWHM) do sinal. A expressão correspondente, já numa perspectiva de sinais discretizados, é ^[26]

$$SNR = \frac{C_{\phi}}{\left[\frac{1}{N} \sum_i C(x_i > FWHM)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.5)$$

onde, C_{ϕ} é o valor máximo (valor de pico), N o tamanho do *array* (ou matriz, caso se trate de sinais bidimensionais) e $C(x_i)$ o valor do *array* correspondente à posição x_i .

As expressões 2.2 e 2.5 são ambas adequadas para avaliar a SNR de correlogramas. No entanto adopta-se a formulação 2.2 por esta proporcionar um melhor indicador da consistência dos resultados obtidos neste trabalho, como se verá mais adiante.

Apresenta-se de seguida o estudo realizado, tanto para sinais unidimensionais como bidimensionais, que mostra em que medida o desalinhamento lateral, atrás referido, afecta a SNR do correlograma.

2.2 – Sinal Unidimensional

A caracterização do alinhamento a uma dimensão, apresentada de seguida, foi exclusivamente retirada da literatura ^[21, 25].

Pela análise da SNR (equação 2.2) sabe-se que o desempenho do correlacionador 4f em função do deslocamento do filtro é dado por

$$P = \sin^2(\Delta p L / 2) \quad (2.6)$$

onde, L representa o comprimento do sinal e Δp o deslocamento do filtro ^[21].

O gráfico representado em 2.1 mostra o andamento de 2.6 para diferentes valores do parâmetro abertura relativa (relação entre o tamanho do objecto L e a distância focal F da lente transformadora de Fourier) ^[21].

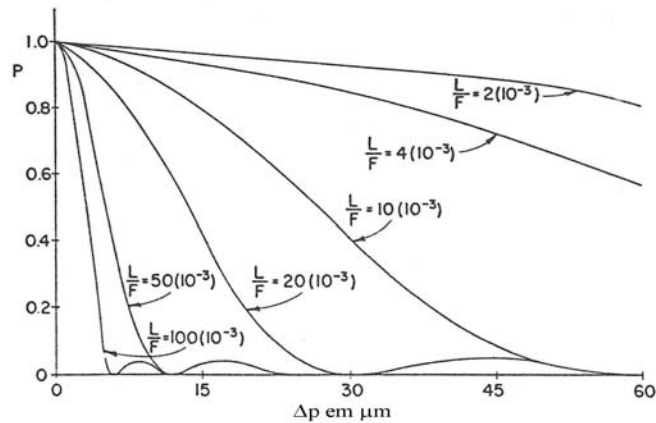


Figura 2.1: Relação entre o desempenho do sistema (P) e o deslocamento lateral do filtro (Δp). Figura retirada da literatura ^[21].

Da figura conclui-se que, como era de esperar, a SNR resultante da autocorrelação diminui à medida que o desalinhamento Δp aumenta.

Por outro lado, verifica-se também que, para F constante, o desalinhamento se torna mais crítico à medida que o comprimento do sinal aumenta. Uma possível justificação para o facto será apresentada posteriormente em altura adequada.

Para mostrar o comportamento do correlograma em função do deslocamento do filtro num processador $4f$, usando sinais bidimensionais (imagens) apresenta-se na secção seguinte alguns dos resultados obtidos por simulação.

2.3 – Sinal Bidimensional

Se a origem dos eixos da TF do objecto e do filtro não forem coincidentes, o pico de correlação resultante de um processador $4f$ com sinais bidimensionais tende a degradar-se, tal como acontece na secção anterior para os sinais unidimensionais. O desempenho do correlacionador em função do deslocamento do filtro pode ser, da mesma forma, medido em termos da SNR dada pelo correlograma.

Para tal simulou-se em *MATLAB* um correlacionador $4f$ capaz de reproduzir na saída o autocorrelograma de uma dada imagem.

Antes de apresentar os resultados obtidos é, no entanto, importante justificar a escolha do tipo de filtro a introduzir no plano das frequências do processador.

2.3.1 – Filtro de fase

A informação complexa resultante da passagem da imagem do objecto por uma lente transformadora de Fourier pode ser decomposta em duas quantidades; informação de fase e informação de amplitude.

Ao contrário do que poderá ser intuitivo, é sabido que uma grande parte da informação da imagem original está contida na componente de fase da sua TF^[27].

Para ilustrar a afirmação anterior, desenvolveram-se dois programas simples em código *MATLAB*.

O primeiro programa, cujo funcionamento se encontra descrito pelo diagrama de fluxo da figura 2.2, baseia-se no Teorema Integral das propriedades fundamentais da TF^[4,28], e tem como objectivo mostrar qual das duas componentes da TF (fase ou amplitude) contém mais informação acerca do objecto inicial.

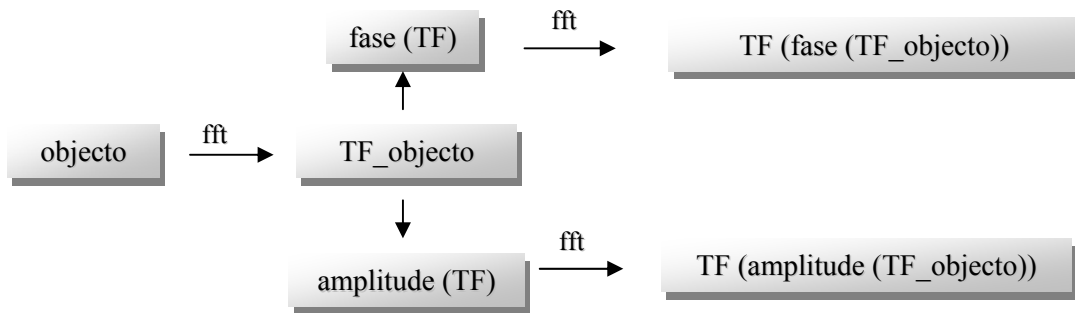


Figura 2.2: Diagrama de fluxo do método utilizado para mostrar qual das componentes da TF contém maior informação sobre o objecto.

O resultado da simulação encontra-se representado na figura 2.3;

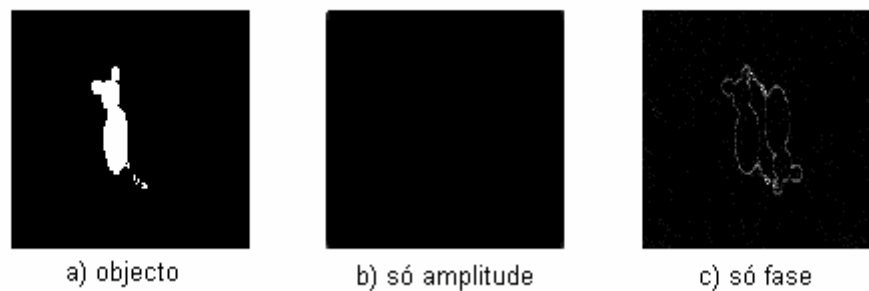


Figura 2.3: Informação de fase contém maior informação acerca do objecto.
a) Objecto; **b)** TF da amplitude da TF do objecto; **c)** TF da fase da TF do objecto.

Como se pode observar pelas imagens obtidas, com informação só de fase consegue-se recuperar alguns traços do objecto original (2.3.c). O mesmo não se pode afirmar quando se utiliza apenas informação de amplitude da TF do objecto (2.3.b).

No segundo programa multiplica-se a informação só de fase da TF de um objecto com a informação só de amplitude da TF de outro objecto. De seguida aplica-se nova TF ao conjunto para poder observar qual a informação predominante em *resultado 1* e *resultado 2*. O diagrama

de fluxo correspondente encontra-se representado na figura 2.4 e os resultados obtidos por simulação em 2.5;

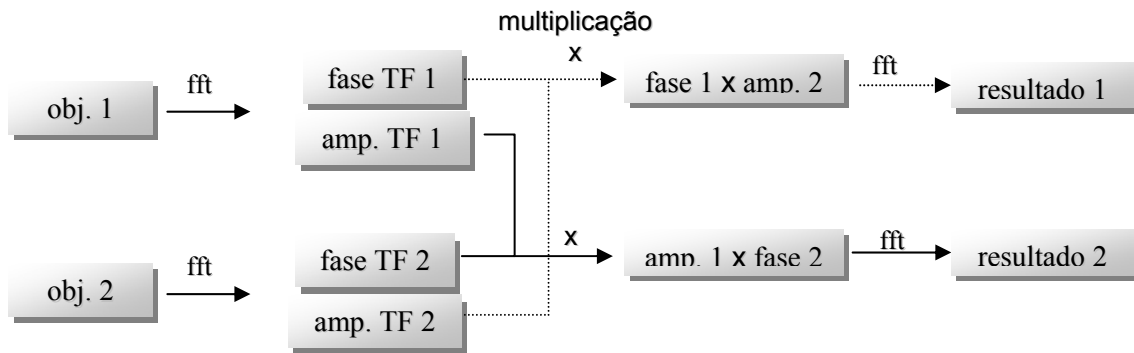


Figura 2.4: Diagrama de fluxo do método utilizado para verificar qual a informação da TF predominante – fase ou amplitude.

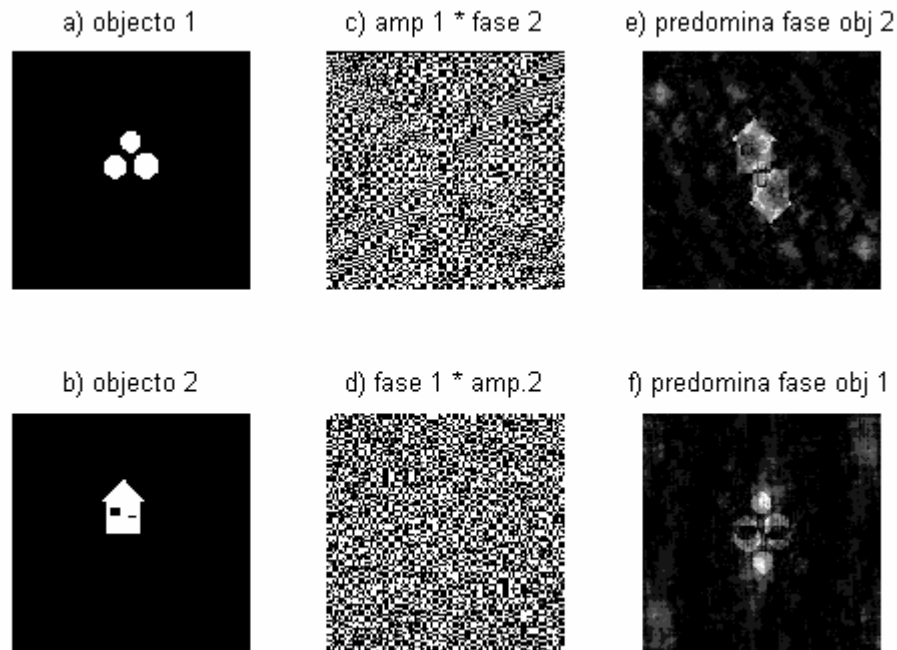


Figura 2.5: Características do objecto predominantes na informação de fase.

a) e b) objectos; c) multiplicação da amplitude resultante da TF do objecto 1 pela fase resultante da TF do objecto 2; d) multiplicação da fase resultante da TF do objecto 1 pela amplitude resultante da TF do objecto 2; e) e f) transformadas de Fourier de c) e d), respectivamente.

Em ambos os casos se verifica que na reconstituição de um objecto a partir da sua TF a informação de fase é a mais importante

Por outro lado, um objecto somente de fase, como é o caso dos prismas e das lentes, apenas deflecte o feixe que neles incide, sem dissipar energia. O mesmo acontece com um filtro

só de fase. Quando o filtro é complexo, ou apenas de amplitude, parte da energia que nele incide é absorvida. Isto significa que a eficiência óptica (também designada por eficiência de *Horner*) de um correlacionador pode aumentar substancialmente se for usado um filtro só de fase [29, 30,31,32,33].

Eficiência óptica define-se pela relação entre a energia correspondente à mancha de correlação e a energia no plano do objecto. Matematicamente é representada pela expressão 2.7 [29, 30,31].

$$\eta_H = \eta \frac{\iint |f(x,y) \otimes g^*(x,y)|^2 dx dy}{\iint |f(x,y)|^2 dx dy} \quad (2.7)$$

sendo, $f(x,y)$ a função que representa o objecto, $g^*(x,y)$ o conjugado da função de referência e η a eficiência do meio.

Para mostrar resultado da autocorrelação num processador 4f usando cada um dos três filtros referidos (filtro complexo, filtro só de amplitude e filtro só de fase), apresenta-se na figura 2.6 os resultados, obtidos por simulação em código *MATLAB*, em cada caso.

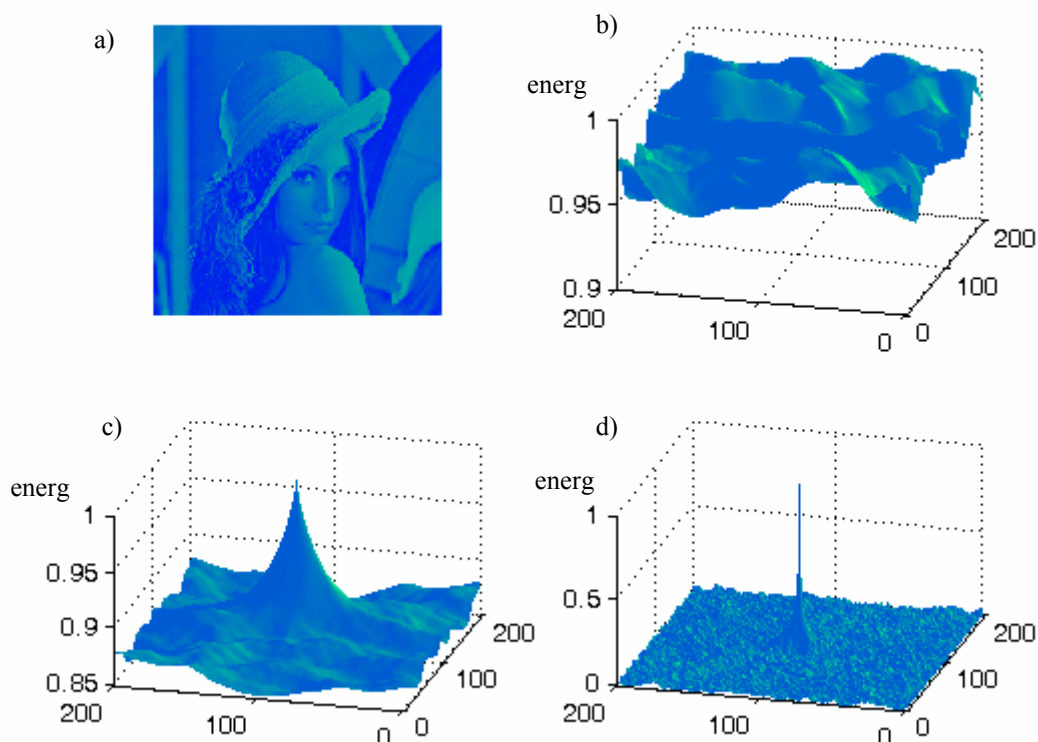


Figura 2.6: Autocorrelação usando três tipos de filtro.

a) objecto (igual à referência); **b)** resultado da autocorrelação com filtro só de amplitude; **c)** resultado da autocorrelação com filtro complexo (de fase e amplitude); **d)** resultado da autocorrelação com filtro só de fase. Nota: os gráficos representam a Intensidade (normalizada à unidade) em função do pixel.

Da análise aos gráficos apresentados, conclui-se que a eficiência é muito superior quando se usa um filtro só de fase (caso d), e adicionalmente pode afirmar-se que toda a energia do correlograma está bastante concentrada no pico de correlação, o qual se apresenta bastante estreito. A concentração da energia numa pequena área é fundamental para se obter uma maior sensibilidade face ao desalinhamento.

Da literatura ^[30] retiram-se alguns resultados interessantes obtidos para autocorrelação com caracteres, referentes a três parâmetros de avaliação de desempenho de filtros – eficiência óptica, valor de pico e capacidade de discriminação. Assim, um filtro só de fase apresenta uma eficiência óptica 83% superior (100%/1,2%), um pico de energia no plano de correlação 54,5% superior (51,8/0,95) e, uma capacidade de discriminação 5% melhor (40%/8%), quando comparado com um filtro complexo. Relativamente à comparação do filtro complexo com o filtro só de amplitude, verifica-se que este último contribui para um decréscimo em todos os parâmetros.

Pelas razões apresentadas, e também por ser optoelectronicamente exequível, o filtro só de fase é o escolhido para utilizar nas próximas secções.

Para estudar o comportamento do pico de correlação de um $4f$ bidimensional face ao deslocamento transversal do filtro de fase em relação ao eixo óptico, apresenta-se de seguida uma série de simulações, com código desenvolvido em *MATLAB*.

O cálculo da SNR, na análise bidimensional, é fundamentado numa versão discretizada da expressão 2.2. Para sinal considera-se a média do quadrado dos pontos correspondentes à mancha de correlação (valor de pico + pontos que o envolvem e que apresentam energia superior a um mínimo estipulado) e para ruído contribui a média do quadrado dos pontos considerados fundo (com energia inferior a um mínimo definido).

2.3.2 – Desalinhamento relativo ao tipo de objecto

Com o objectivo de comparar o efeito do deslocamento do filtro no plano de correlação para diferentes objectos, simulou-se o comportamento do $4f$ para cada objecto utilizado, com um deslocamento máximo do filtro até 10 pixels. O código de simulação encontra-se esquematizado no diagrama de fluxo da figura 2.7. Este diagrama de fluxo é válido para as próximas secções do presente capítulo.

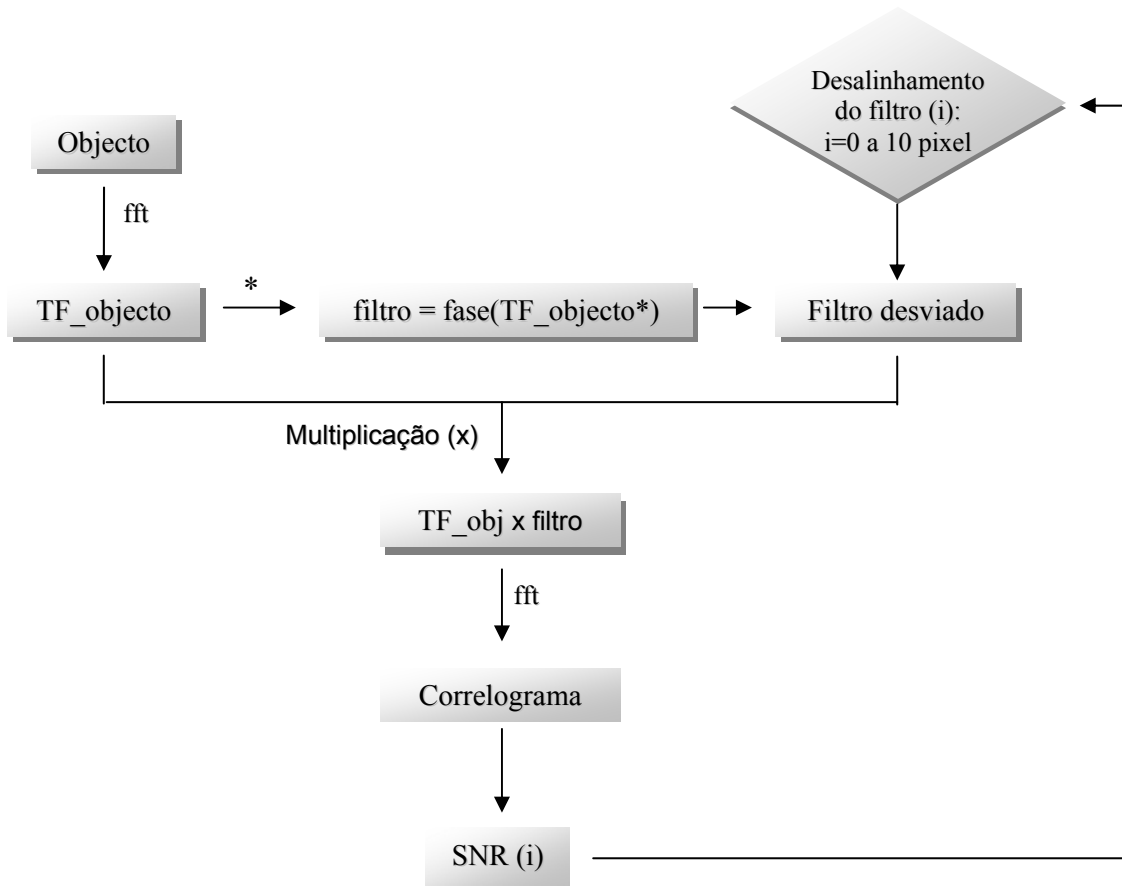


Figura 2.7: Diagrama de fluxo do método utilizado para simular o resultado da correlação em função do desalinhamento. Nota: entenda-se complexo conjugado pelo símbolo *.

Os objectos utilizados encontram-se representados na figura 2.8 e os respectivos valores da SNR resultantes das simulações estão graficamente dispostos na figura 2.9.



Figura 2.8: Objectos utilizados para mostrar o desempenho do 4f face ao deslocamento do filtro.

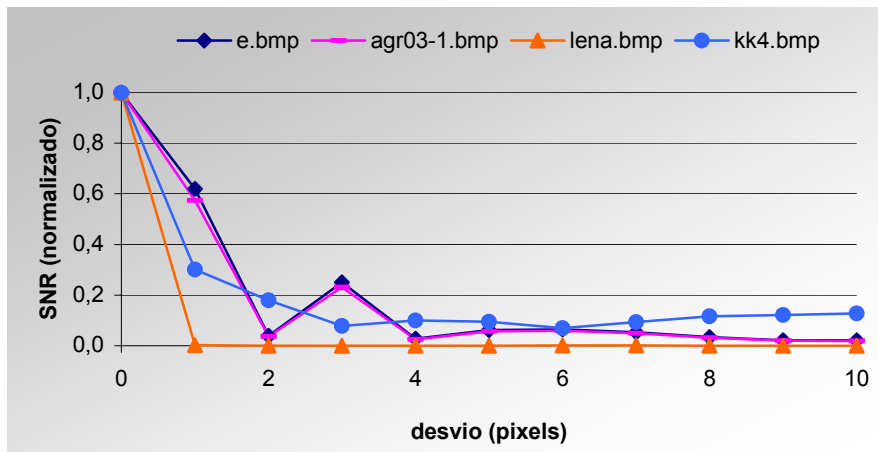


Figura 2.9: Valores de SNR resultantes da análise individual dos objectos presentes em 2.8 para um deslocamento máximo do filtro até 10 pixels do alinhamento correcto. Gráfico normalizado à unidade.

O deslocamento progressivo do filtro relativamente ao centro dos eixos resulta numa redução da SNR do correlograma, para qualquer um dos objectos apresentados em 2.8. Como seria de esperar, o valor máximo da SNR é obtido quando a TF do objecto e o filtro estão perfeitamente alinhados. Verifica-se ainda que o maior objecto (lena.bmp) apresenta a redução mais acentuada (maior declive) da SNR. Uma possível justificação é apresentada na secção seguinte.

2.3.3 – Desalinhamento em função da abertura relativa do objecto

Entenda-se por abertura relativa a relação entre o tamanho do objecto e a região, do plano onde é colocado, abrangida pela distribuição de campo.

No gráfico seguinte (ver 2.11) apresenta-se os resultados das simulações realizadas com objectos iguais mas de diferentes tamanhos, representados em 2.10. O objectivo é observar o comportamento do correlograma face ao deslocamento do filtro, até um máximo de 10 pixels, e em função do tamanho do objecto (a região abrangida pela distribuição de campo é igual para os três casos).

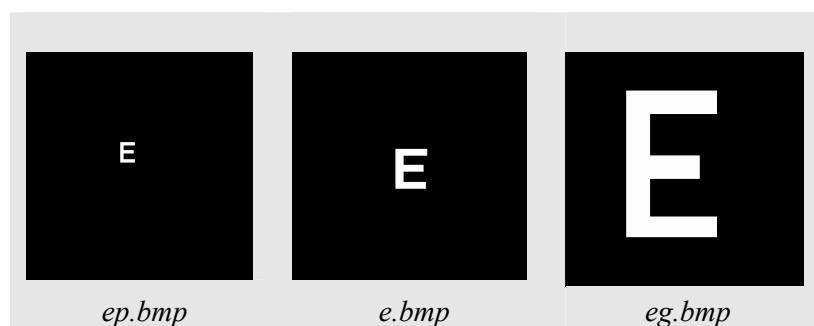


Figura 2.10: Objectos utilizados para mostrar o desempenho do processador 4f face ao deslocamento do filtro, em função da abertura relativa.

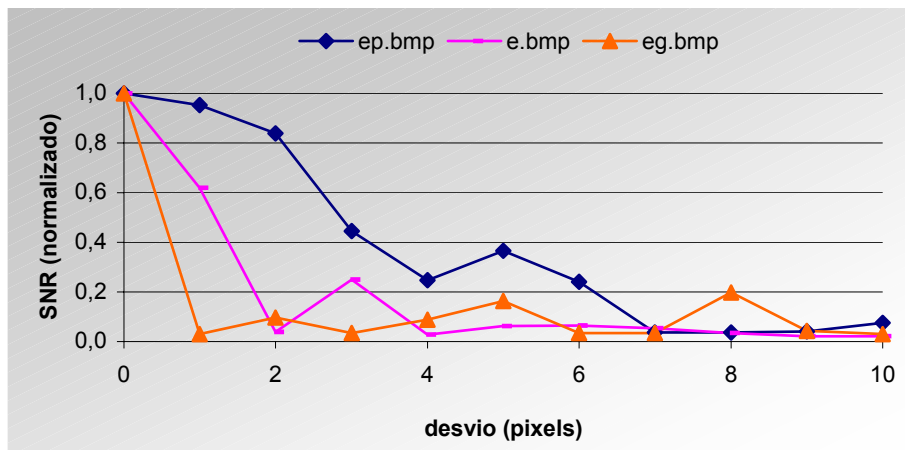


Figura 2.11: Valores de SNR resultantes da análise individual dos objectos presentes em 2.10 para um deslocamento máximo do filtro até 10 pixels do alinhamento correcto. Gráfico normalizado à unidade.

A redução da SNR em função do deslocamento do filtro é significativa para cada uma das curvas apresentadas.

Verifica-se também que a sensibilidade face ao deslocamento do filtro é tanto maior quanto o tamanho do objecto. Uma possível justificação para tal pode ser baseada no Teorema da Semelhança, definido pela seguinte expressão^[4, 28],

$$F\{g(x, y)\} = G(f_x, f_y) \Rightarrow F\{g(ax, by)\} = \frac{1}{a \cdot b} G\left(\frac{f_x}{a}, \frac{f_y}{b}\right) \quad (2.8)$$

onde $F\{g(x, y)\}$ representa a TF do objecto $g(x, y)$, igual a $G(f_x, f_y)$, e a e b são constantes.

De acordo com o teorema da semelhança, sabe-se que quanto maior for o tamanho do objecto menor é a região ocupada pela sua TF no plano das frequências. Como a correlação entre o objecto e a referência resulta da multiplicação das suas componentes de Fourier no plano das frequências, pode-se afirmar que, para a mesma situação de desalinhamento entre a TF do objecto e o filtro, quanto menor for o espaço ocupado pela TF do objecto no plano das frequências, menos sobreposição parcial existe entre as duas quantidades. Como consequência obtém-se um pico de correlação inferior bem como uma diminuição da SNR.

2.3.4 – Desalinhamento relativo ao conteúdo espectral do objecto

Neste caso pretende-se mostrar o efeito do deslocamento para vários níveis de filtragem do objecto. Para tal usou-se um filtro passa baixo que permite cortar as altas-frequências e

tornar o objecto mais esbatido. As imagens do objecto inicial e depois de dois níveis diferentes de filtragem encontram-se representadas na figura 2.12.

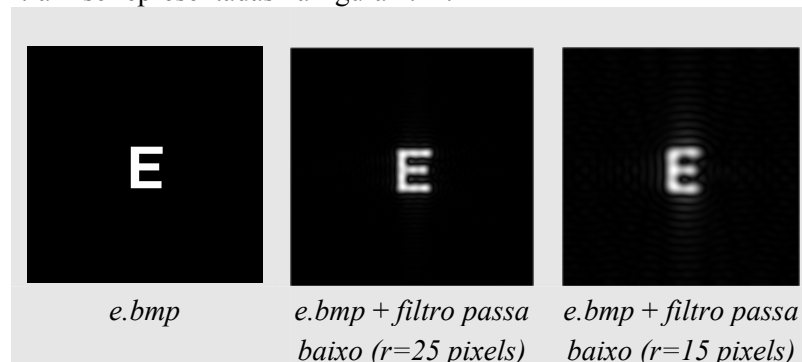


Figura 2.12: Objectos utilizados para mostrar o desempenho do 4f face ao deslocamento do filtro, em função conteúdo espectral do objecto. Nota: r corresponde ao raio do filtro passa baixo.

O gráfico seguinte (ver 2.13) mostra os resultados da simulação

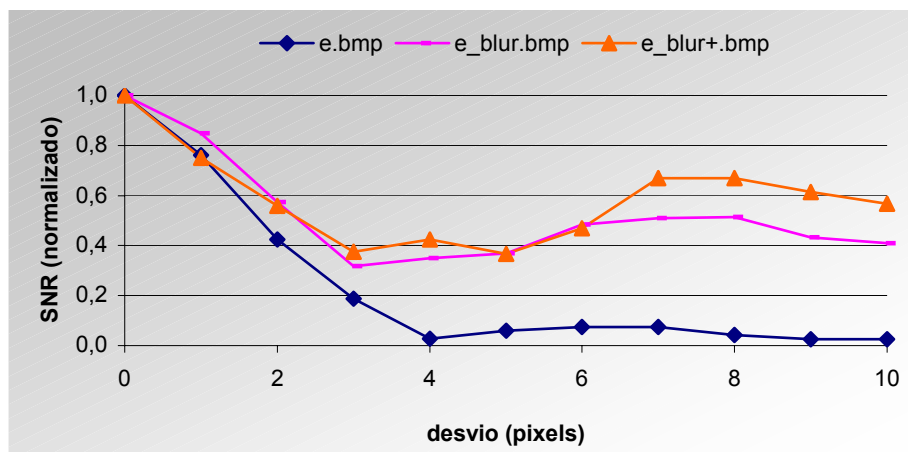


Figura 2.13: Valores de SNR resultantes da análise individual dos objectos em 2.12 para um deslocamento máximo do filtro até 10 pixels. Gráfico normalizado à unidade.

Também neste caso a SNR diminui com o deslocamento do filtro. Verifica-se no entanto que o comportamento das várias curvas em 2.13 é bastante idêntico, principalmente no declive inicial.

A diferença de escala entre as três curvas, relativa ao eixo dos yy , pode ser justificada pelo Teorema da Conservação de Energia. Como o filtro utilizado é só de fase, todos os elementos que compõem o processador 4f, à excepção do objecto, contribuem apenas para a alteração de fase da informação que por eles passa sem haver absorção de energia. Neste caso, a energia presente no plano de correlação, mais precisamente no pico resultante da autocorrelação, deve ser igual à energia inicial no plano do objecto. Como a imagem *e.bmp* é a que apresenta maior energia, a esta deve corresponder um maior valor de SNR. A diferença de

escala é bastante notória no gráfico não normalizado à unidade e representado em dB, mostrado na figura 2.14;

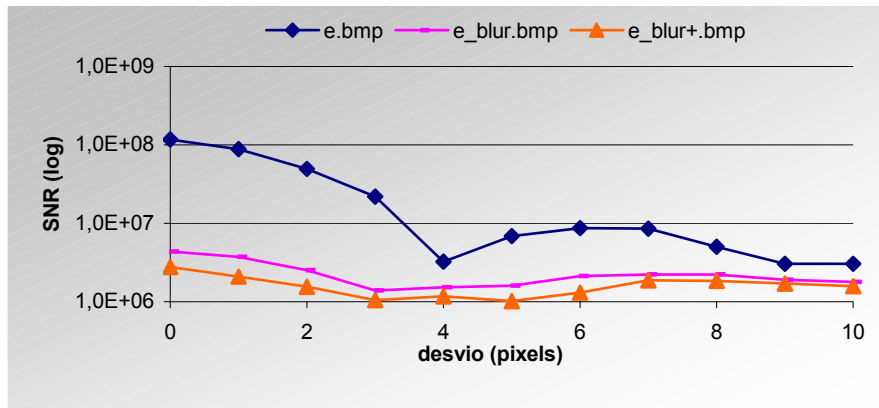


Figura 2.14: Valores de SNR resultantes da análise individual dos objectos em 2.12 para um deslocamento máximo do filtro até 10 pixels. Gráfico não normalizado à unidade e representado em dB.

Dos resultados obtidos pelos gráficos em 2.13 e 2.14 pode no entanto concluir-se que o decréscimo da SNR com o deslocamento do filtro é mais evidente em imagens com maior conteúdo espectral.

2.3.5 – Desalinhamento relativo à resolução do SLM

Nesta secção pretende mostrar-se o efeito do deslocamento do filtro no plano de correlação em função da resolução dos SLM's onde o objecto e o filtro são inseridos. Para tal utilizam-se matrizes de 200*200 pixels e 1000*1000 pixels. O objecto utilizado em ambos os casos é o representado pela figura *e.bmp* (ver figura 2.12).

O gráfico seguinte mostra os resultados obtidos por simulação (figura 2.15);

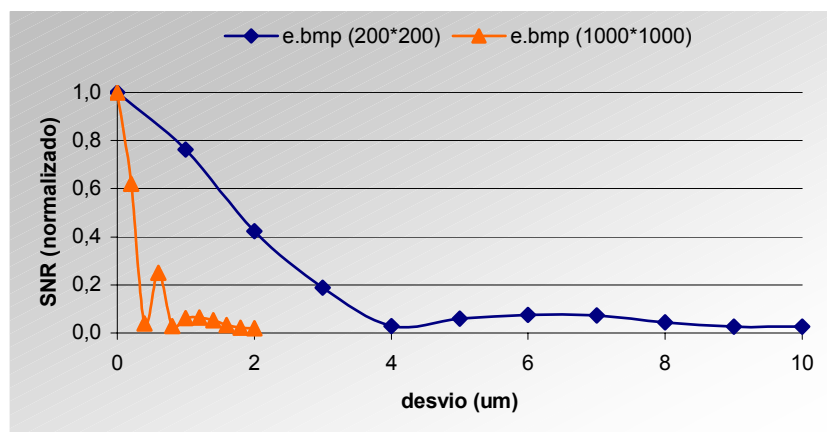


Figura 2.15: Valores de SNR resultantes de diferentes resoluções das matrizes do objecto e referência (200*200 pixels e 1000*1000 pixels), para um deslocamento máximo do filtro até 10 pixels. Gráfico normalizado à unidade.

Supondo que as dimensões externas das duas matrizes são idênticas, o tamanho dos pixels na matriz de 1000*1000 deve ser inferior aos da matriz de 200*200. Neste caso, e de acordo com o gráfico, verifica-se que, para objectos iguais quanto maior for a resolução maior a sensibilidade para com o deslocamento do filtro. A justificação é intuitiva pois, como deslocamento em termos de pixels é idêntico para os dois casos, a diferença entre as curvas no gráfico acompanha a relação entre o tamanho dos pixels das duas matrizes.

2.4 – Síntese

Das várias análises apresentadas conclui-se que a intensidade do pico de correlação, e consequentemente a SNR do correlograma diminui à medida que o centro do filtro se afasta da origem dos eixos, para todos os casos.

Verifica-se que o comportamento das curvas dos gráficos pode ser descrito pela expressão 2.6, pela sua semelhança com as obtidas na análise unidimensional (facilmente perceptível na grande maioria das curvas). Tomando como exemplo gráfico 2.15, verifica-se que a curva que melhor representa a expressão em questão é a devolvida por uma matriz de 100*1000 pixels, como era de esperar pois, é a que mais se aproxima de um comportamento contínuo.

Conclui-se também que, tanto do gráfico resultante da análise unidimensional (figura 2.1) como dos resultantes da análise bidimensional, a sensibilidade do correlograma face ao deslocamento do filtro aumenta à medida que o tamanho do objecto aumenta. A justificação, baseada no Teorema da Semelhança é apresentada na secção 2.3.3.

A intensidade do pico está ainda directamente relacionada com energia no plano do objecto. Neste caso, o decréscimo da SNR é mais significativo para objectos com maior energia.

Considerando o SLM utilizado, quanto maior a sua resolução maior a sensibilidade ao deslocamento por pixel.

Por todas as afirmações anteriores conclui-se que o alinhamento das componentes no processador 4f, nomeadamente entre a TF do objecto e o filtro, é crucial para que os resultados sejam satisfatórios.

Como forma de compensar o desalinhamento em questão apresenta-se, no próximo capítulo, uma técnica de modulação de fase desenvolvida neste trabalho.

CAPÍTULO III

MODULAÇÃO DE FASE

Um dos maiores inconvenientes dos sistemas ópticos é, como já foi referido, a necessidade de alinhamento rigoroso entre as suas componentes. Esta preocupação aumenta para aplicações fora do laboratório, como é o caso de alguns aparelhos portáteis. Qualquer sistema óptico deve permanecer calibrado independentemente das agressões do meio em que se encontra nomeadamente, ocorrência de movimentos, vibrações, alterações do gradiente de pressão e temperatura, entre outras ^[22].

No campo dos correlacionadores ópticos, nomeadamente no caso do correlacionador 4f, é importante desenvolver técnicas capazes de compensar e corrigir os efeitos indesejáveis do desalinhamento, no sentido de o tornar mais robusto. Recentemente começam a aparecer na literatura algumas soluções vocacionadas para o efeito.

Um dos métodos encontrados ^[22] é totalmente suportado por *software* e baseia-se na mudança das coordenadas do filtro e do objecto usados como calibradores, até que ocorra o pico de correlação esperado. Permite ainda corrigir erros relativos à detecção da posição do objecto. Este método é, de todos os encontrados até à data, o que mais se assemelha ao desenvolvido neste trabalho uma vez que para desvios de fracções de pixel entre a TF do objecto e do filtro toma como referência um princípio de funcionamento idêntico (modulação da fase do objecto, a referir posteriormente).

Um outro método ^[34] utiliza um correlacionador ajustável que deriva do esquema 4f e consiste na mudança geométrica da posição do filtro através de uma translação até obter o pico de correlação semelhante ao de referência. Também aqui se utiliza um objecto e filtro de teste somente para calibrar.

O método mais recente encontrado na literatura ^[35] usa como objecto uma rede de difracção binária de período constante em cada linha, mas variando monotonamente de linha para linha, e como filtro uma linha de fase π orientada segundo uma direcção perpendicular à das linhas do objecto. O alinhamento entre o objecto e o filtro é feito em separado para cada um dos eixos. Para o alinhamento individual de cada eixo, vai-se alterando a posição da linha de fase do filtro até que esta coincida com a componente DC da TF do objecto. Quando isto acontece, vislumbra-se no plano de correlação uma imagem idêntica ao objecto mas invertida, o que corresponde à situação de alinhamento correcto. Para o alinhamento do outro eixo tanto o objecto como o filtro são rodados de 90° e retoma-se o procedimento anterior. De notar que este método requer deslocamentos mecânicos, da ordem do micron, para se realizar.

A técnica introduzida neste trabalho baseia-se na compensação do efeito de desalinhamento entre o objecto e o filtro num processador 4f pela simples modulação de fase do objecto e não requer qualquer tipo de alinhamento mecânico.

Este capítulo destina-se à descrição do modo de funcionamento da técnica e à obtenção de resultados por simulação num processador 4f.

3.1 – Técnica de alinhamento por modulação de fase

O efeito indesejável do desalinhamento entre TF do objecto e o filtro de referência num processador 4f pode ser compensado se for colocada no sistema uma máscara capaz de introduzir informação de fase no objecto e alterar a posição da sua TF. Utilizando a máscara adequada, é possível fazer coincidir a componente DC da TF do objecto com a componente DC do filtro no plano de frequências e recuperar o alinhamento. O deslocamento da TF do objecto é função dos parâmetros da máscara utilizada.

O esquema básico do processador 4f com modulação de fase encontra-se representado a seguir (figura 3.1);

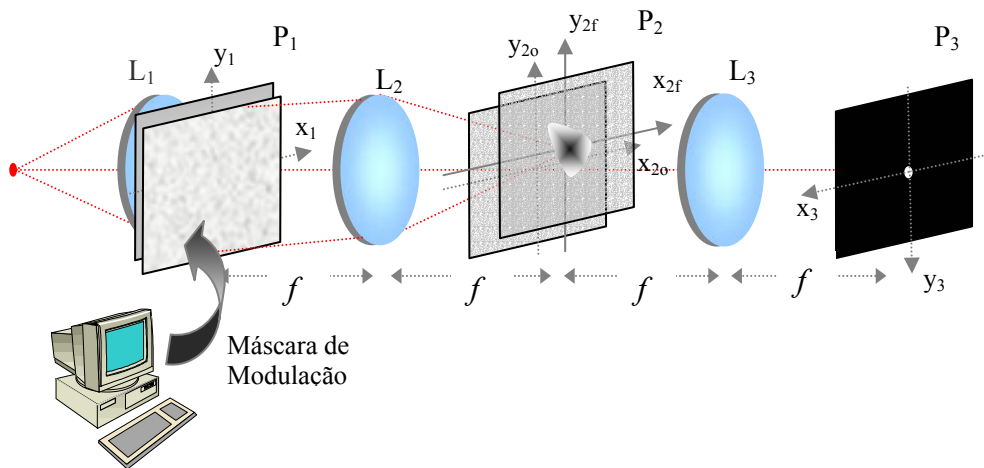


Figura 3.1: Esquema básico de um processador 4f com modulação de fase no plano do objecto.

A sua configuração é semelhante à da figura 1.1, exceptuando a presença da máscara de modulação.

O efeito da máscara de fase deve ser semelhante ao introduzido por um prisma. Tal como foi referido no primeiro capítulo (ver Filtro de *Vanderlugt*), o prisma caracteriza-se por ser capaz de deflectir um feixe incidente de um determinado ângulo proporcional ao índice de refacção do seu meio e ao seu ângulo de abertura. A equação 3.1 define o comportamento de uma onda plana emergente de um prisma^[1];

$$U_r(x_2, y_2) = r_0 \exp(-j2\pi\alpha y_2) \quad (3.1)$$

onde r_0 representa a amplitude da onda incidente e α a frequência espacial definida por $\alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda}$, em que θ é o ângulo de deflexão provocado pelo prisma e λ o comprimento de onda do feixe incidente.

O princípio em que se baseia a técnica de modulação apresentada torna-se claro e intuitivo quando se simula o efeito produzido por um prisma colocado em frente ao plano do objecto no processador 4f. Na figura 3.2 mostra-se o resultado obtido com um simulador de óptica geométrica¹.

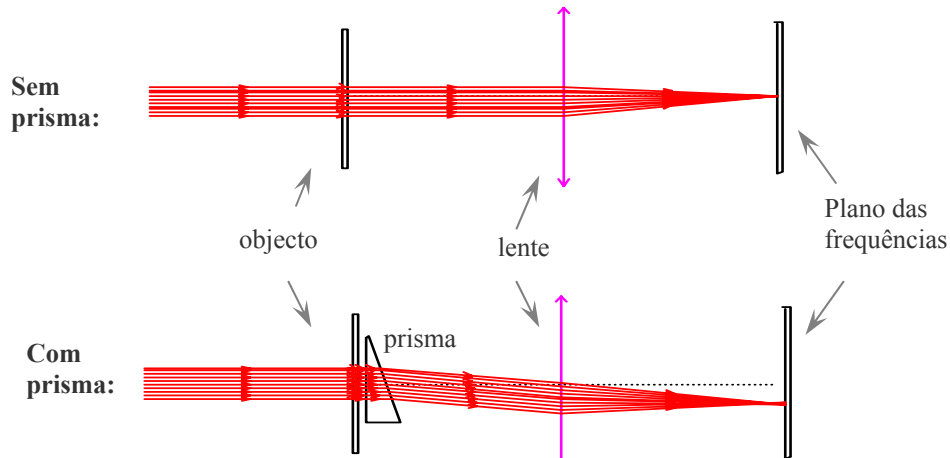


Figura 3.2: Comportamento dos raios luminosos na primeira parte de um processador 4f, sem e com a presença de um prisma em frente ao plano do objecto.

Para que o deslocamento seja possível em todas as direcções perpendiculares ao eixo, seria necessário, para além de rodar o prisma, variar o seu índice de refração e (ou) a sua abertura. Com um simples prisma a técnica é inexecutável.

Como não existem prismas com os requisitos necessários, a técnica desenvolvida neste capítulo é puramente conceptual, não sendo conhecida nenhuma forma de a realizar fisicamente. O próximo capítulo destina-se à síntese de alternativas para que a técnica da modulação possa ser implementada num sistema experimental de bancada óptica.

3.2 - Máscara ideal

Para demonstrar o método introduzido na secção anterior, fez-se em código *MATLAB* uma série de simulações em que se estuda o efeito de introduzir modulação de fase no objecto, tal como o faria o prisma ideal. A figura seguinte representa as condições deste estudo,

¹ – *Raytrace*, ver. 2.18

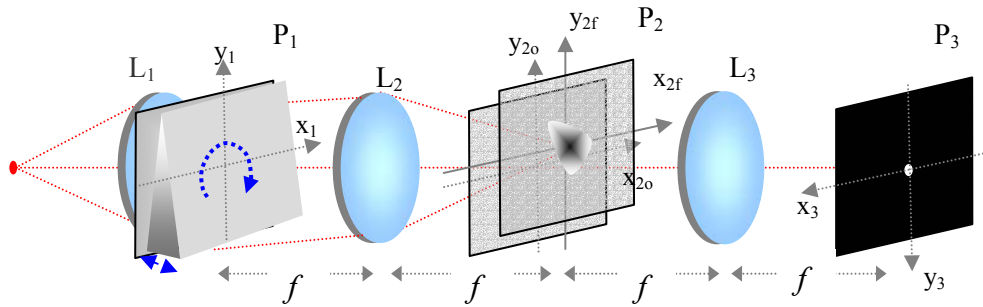


Figura 3.3: Esquema de um processador 4f com uma máscara ideal realizada por um prisma.

3.2.1 - Posicionamento da TF do objecto no plano de frequências

A máscara de modulação é definida pela equação 3.2;

$$U_r(x, y) = \exp(-j2\pi(k_x * x + k_y * y)) \quad (3.2)$$

em que k_x e k_y representam as frequências espaciais da modulação segundo os 2 eixos e (x, y) as coordenadas correspondentes a cada ponto da distribuição de campo resultante.

O comportamento previsto para a equação anterior é semelhante ao devolvido por um prisma (equação 3.1), embora neste caso com a possibilidade de deflexão dos raios em todas direcções perpendiculares ao eixo, no plano das frequências.

Na figura seguinte (3.4) encontram-se representados os gráficos 3D obtidos por simulação, que mostram o deslocamento da TF do objecto no plano das frequências para diferentes frequências espaciais (k_x e k_y) da máscara de modulação.

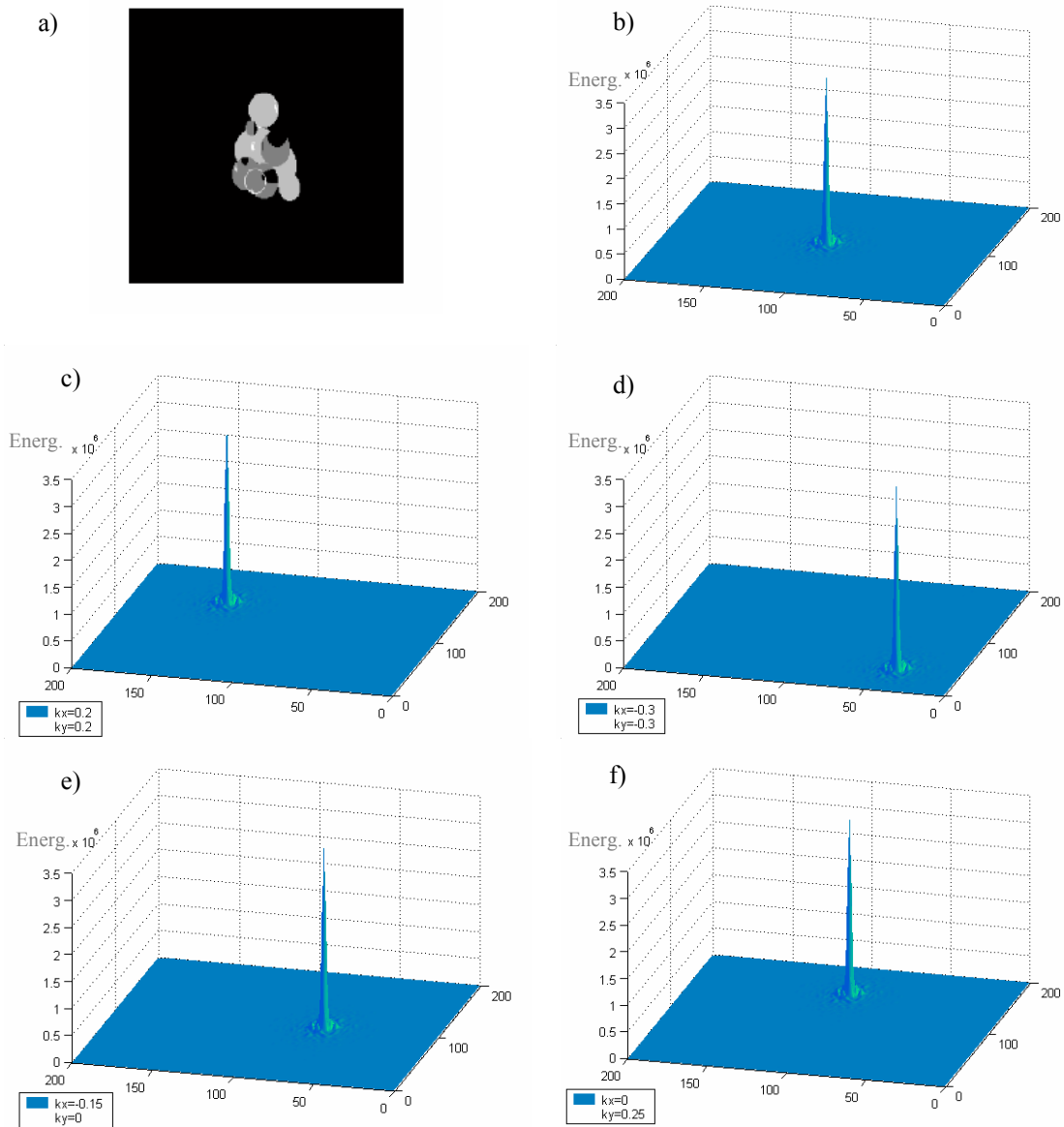


Figura 3.4: Posicionamento da TF do objecto no plano das frequências em função das frequências espaciais da máscara de modulação.

a) objecto; **b)** TF do objecto não modulado; **c)** a **f)** TF do objecto modulado para diferentes frequências espaciais (k_x , k_y) da máscara de fase.

Nota: nos gráficos, os eixos representam a energia em função do pixel (x , y).

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que a componente DC da TF do objecto pode ser desviada do ponto central para qualquer posição do plano de frequências de um correlacionador 4f. Para tal basta introduzir na máscara de modulação de fase as frequências espaciais correspondentes à posição desejada.

3.2.2 - Resultado da correlação com modulação de fase

Demonstra-se seguidamente que a técnica anterior, devidamente utilizada num correlacionador 4f, é adequada à obtenção de correlogramas idênticos aos obtidos em condições de alinhamento perfeito.

Os gráficos obtidos das simulações encontram-se representados na figura 3.5. Considerando que o cerne deste trabalho se baseia nas simulações referidas, mostra-se em anexo e somente para este caso o código desenvolvido em MATLAB – “*corr_prisma.m*”.

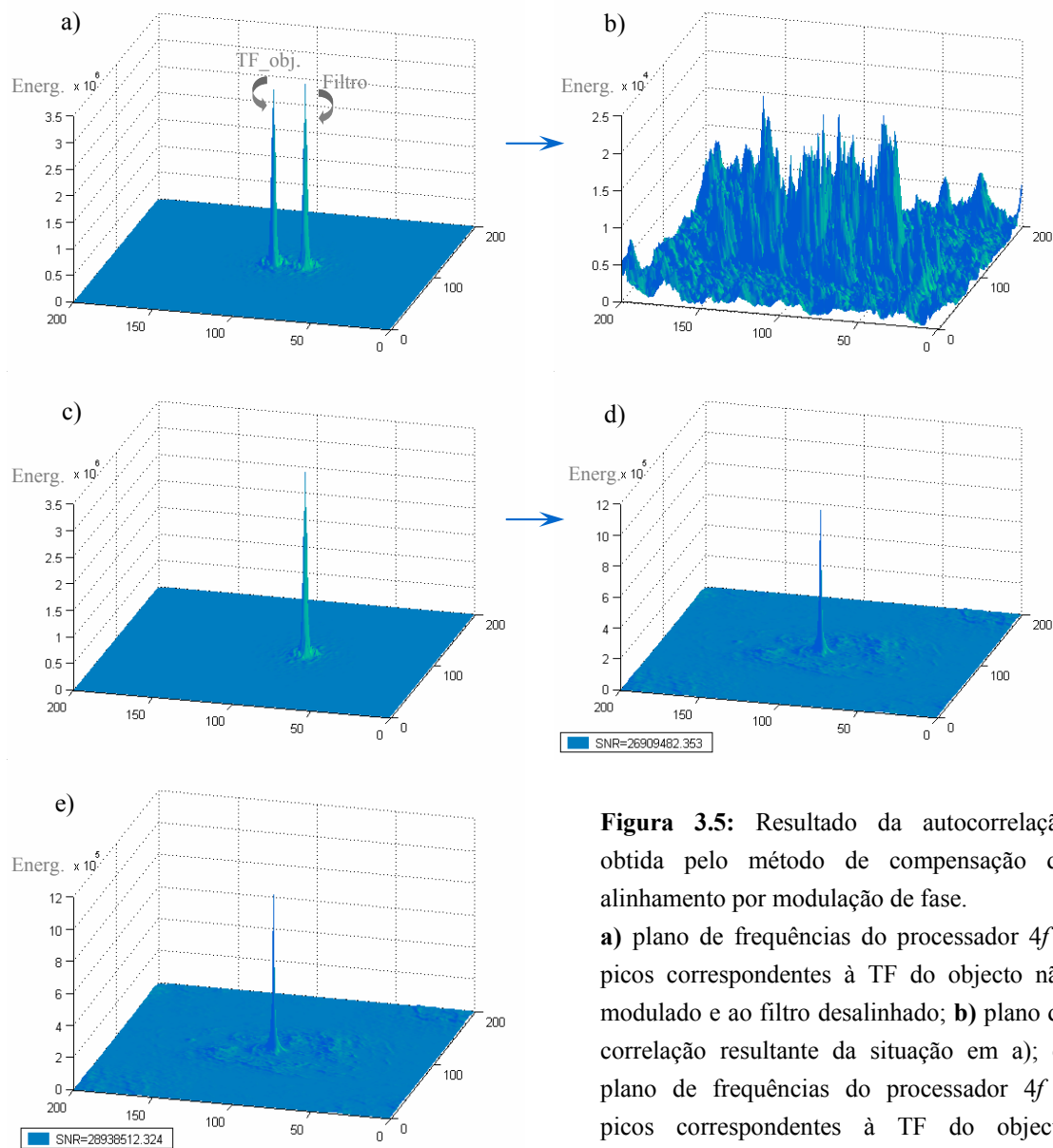


Figura 3.5: Resultado da autocorrelação obtida pelo método de compensação do alinhamento por modulação de fase.

a) plano de frequências do processador 4f – picos correspondentes à TF do objecto não modulado e ao filtro desalinhado; **b)** plano de correlação resultante da situação em a); **c)** plano de frequências do processador 4f – picos correspondentes à TF do objecto modulado e ao filtro desalinhado (encontram-se sobrepostos); **d)** plano de correlação resultante da situação em c); **e)** autocorrelação perfeita - objecto não modulado e filtro alinhado.

Nota: nos gráficos, os eixos representam a energia em função do pixel (x, y).

Verifica-se, tal como esperado, que com a técnica apresentada é possível sobrepor a componente DC da TF do objecto com a componente DC do filtro desalinhado e obter um pico de correlação semelhante ao de uma correlação sem qualquer tipo de desalinhamento.

De acordo com os valores da SNR obtidos para as situações representadas em d) e e) verifica-se que a atenuação da intensidade no pico de correlação (δ) obtido pela técnica de modulação, quando comparada com SNR relativa à correlação perfeita é de apenas 7%, neste caso. A equação utilizada para este cálculo é (equação 3.3);

$$\delta = \left(1 - \frac{SNR_{corr_modulada}}{SNR_{corr_perfeita}}\right) * 100 \quad (3.3)$$

com $SNR_{Corr_modulada}$ a SNR resultante da correlação com modulação de fase e $SNR_{Corr_perfeita}$ a SNR obtida para uma correlação perfeita.

A diferença entre as SNR apresentada deve-se à perda de informação contida em alguns pixels da matriz do filtro devida ao desalinhamento (pixels que saem fora dos limites da matriz usada para a representação). Para mostrar que a afirmação anterior é válida efectuou-se, por simulação, a translação dos pixels perdidos para a região na matriz que não contém informação do filtro, também devido ao desalinhamento. Neste caso a SNR resultante da correlação com modulação de fase é exactamente igual à de uma correlação perfeita.

O resultado apresentado na figura 3.5 é apenas um exemplo dos muitos encontrados durante as simulações e que permitem comprovar a eficácia do método.

3.2.3 – Multi objectos

Os correlacionadores ópticos caracterizam-se também pela capacidade de detectar vários padrões idênticos presentes numa única imagem. Neste caso, e como já foi referido no capítulo I, o número de picos presentes no correlograma deve ser igual ao número de padrões idênticos ao objecto de referência.

Interessa aqui mostrar de que forma a correlação multi-objectos é afectada pela introdução da máscara de fase no sistema.

Na figura 3.6 mostram-se os resultados obtidos da correlação com modulação de fase para uma imagem à entrada composta por vários padrões idênticos.

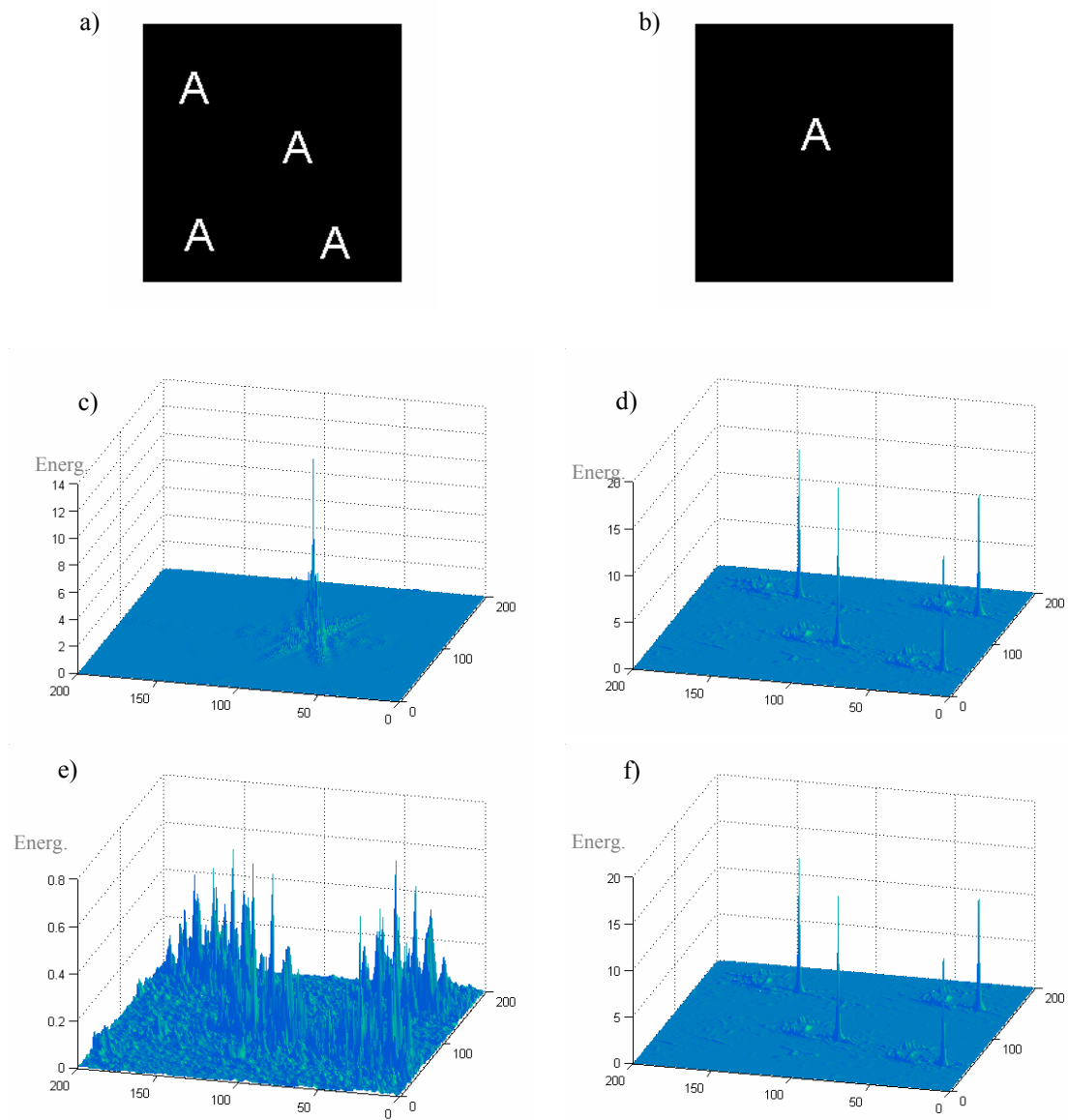


Figura 3.6: Resultado da autocorrelação obtida pelo método de compensação do alinhamento por modulação de fase para multi objects.

a) Imagem multi objects; **b)** Imagem de referência; **c)** plano de frequências – picos correspondentes à TF da imagem multi objects modulada e ao filtro desalinhado (já sobrepostos pela modulação); **d)** correlograma resultante da situação em c); **e)** correlograma resultante da correlação entre a imagem multi objects não modulada e o filtro desalinhado; **f)** correlação perfeita – imagem multi objects não modulada e filtro alinhado. Nota: nos gráficos, os eixos representam a energia em função do pixel (x, y).

Comparando os gráficos d) e) e f) conclui-se mais uma vez que a técnica da modulação de fase se mostra eficaz para ultrapassar os problemas de alinhamento entre a TF do(s) objecto(s) e o filtro. Mesmo na presença da máscara de modulação é possível observar-se no plano de correlação quatro picos distintos correspondentes a cada uma das letras presentes na imagem em a).

Este resultado está de acordo com a afirmação feita no capítulo I, onde foi referido que o correlacionador 4f conserva a informação de posição. Conclui-se ainda que esta característica é preservada com a introdução da máscara de fase no sistema.

3.3 - Alinhamento automático

O método de alinhamento por modulação de fase só é eficaz se for autónomo a determinar as frequências espaciais mais adequadas para a máscara de fase, em cada nova situação. Um processo automático pode ser facilmente conseguido através de um algoritmo adequado cujo diagrama de fluxo se mostra na figura 3.7.

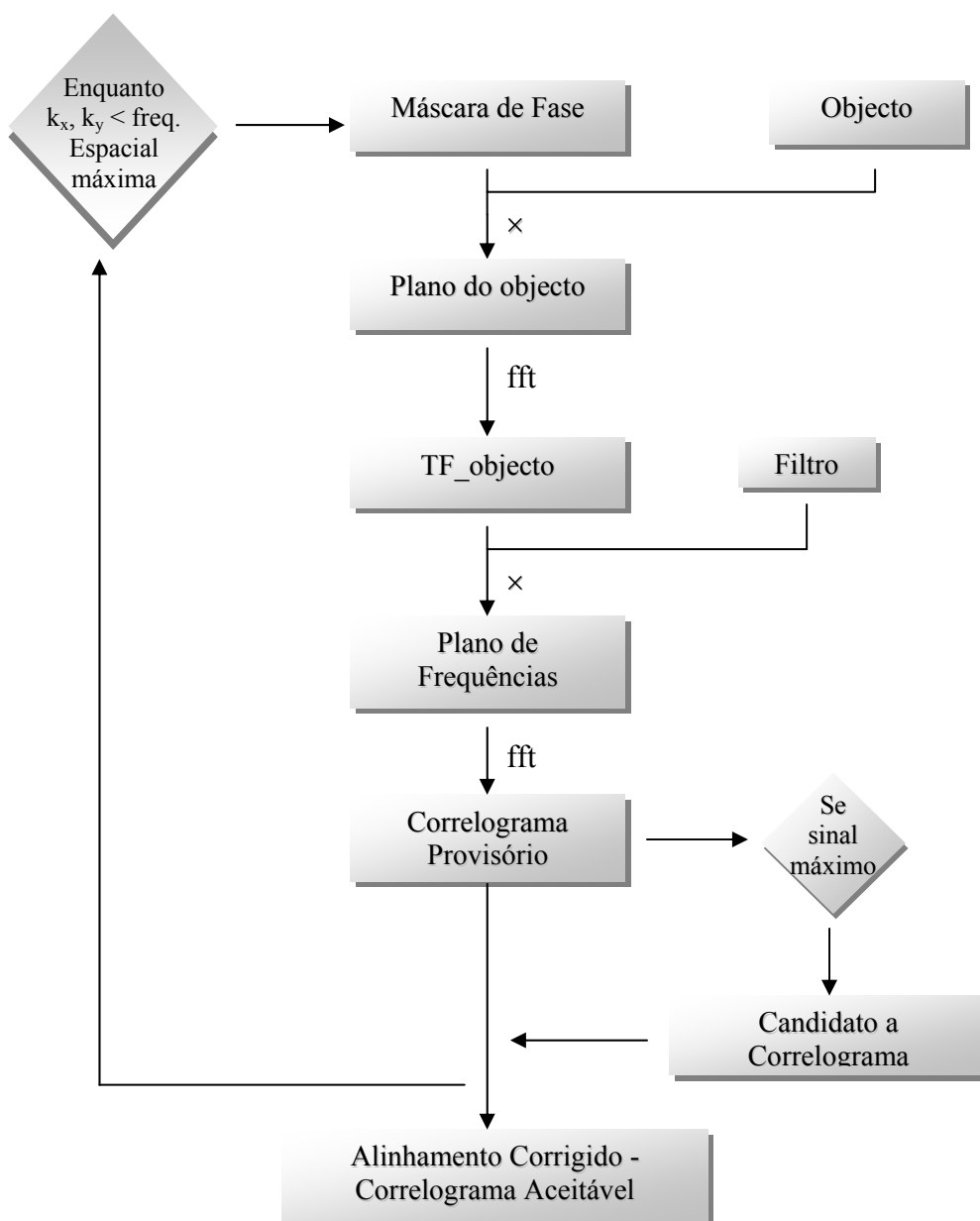


Figura 3.7: Diagrama de fluxo do método alinhamento automático

Sabendo qual a frequência espacial necessária, em cada eixo, para deslocar a TF do objecto até aos extremos do plano de frequências, é possível, através de um processo de varrimento para todas as frequências inferiores a esse limite, obter automaticamente o melhor alinhamento possível e o respectivo correlograma. Embora este processo possa consumir algum tempo de operação, como a fase de alinhamento não exige necessariamente um tempo de execução reduzido visto não se tratar de uma operação em tempo real, pode afirmar-se que o método de alinhamento automático representado pelo diagrama de fluxo da figura 3.7 é adequado.

Conclui-se, dos resultados obtidos neste capítulo, que o alinhamento entre a TF do objecto e o filtro pode ser facilmente conseguido pela técnica apresentada, caso exista no mercado uma máscara de fase com as características do prisma ideal. Para deslocar a TF do objecto até um dos extremos do plano de frequências, a máscara deve apresentar segundo cada eixo uma mudança de fase contínua de 0 a $(2 * \pi * m)$, em que m representa o número de linhas (ou colunas) das matrizes do objecto e do filtro no processador.

Como não é possível encontrar até à data um dispositivo capaz reproduzir variações tão elevadas de fase, apresenta-se no capítulo seguinte soluções alternativas à máscara ideal.

CAPÍTULO IV

SÍNTESE DE MÁSCARAS

Uma das principais vantagens do processamento óptico de sinal relativamente aos métodos digitais e analógicos é a sua capacidade de operar em paralelo em todos os pontos num espaço bidimensional, com uma taxa de processamento literalmente igual da velocidade da luz. A rapidez com que as operações são efectuadas num sistema óptico é limitada pelos actuadores usados à entrada e pelos detectores à saída ^[36].

Relativamente à técnica apresentada no capítulo anterior, como não existe um prisma capaz de responder aos requisitos exigidos, não faria sentido implementa-la num sistema real. Isto porque a necessidade de mudar o prisma em cada alinhamento, torna-a impraticável e inviabiliza a vantagem apresentada para o uso em processamento óptico. O ideal seria encontrar um dispositivo capaz de simular uma máscara com os efeitos do prisma ideal definido no capítulo anterior.

Os SLM são os únicos dispositivos que de alguma forma podem tentar substituir a máscara ideal no processador 4f, embora limitados pela máxima mudança de fase que podem atingir e pelas consequências que daí advêm.

Este capítulo dedica-se ao estudo de padrões que depois de introduzidos num SLM possam substituir a máscara de fase ideal e compensar o desalinhamento num processador 4f experimental.

Como nota introdutória, segue-se uma breve descrição sobre os SLM's.

4.1 - SLM – Descrição Breve

Como já foi referido, os SLM são dispositivos electrónicos estimuláveis por uma tensão variável, capazes de modular a luz que neles incide e reproduzir electronicamente o conteúdo de uma imagem.

Podem modular somente a amplitude (SLM de amplitude), a fase (SLM de fase) ou as duas componentes em conjunto (SLM de amplitude e fase) do sinal recebido, dependendo do tipo de SLM utilizado. Podem ser ainda reflexivos (comportam-se como espelho) ou transmissivos (comportam-se como película fotográfica) ^[36].

Os primeiros SLM só de fase possibilitavam apenas uma modulação binária (zero ou π). Actualmente é possível encontrar no mercado SLM's só de fase, contínuos e de elevada resolução. É o caso, por exemplo, do LCSLM (SLM de cristais líquidos) só de fase, com 128*128 pixels, fabricado pela *Bolder Nonlinear Systems* (figura 4.1.a)). Com este dispositivo é

possível obter uma modulação de fase contínua de zero até 3π radianos individualmente em cada pixel, como mostra o gráfico da figura 4.1.b). A renovação de padrões² pode ser realizada a uma taxa de 200Hz^[37].

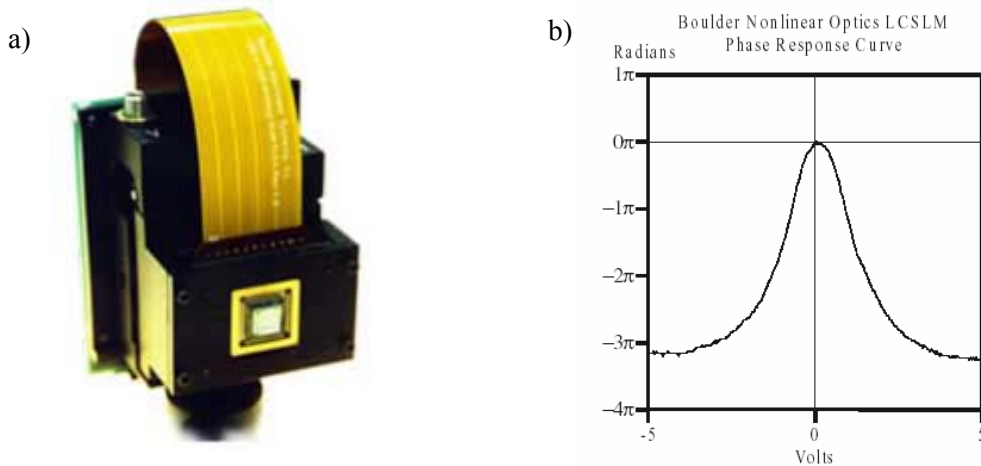


Figura 4.1: LCOSLM só de fase, de 128×128 pixels fabricado pela *Boulder Nonlinear Systems*.

a) Imagem do LCOSLM^[38]; b) Curva que representa a mudança de fase em função da tensão aplicada^[37].

A técnica de compensação do alinhamento por modulação de fase apresentada seria viável se fosse colocado no lugar da máscara de modulação da figura 3.1 um SLM capaz de reproduzir o efeito do prisma ideal.

A grande dificuldade surge com o limite de 3π proporcionado pelos SLM's actuais. Como exemplo toma-se os resultados apresentados em 3.3.2, onde, para se obter alinhamento, foi necessário reproduzir o efeito de um prisma com uma mudança de fase máxima de 40π (mudança de fase máxima introduzida no código de simulação).

As próximas secções são dedicadas à síntese de máscaras de modulação capazes de resolver problemas de desalinhamento e fáceis de implementar em SLM's disponíveis no mercado.

4.2 – SLM contínuo e só de fase

As máscaras que se passam a estudar são realizadas por diversos padrões tendo, por isso, efeitos semelhantes aos das redes de difracção. Nomeadamente, como veremos, estas máscaras dispersam a luz por várias ordens de difracção cujo somatório da intensidade é igual à energia contida no feixe inicial^[1,3,39].

Interessa inserir no SLM (máscara de modulação) o padrão adequado que possibilite a sobreposição de uma das ordens de difracção da TF do objecto com a componente DC do filtro e a ocorrência de pico de correlação correspondente.

² Update Rate na literatura de língua inglesa.

Como a energia do objecto se encontra distribuída por várias ordens de difracção, a intensidade do pico de correlação tende a diminuir.

Relativamente à máscara de modulação, o ideal será utilizar uma rede de difracção só de fase para que a energia do objecto não seja parcialmente absorvida.

Uma das redes de difracção proposta como alternativa à máscara ideal do capítulo anterior aparenta-se com um “dente de serra”. Trata-se de uma máscara só de fase com uma variação gradual de zero a 2π em forma de “cunha”. Sabe-se que, embora este tipo de máscara provoque o aparecimento de várias ordens de difracção, grande parte da energia do objecto é difractada para a primeira ordem^[40].

O número de “cunhas” a introduzir está relacionado com o deslocamento necessário para sobrepor a primeira ordem de difracção da TF do objecto com a componente DC do filtro. Esta máscara pode ser facilmente reproduzida por um SLM idêntico ao LCSLM fabricado pela *Bolder Nonlinear Systems*, referido na secção anterior.

Para mostrar o efeito da rede de difracção aqui apresentada, quando introduzida num 4f como máscara de modulação, foram realizadas simulações em código *MATLAB*. O objecto utilizado e o desalinhamento introduzido são idênticos aos das simulação para o caso da máscara ideal (figura 3.4.a)), com o intuito de posteriormente se poder comparar resultados.

A expressão unidimensional utilizada no código para simular a máscara em questão é (equação 4.1);

$$mascara(x) = \exp[i * 2 * \pi * ((p - x) / p - c)] \quad (4.1)$$

com x a coordenada segundo o eixo considerado para o alinhamento, p o número de pixels equivalentes à base de cada “cunha” e c a separação entre “cunhas”.

Os resultados obtidos encontram-se representados a seguir, na figura 4.2;

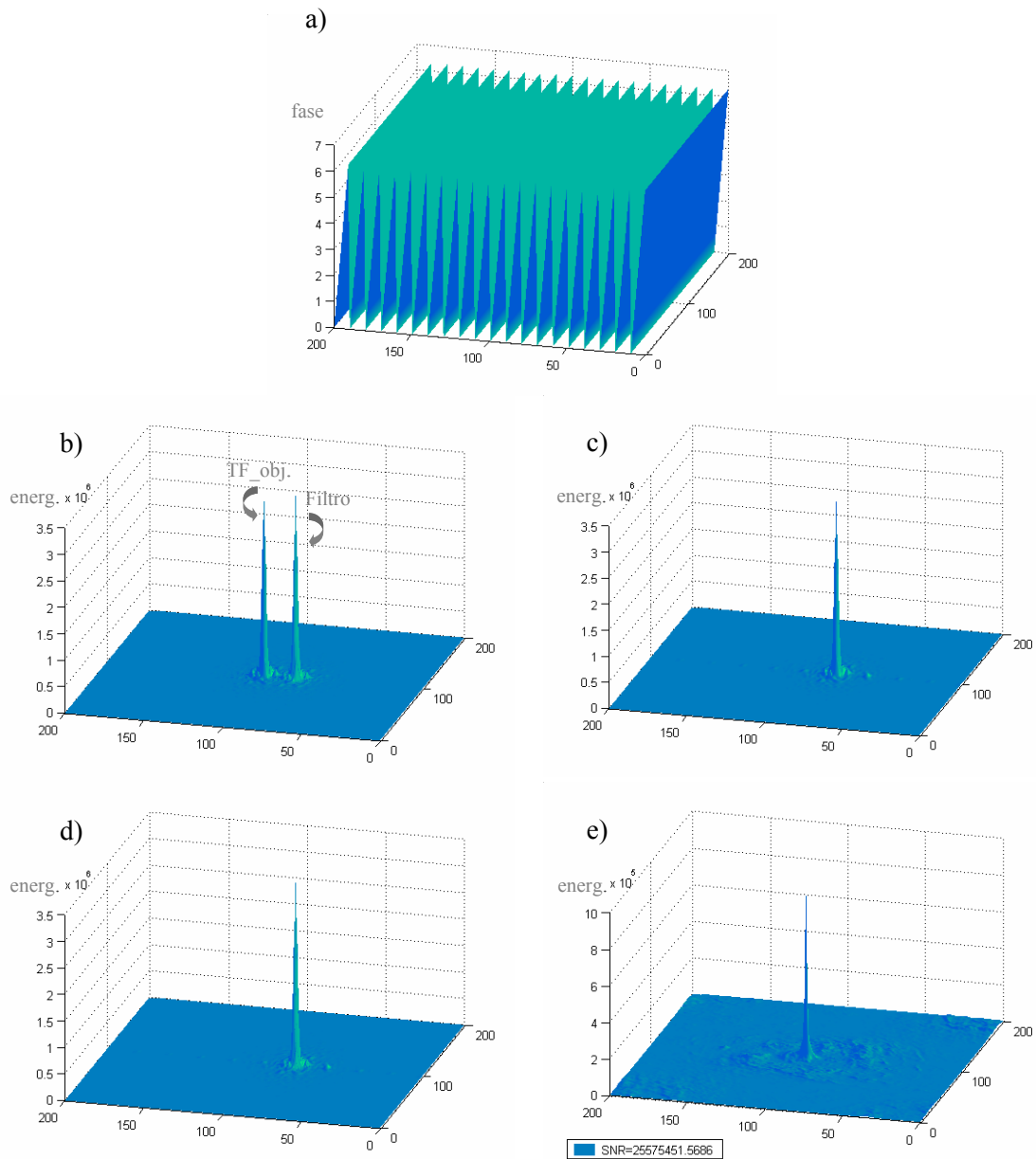


Figura 4.2: Resultado da autocorrelação obtida pelo método de compensação do alinhamento por modulação de fase com uma máscara de fase (zero a 2π) em forma de “dente de serra”.

a) Imagem da máscara de fase utilizada; **b)** plano de frequências do processador $4f$ – picos correspondentes à TF do objecto não modulado e ao filtro desalinhado; **c)** plano de frequências do objecto modulado. Embora pouco visíveis, encontram-se presentes diferentes picos correspondentes às várias ordens de difracção; **d)** plano de frequências do processador $4f$ – picos correspondentes à TF do objecto modulado e ao filtro desalinhado. A ordem de difracção de maior energia em c) encontra-se sobreposta com a componente DC do filtro; **e)** correlograma resultante de d);

Nota: as unidades dos eixos x e y são em pixel.

Dos resultados obtidos conclui-se que a máscara de fase em forma de “dente de serra” é eficaz para resolver problemas de alinhamento. Embora neste caso a energia do objecto se encontre dividida por várias ordens de difracção (gráfico 4.2.c), a ordem que interessa alinhar com o filtro é a que apresenta um pico de maior intensidade (ordem de difracção 1), sinónimo de uma perda menor no pico de correlação. De notar que, embora muito reduzido na situação

apresentada, o número de ordens de difracção da TF do objecto é função do número de cunhas necessárias para corrigir o grau de desalinhamento.

Dos valores obtidos para as SNR do correlograma em 4.2.e) e do resultante de uma autocorrelação perfeita (objecto não modulado e filtro alinhado) para o mesmo objecto e mesma situação de desalinhamento, calcula-se, pela equação 3.3, que a perda de intensidade do pico de correlação com a técnica de compensação do alinhamento pela máscara de fase em “dente de serra” é de 11,6%.

4.3 – SLM binário e só de fase

Um outro tipo de máscara de fase que pode ser utilizada é um padrão binário (zero ou π) cuja configuração se assemelha a uma onda quadrada, variando o seu período em função do deslocamento pretendido.

Os resultados da autocorrelação obtidos com esta máscara, para um objecto e desalinhamento idênticos às situações anteriores, encontram-se representados na figura 4.3.

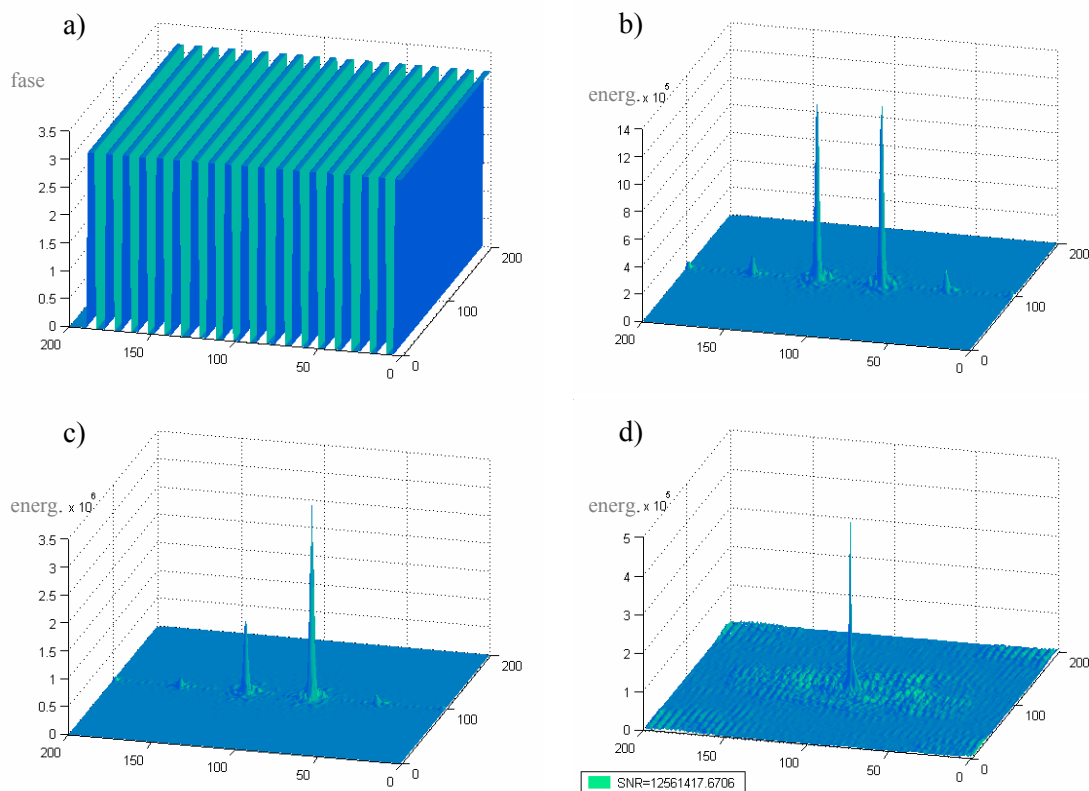


Figura 4.3: Resultado da autocorrelação obtida pelo método de compensação do alinhamento por modulação de fase para uma máscara de fase e binária (zero ou π).

a) Imagem da máscara de fase utilizada; **b)** TF do objecto modulado, no plano de frequências do processador $4f$. São visíveis 2 picos de maior energia correspondentes às primeiras ordens de difracção. **c)** plano de frequências do processador $4f$ – picos correspondentes à TF do objecto modulado e ao filtro desalinhado; **d)** correlograma resultante da situação em c);

Nota: as unidades dos eixos x e y são em pixels.

O decréscimo de intensidade do pico de correlação relativamente a uma correlação perfeita, devolvido pela equação 3.3 é de 56,6%, para este caso. Pela análise do gráfico representado em 4.3. conclui-se, no entanto, que a rede de difracção binária e só de fase também é suficiente para compensar os efeitos provocados pelo desalinhamento entre a TF do objecto e o filtro.

A máscara em questão pode introduzir ordens de difracção superiores na TF do objecto, como se verifica, mas sempre de energia bastante inferior à das ordens ± 1 .

A sua estrutura pode ser facilmente introduzida num dos SLM's de fase e binários existentes no mercado.

4.4 – SLM de amplitude

Como ultima análise considera-se uma máscara de modulação só de amplitude. A sua configuração é a de uma sinusóide.

A expressão unidimensional utilizada no código para simular a máscara é (equação 4.2);

$$mascara(x) = \cos(k * x * \pi) \quad (4.2)$$

com x a coordenada segundo o eixo considerado para o alinhamento e k a frequência espacial da modulação

A TF resultante da multiplicação do objecto pela máscara de modulação, apresenta dois picos correspondentes às ordens de difracção, de acordo com Teorema da Modulação^[4, 28].

Os resultados obtidos para um objecto e deslocamento do filtro idênticos aos casos anteriores encontram-se representados na figura 4.4;

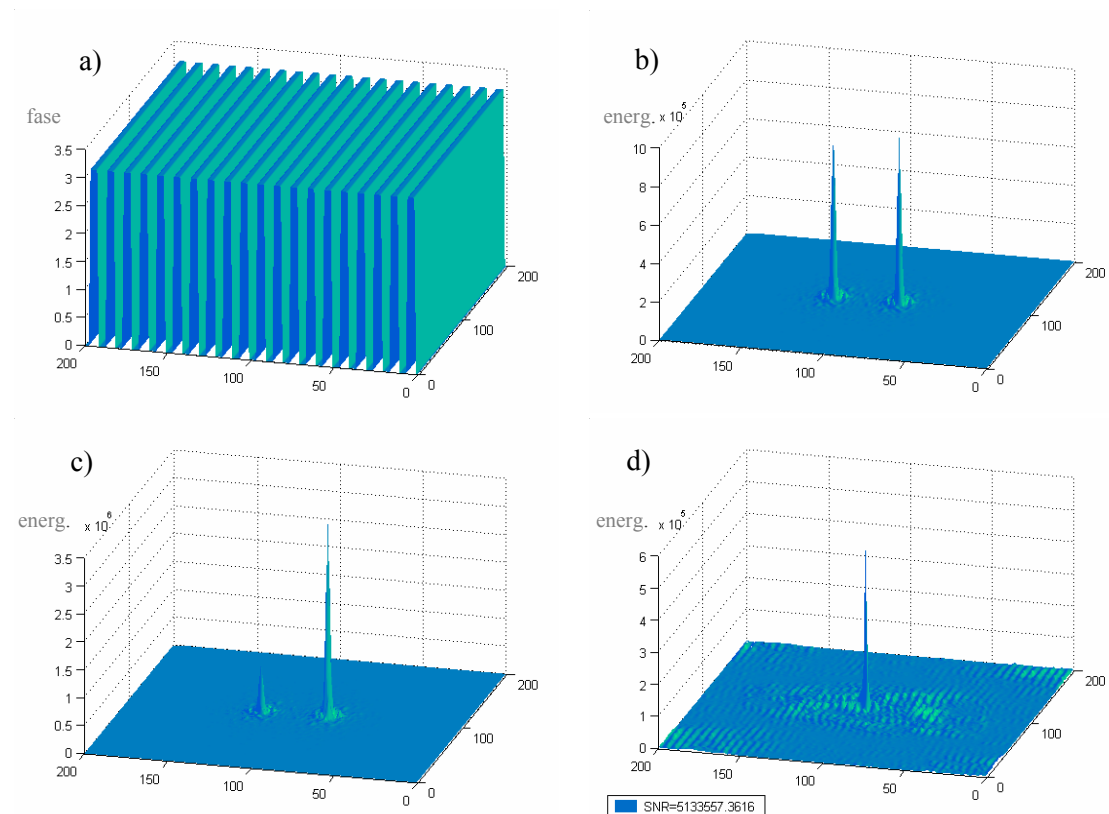


Figura 4.4: Resultado da autocorrelação obtida pelo método de compensação do alinhamento por modulação para uma máscara de amplitude.

a) imagem da máscara de amplitude utilizada; **b)** TF do objecto modulado, no plano de frequência do processador $4f$. São visíveis 2 picos correspondentes às duas ordens de difracção. **c)** plano de frequências do processador $4f$ – picos correspondentes à TF do objecto modulado e ao filtro desalinhado; **d)** Resultado da correlação entre o objecto modulado e o filtro desalinhado;

Nota: as unidades dos eixos x e y são em pixels.

Verifica-se que a máscara só de amplitude sinusoidal é capaz de resolver problemas de desalinhamento entre a TF do objecto e o filtro no plano de frequências do processador $4f$. A SNR obtida diminui 82,3% quando comparada com uma correlação perfeita.

Outras máscaras poderiam ser aqui referidas, o que não se justifica pois, para além de as apresentadas se terem revelado, de entre as estudadas, as mais adequadas, o principal objectivo foi atingido; corrigir o alinhamento usando um dos SLM's disponíveis no mercado.

4.5 – Discussão de Resultados

O gráfico apresentado na figura 4.5 revela a SNR dos correlogramas obtidos depois de se corrigir o alinhamento entre a TF do objecto e filtro de um processador $4f$ com cada uma das

máscaras apresentadas neste trabalho. Está também representado o valor da SNR de uma correlação perfeita, isto é, sem desalinhamento nem modulação do objecto. As condições iniciais, nomeadamente o deslocamento do filtro em relação aos eixos e o objecto utilizado para autocorrelação, são as mesmas para todos os casos do gráfico.

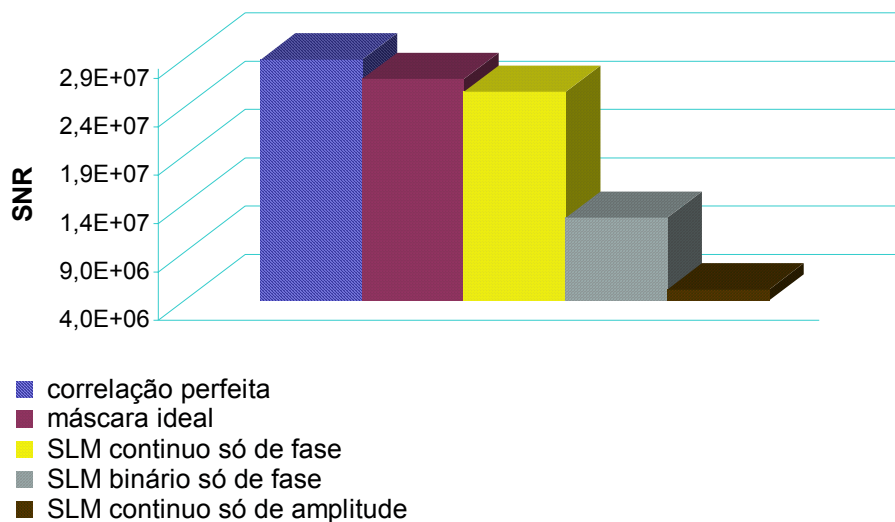


Figura 4.5: Comparação dos valores da SNR do correlograma obtidos pelas várias máscaras de modulação analisadas neste trabalho.

Da comparação das várias colunas representadas no gráfico conclui-se, como era de esperar, que a SNR que mais se aproxima da devolvida por uma correlação perfeita é a obtida com a máscara ideal apresentada no capítulo III. Isto porque, ao aplicar esta máscara, a TF do objecto mantém-se concentrada num único pico, logo, toda ou pelo menos grande parte da energia do objecto contribui para o sinal no correlograma.

Ao usar máscaras reais (discutidas no presente capítulo), a TF do objecto espalha-se por várias ordens de difracção no plano das frequências. Neste caso apenas uma das ordens é alinhada com o filtro. Toda a energia espalhada pelas outras ordens de difracção deixa de contribuir para o sinal de correlação.

Relativamente ao SLM contínuo e só de fase, verifica-se que a ordem de difracção que interessa alinhar com o filtro é a que apresenta maior energia (ver figura 4.2.c), logo a que mais contribui para uma maior intensidade do pico de correlação. O mesmo se verifica quando o número de ordens de difracção aumenta (situação em que o alinhamento requer uma máscara com menos “cunhas”), embora neste caso o valor de energia que contribui para a mancha de correlação seja menor.

Das máscaras apresentadas a menos eficiente é a máscara de amplitude. Isto porque parte da energia do objecto é por ela atenuada, resultando numa redução da informação que contribui para a correlação.

Pelos resultados do gráfico da figura 4.5 e pelas afirmações anteriores, conclui-se que a máscara contínua e só de fase é, de todas as máscaras reais apresentadas, a favorita para uma aplicação experimental em bancada.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

5.1 – Conclusão

O correlacionador 4f é, das configurações básicas apresentadas, o mais simples e interessante de utilizar, pelas razões apresentadas. No entanto, a seu desempenho está limitado à precisão do alinhamento existente entre as suas componentes.

Do estudo apresentado no capítulo II, relativo à caracterização do alinhamento, verifica-se que, o decréscimo da intensidade do pico de correlação obtido por um 4f é mais significativo quanto maior for a abertura relativa do objecto, bem como quanto maior for a resolução dos SLM utilizados.

Uma forma eficaz para corrigir o efeito indesejável do desalinhamento entre a TF do objecto e o filtro é colocar em frente ao plano do objecto uma máscara adequada capaz de lhe alterar a posição da TF no plano das frequências.

A máscara ideal seria semelhante a um prisma, como é referido no capítulo III. Com esta máscara, e dependendo das frequências espaciais utilizadas, é possível deslocar a componente DC da TF do objecto para qualquer posição do plano das frequências, sem dar origem a outras ordens de difracção, que não a ordem zero. Neste caso, toda a energia do objecto contribui para a correlação.

No entanto, a máscara ideal na realidade não existe. Também não pode ser implementada em nenhum dispositivo disponível no mercado devido ao elevado desfasamento que pode exigir. Desta forma, a sua implementação num sistema experimental de bancada é até à data impraticável.

Com o desenvolvimento das características dos SLM disponíveis no mercado, propõe-se, como alternativa à máscara ideal, a utilização de máscaras reais reproduzíveis neste tipo de dispositivos. De entre as máscaras sintetizadas, a mais adequada assemelha-se a um “dente de serra”. É formada por um conjunto de “cunhas” idênticas, contínuas de zero a π e só de fase. O número de “cunhas” a introduzir é função do deslocamento necessário para fazer coincidir as componentes DC da TF do objecto e do filtro.

O único inconveniente previsto para a utilização da máscara contínua só de fase, é a ocorrência de várias ordens de difracção na TF do objecto. Como consequência a SNR neste caso diminui.

Em jeito de conclusão pode apenas referir-se que, de acordo com os resultados obtidos por simulação, a técnica de alinhamento por modulação, com uma máscara adequada, pode

resolver os problemas de alinhamento transversal entre a TF do objecto e o filtro, que tanto limitam a performance e a utilidade do processador 4f convencional.

5.2 – Trabalho Futuro

Devido a dificuldades de natureza experimental não foi possível transpor para bancada óptica o método de alinhamento desenvolvido por simulação. Seria interessante como trabalho futuro implementar a técnica num sistema físico experimental.

O sistema proposto para o efeito encontra-se representado na figura 5.1;

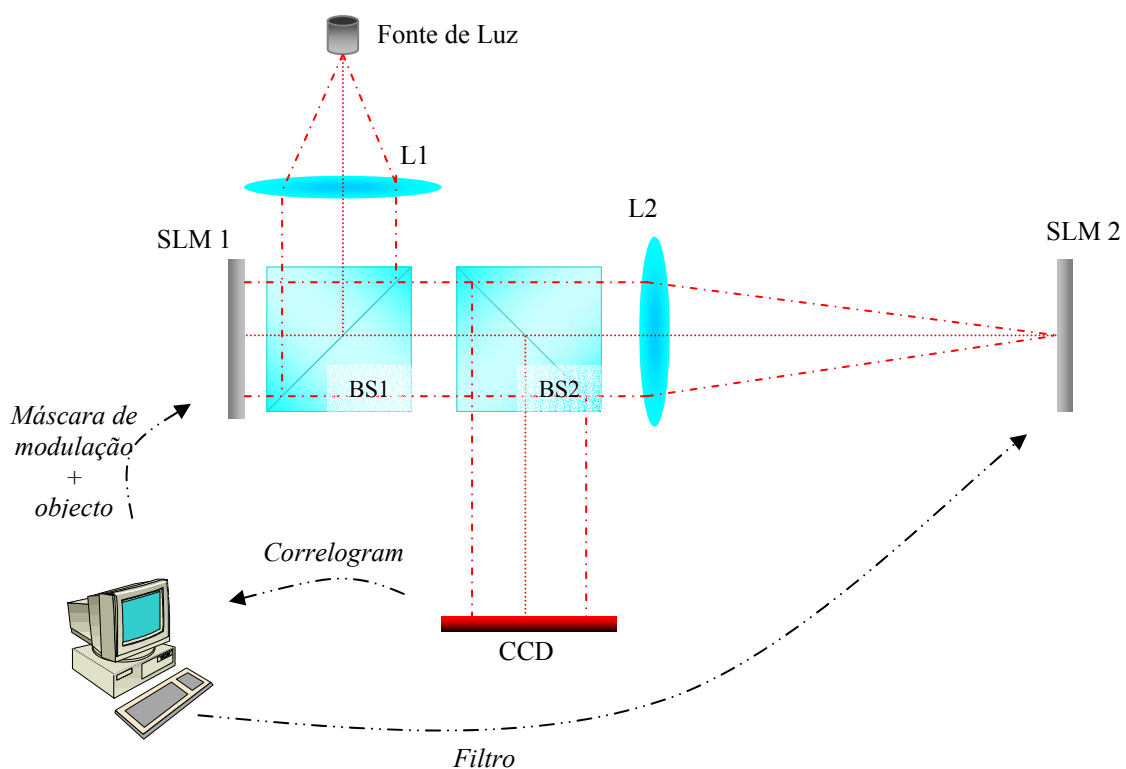


Figura 5.1: Esquema da montagem experimental de um correlacionador 4f (configuração dobrada) com modulação da fase do objecto para compensar o alinhamento.

A configuração proposta em 5.1 é semelhante a um processador 4f dobrado. Neste caso é utilizada apenas uma lente transformadora de Fourier (L2) para reduzir os problemas de alinhamento transversal e longitudinal.

O sistema é iluminado com um feixe de luz coerente, colimado pela lente L1.

De acordo com o esquema, os SLM a utilizar devem ser reflexivos. A imagem do objecto e a máscara de modulação são enviadas pelo PC para o mesmo SLM (SLM1). Este deve ser contínuo e só de fase para nele se poder reproduzir uma máscara idêntica à apresentada na secção 4.2. Embora o objecto inicial não apresente informação de fase, é possível converter o seu padrão de energia numa imagem de fase^[40].

O SLM para onde é enviado o filtro deve ser de só de fase, pelas razões apresentadas, na secção 2.3.1, embora não seja estritamente necessário que seja contínuo, uma vez que da literatura se sabe que os filtros binários e só de fase são bastante adequados para executar o algoritmo de correlação^[33, 41].

A configuração requer a utilização de dois divisores de feixe. BS1 permite iluminar o SLM1 e BS2 reencaminha o feixe para o detector, o qual pode ser uma simples câmara CCD existente no mercado.

Através de técnicas algorítmicas semelhantes à apresentada na secção 3.5, é possível tornar o sistema auto-suficiente na escolha da máscara mais adequada e corrigir automaticamente o desalinhamento entre a TF do objecto e o filtro.

Numa segunda fase poder-se-á ainda tentar aplicar a técnica a outros tipos de processadores ópticos, caso o plano de frequências lhe seja inerente (por exemplo o microscópio de contraste de fase).

REFERÊNCIAS

- [1] Joseph W Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, second edition, McGraw–Hill companies (1998).
- [2] Fritz Zernike, *How I discovered phase contrast*, Nobel Lecture (1953).
- [3] Eugene Hecht, *Óptica*, Fundação Calouste Glubenkian (1991).
- [4] Ronald N. Bracewell, *The Fourier transform and Its Applications*, second edition, McGraw–Hill companies (1985).
- [5] *What is correlation?; Why optical Correlation?*
http://www.opticalcorrelator.com/optical%20correlator/optical_correlator.htm
- [6] A. Brown and N. Gerein, *Direct P(Y) Code Acquisition Using An Electro-Optic Correlator*, Proceedings of ION National Technical Meeting, Long Beach, CA (2001).
- [7] J. Rosen, *Tree Dimesional Optical Correlator*, <http://www.bgu.ac.il/bgn/threed.html>
- [8] G. Keryer, *Pattern Recognition*, http://www-optique.enst-bretagne.fr/12_CAN2.htm
- [9] OE Reports, *Optical processing & Computing*,
<http://www.spie.org/web/oer/july/jul97/optical.html>
- [10] N. Clark, *Measuring blood flow and tissue motion using optical correlation*,
http://www.srilanka.spie.org/web/oer/may/blood_flow.html
- [11] j. Metz, and K. Johnson, *Optically Computing the Hit-Miss Transform for an Automated Cervical Smear Screening*, Applied Optics, Vol. 39, pp 803-813 (2000).
- [12] F. Oehlschlager, P. Schwille and M. Eigen, *Detection of Hiv-1 RNA by nucleic acid sequence-based amplification combined with fluorescence correlation spectroscopy*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol 93, pp 12811-12816 (1996).
- [13] D. Selviah, *Pattern Recognition Filter Design*,
<http://www.ee.ucl.ac.uk/~odevices/Research/NeuralLearning.html>
- [14] Bradley G. Boone, *Signal Processing Using Optics*, Oxford (1998).

- [15] Anthony Vander Lugt, *Signal Detection by Complex Spatial Filtering*, IEEE Trans. Inf. Th., Vol IT-10, pp 139-145 (1964).
- [16] C Weaver and J Goodman, *A Technique for Optically Convolving Two functions*, Applied Optics, vol 57, pp 1248-1249 (1966).
- [17] X. Lu, F.S. Yu and D. Gregory, *Comparison of VanderLugt and Joint Transform Correlators*, Applied Physics B, Vol. 51, pp 153-164 (1990).
- [18] F. S. Yu, Q. Song, Y Cheng, and D. Gregory, *Comparison of detection efficiencies for Vander Lugt and Joint Transform Correlators*, Applied Optics, Vol. 29, pp 225-232 (1990).
- [19] S. Bains, *Optical correlators escape from the lab*, OE Reports, Vol. 170 (1998).
- [20] The catalog, *Spyndler and Hoyer*, T1-U22, (1998).
- [21] A. Vander Lugt, *The effects of Small Displacements of Spatial Filters*, Applied Optics, Vol.6, pp 1221-1225 (1967).
- [22] M. Usategui, S. Monroe and R. Juday, *Automated Self Alignment procedure for optical correlators*, Opt. Eng., Vol. 36, pp 1782-1791 (1997).
- [23] D. Casasent and A. Furman, *Sources of Correlation Degradation*, Applied Optics, Vol.16, pp 1652-1661 (1977).
- [24] M. Constant, *Signal to Noise Ratio*,
http://www.cctv-information.co.uk/constant2/sn_ratio.html
- [25] Anthony Vanderlugt, *Optical Signal Processing*, John Wiley & Sons, Inc. (1992).
- [26] J. horner, *Metrics for assessing pattern-recognition performance*, Applied Optics, Vol. 31, pp 165-166 (1992).
- [27] Oppenheim and J. Lim, *The importance of Phase in Signals*, proceedings of the IEEE, Vol. 69, pp 529-535 (1981).
- [28] A. Fernandes, C. Correia, *Optical Signal Processing – Matlab Virtual Laboratory*,
<http://lei.fis.uc.pt/ppessoais/anam/main.htm>
- [29] J. Horner, *Light utilization in optical correlators*, Applied Optics, Vol. 21, 4511-4513 (1982).
- [30] J. Horner and P. Gianino, *Phase-only matched filtering*, Applied Optics, Vol.23, pp 812-816 (1984).

- [31] H. Caulfield, *Role of the Horner Efficiency in the optimization of spatial filters for optical pattern recognition*, Applied Optics, Vol.21, pp 4391-4392 (1982).
- [32] A. Awwal, M. Karim and S. Jahan, *Improved correlation discrimination using an amplitude-modulated phase-only filter*, Applied Optics, Vol.29, pp 233-236 (1990).
- [33] N. Mannivannan, M. Neil and E. Paige, *Optical multiple pattern recognition with a correlator using a single binary phase-only filter*, Optics communications, Vol. 178, pp 37-51 (2000).
- [34] L. Cai, Y. Jin, S. Zhou, P. Yeh, N. Marzwell and H. liu, *Translation Sensitivity Adjustable Compact Optical Correlator and its Application for Fingerprint Recognition*, Opt. Eng., Vol. 35, pp 415-422 (1996).
- [35] J. Nicolás, J. Campos, C. Lammi, I. Moreno and M. Yzuel, *Convergent Optical Correlator Alignment Based on frequency Filtering*, Applied Optics, Vol. 41, pp 1505-1514 (2002).
- [36] D. Casasent, *Spatial Light Modulators*, Proceedings of the IEEE, Vol. 65, pp 143-146 (1977).
- [37] G. Carhart, M. Vorontsov and E. Justh, *Opto-Electronic Zernike Filter for High-Resolution Wavefront Analysis using a Phase-Only Liquid Crystal Spatial Light Modulator*, Technical Research Report of the Center for Dynamics and Control of Smart Structures, (2001).
- [38] *Liquid Crystal Spatial Light Modulator*,
http://www.bnonlinear.com/Product%20Pages/128/128*128Tech.html
- [39] Ting-Chung Poon and Partha P. Banerjee, *Contemporary Optical Image Processing With MATLAB*, first edition, Elsevier Science Ltd (2001).
- [40] J. Davis, D. Cottrell, J. Campos, M. Yzuel and I. Moreno, *Encoding Amplitude Information onto phase-only filters*, Applied Optics, Vol. 38, pp 5004-5013 (1999).
- [41] J. Horner and H. Bartelt, *Two – bit Correlation*, Applied Optics, Vol. 24, pp 2889 – 2893 (1985).

APÊNDICES

Código fonte em MATLAB desenvolvido para simular a técnica de alinhamento por modulação de fase, com uma máscara ideal.

Programa Principal - “*Corr_prisma.m*”

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Objectivo - Mostrar a importância da matriz de modulação na compensação do desalinhamento
%
% método - simula-se um processador 4f e observa-se o pico de autocorrelação antes e depois de se
% introduzir no sistema a matriz de fase com a modulação adequada ao desalinhamento do filtro

clear all
close all

m=200; % numero de linhas
n=200; % numero de colunas

% objecto*****
[imagem,map]=imread('d:\backup_lab\matlab\pictures\globulos\agr03-1.bmp');
imagem=imresize(imagem, [m n]);
imagem=double(imagem);

figure (1) % mostra a imagem do objecto
imshow(imagem,[]);

% construção da matriz de modulação*****
máscara=ones(m,n);
ro=1;
kx=-0.1;
ky=0;
for x=1:m,
    for y=1:n,
        máscara(x,y)=ro*exp(i*2*pi*(kx*x+ky*y)); %distribuição de campo
    end
end

obj_mod=imagem.*máscara; %objecto modulado

%TF do objecto não modulado e modulado*****

```

```

ft_obj=fftshift(fftnorm(imagem));
ft_obj_mod=fftshift(fftnorm(obj_mod));

clear obj_mod máscara
pack

% filtro desalinhado (TF da ref. desalinhado)*****
h=zeros(m,n);
%h(m-49:m,:)=ft_obj(1:50,:);
h(1:m-20,:)=ft_obj(21:m,:);
ft_ref_desv=h;

clear h
pack

figure(2) % mostra o filtro desalinhado + TF do objecto não modulado
colormap winter
surf(abs(ft_obj.^2));
view(-75,30);
shading interp;
hold on
surf(abs(ft_ref_desv.^2));
view(-75,30);
shading interp;
hold off

figure(3) % mostra o filtro desalinhado + TF do objecto modulado
colormap winter
surf(abs(ft_obj_mod.^2));
view(-75,30);
shading interp;
hold on
surf(abs(ft_ref_desv.^2));
view(-75,30);
shading interp;
hold off

% correlação perfeita (sem modulação e filtro alinhado)*****
corr_perf=fftshift(fftnorm(ft_obj.*angle(conj(ft_obj)))); % filtro só de fase
corr_perf=normalizar(imagem,corr_perf); % conservação da energia
[snr_rms_perf]=snr_slm(n,m,2,abs(corr_perf)); % SNR

% correlação sem modulação e filtro desalinhado *****
corr=fftshift(fftnorm(ft_obj.*angle(conj(ft_ref_desv))));
corr=normalizar(imagem,corr);

```



```

fft_a=(fft2(a));

% somatório do quadrado do valor dos pixels da TF
j=0;
t=0;
soma2=0;
for j=1:m
    for t=1:n
        soma2=soma2+(abs(fft_a(j,t))^2);
    end
end
factor=sqrt(soma1/soma2); % conservação da energia

fft_a=(fft_a.*factor);

clear soma1 soma2 j t factor
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Função – “normalizar.m” – permite respeitar o teorema da conservação da energia entre a imagem do objecto e o correlograma (neste caso).

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% função que respeita a conservação de energia entre duas quantidades

function norm_destino=norm(origem,destino) %*****
% somatório do quadrado do valor dos pixels da quantidade 1
[m,n]=size(origem);
soma1=0;
for j=1:m
    for t=1:n
        soma1= soma1+(abs(origem(j,t))^2);
    end
end

% somatório do quadrado do valor dos pixels da quantidade 2
j=0;
t=0;
soma2=0;
for j=1:m
    for t=1:n
        soma2=soma2+(abs(destino(j,t))^2);
    end
end

```

```
factor=sqrt(soma1/soma2); % conservação de energia
norm_destino=destino.*factor;
```

```
clear soma1 soma2 j t factor
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Função – “*snr_slm.m*” – Permite determinar a SNR entre média da energia do sinal e a média da energia do ruído

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% Função que calcula a SNR entre os valores médios do sinal e ruído da matriz
```

```
%
```

```
% variáveis de entrada- n_col: n° de colunas da matriz
```

```
% - n_row: n° de linhas da matriz
```

```
% - v_pico: n° de casas da matriz consideradas sinal
```

```
% - matriz com os valores
```

```
% variáveis de saída: - snr_med: relação sinal ruído entre valores médios do sinal e ruído
```

```
%
```

```
function[snr_med]=snr(n_col,m_row,v_pico,matrix) %*****
```

```
% encontra o valor de pico*****
```

```
val_max=0;
```

```
p_max=0;
```

```
c_max=0;
```

```
for x=1:m_row,
```

```
    for y=1:n_col,
```

```
        if matrix(x,y)>val_max,
```

```
            val_max=matrix(x,y);
```

```
            p_max=x;
```

```
            c_max=y;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
signal_min=0.5*val_max; % valor mínimo para sinal
```

```
noise_max=0.3*val_max; % valor máximo para ruído
```

```
clear val_max
```

```
pack
```

```
% selecciona a os valores em torno do pico que contribuem para o sinal *****
```

```
x_signal=0;
```

```
y_signal=0;
```

```
Epico=0.0;
```

```
x_min=p_max-v_pico;
```

```

y_min=c_max-v_pico;
x_max=p_max+v_pico;
y_max=c_max+v_pico;

if x_min<1,
    x_min=1;
end

if x_max>m_row,
    x_max=m_row;
end

if y_min<1,
    y_min=1;
end

if y_max>n_col,
    y_max=n_col;
end

% soma de todos os valores considerados sinal*****
for x=x_min:x_max,
    for y=y_min:y_max,
        if matrix(x,y)>signal_min,
            signal(x,y)=matrix(x,y); % matriz que guarda os valores de sinal
            x_signal=x_signal+1;
            y_signal=y_signal+1;
        end
    end
end

Epico=sum(sum(signal.^2)); % soma o quadrado de todos os valores considerados sinal

clear signal x_max y_max signal_min
pack

% determina os valores que contribuem para ruído*****
x_noise=0;
y_noise=0;
Enoise=0;
for x=1:m_row,
    for y=1:n_col,
        if matrix(x,y)<noise_max;
            noise(x,y)=matrix(x,y);
            x_noise=x_noise+1;
            y_noise=y_noise+1;
        end
    end
end

```

```
end
end
end

Enoise=sum(sum(noise.^2)); % soma o quadrado de todos os valores considerados ruído

clear noise
pack

% cálculo da relação sinal ruído entre o valor médio de sinal e o valor médio de ruído***
med_pico=(Epico)/(x_signal*y_signal); % média do sinal
med_noise=(Enoise)/(x_noise*y_noise); % média do ruído
snr_med=med_pico/med_noise;

clear Epico Enoise x_signal y_signal x_noise y_noise
```