

SISTEMA PARA INSPEÇÃO AUTOMÁTICA DO DIÂMETRO E COLORAÇÃO DE PELOTAS DE MINÉRIO PARA MELHORIA DO PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO BASEADO EM VISÃO COMPUTACIONAL¹

Renato Ferreira Lima e Corrêa Pereira²

Marcelo Borghetti Soares³

Luiz Fernando Etrusco Moreira⁴

Alysson Ribeiro das Neves⁵

Resumo

A sinterização é um processo na qual pelotas de minério recebem tratamento térmico para alterarem suas propriedades, obtendo um aumento de sua dureza e resistência à tração ou desgaste. Para que o ar quente do alto-forno possa queimá-las adequadamente, o diâmetro dessas pelotas deve estar entre 8mm e 10mm. Pelotas fora dessa faixa de diâmetro podem, ao fim do processo, permanecer não-sinterizadas, apresentando comportamento rúptil e sendo propensas, ao sofrerem impacto, à geração do fino, que consiste em minúsculas partículas de minério indesejadas como produto final. Tais pelotas, denominadas pelotas "verdes", podem, através de sua coloração, ser diferenciadas das que passaram corretamente pelo processo de sinterização. O presente trabalho trata da criação de um sistema de visão capaz de detectar o aumento ou diminuição, tanto do diâmetro médio dessas pelotas quanto da quantidade de pelotas "verdes", permitindo ao operador ou aos sistemas de controle existentes no processo, atuarem para que as pelotas sejam produzidas em tamanho e qualidade adequadas, aperfeiçoando sua produção, eliminando produtos indesejados e mantendo o bom funcionamento dos equipamentos envolvidos. A execução do sistema com imagens obtidas em produção aponta que os valores de diâmetro obtidos estão de acordo com as medidas reais realizadas bem como a taxa de pelotas "verdes" detectada reflete corretamente a quantidade real de fino produzido.

Palavras-chave: Visão computacional, Industria, Sistemas, Otimização.

SYSTEMS FOR AUTOMATIC DIAMETER AND COLOUR INSPECTION OF PELLETS TO IMPROVE THE SINTERING PROCESS USING COMPUTER VISION

Abstract

Sintering is a process in which pellets are treated thermally so as to alter its properties to become harder and more resistant to traction and detrition. In order to be adequately burned by the blast furnace, the diameter of these pellets must lie in the range between 8mm and 10mm. Pellets out of this range of diameter may remain not sintered and become more fragile and through eventual collisions or impacts they can produce small particles, called "fine", an undesired product of the process. These pellets are called green (nonfired) pellets and they can be identified by their color, which is different from the color of successfully sintered (fired) pellets. This work presents a system conceived to identify the percentage of diameters of pellets and the amount of green pellets, providing a way for an operator or a control system to adjust the system parameters to produce pellets with the desired quality. The idea is to improve the production process, to eliminate undesired products and to contribute to the proper functioning of the equipment used in the process. The system was tested with images captured from real line production and the results indicate that the measured diameter matches the real diameter percentages and the amount of green pellets detected reflects the real percentage of fine.

Keywords: Computer vision; Industry; Systems; Optimization.

¹ Contribuição técnica ao 17º Seminário de Automação e TI Industrial, 24 a 27 de setembro de 2013, Vitória, ES, Brasil.

² Eng. Computação. Engenheiro de Aplicação. Invent Vision. Belo Horizonte, MG, Brasil.

³ Dr. Ciência da Computação. Gerente de Software. Invent Vision. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁴ Doutor em Eng. Elétrica. Diretor de Tecnologia. Invent Vision. Belo Horizonte, MG, Brasil.

⁵ MBA. Gerenciamento de Projetos. Gerente Operações. Invent Vision. Belo Horizonte, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Soluções que diminuam a intervenção humana sempre foram uma demanda muito comum em ambientes industriais. Sistemas baseados em visão computacional têm se tornado cada vez mais utilizados,^(1,2) uma vez que, além de garantir mais robustez e repetitividade,^(3,4) diminuem a chance de acidentes em ambientes críticos.

Este artigo tem como objetivo apresentar um sistema para inspeção automática de diâmetro e coloração de pelotas para auxiliar o processo de sinterização, gerando indicadores que, apresentados ao operador ou integrados a sistemas de controle, possibilitarão tomar as ações necessárias para aperfeiçoar a produção de pelotas de minério.

A sinterização é, em síntese, um processo no qual as pelotas recebem um tratamento térmico para alterarem suas propriedades químicas. Essas alterações nas propriedades químicas, por sua vez, geram produtos com propriedades físicas diferentes. Como exemplo de propriedades físicas pode-se citar: tenacidade, condutividade elétrica e condutividade térmica.

Um parâmetro importante no processo de sinterização é o diâmetro das pelotas. Os valores de diâmetro ótimos para pelotas de minério de nióbio se encontram na faixa entre 8mm e 10mm. Pelotas pequenas demais, de diâmetro menor que 8mm, não permitem que o ar quente do forno as queime de maneira correta. Assim, ao fim do processo, há grande probabilidade de essas pelotas se manterem não-sinterizadas, gerando, nos processos seguintes, o “fino”, minúsculas partículas de minério, indesejadas como produto final. Em contrapartida, se as pelotas forem grandes demais, muito maiores que 10mm, é necessário aumentar a temperatura do forno para que elas queimem integralmente. Um dos problemas com o aumento excessivo da temperatura é danificar o próprio forno. Detectar o aumento ou a diminuição do diâmetro médio das pelotas, que estão entrando no forno, permite ao operador ou aos sistemas de controle existentes no processo, atuarem para que as pelotas sejam produzidas em tamanho adequado, o que aperfeiçoará a produção e manterá o bom funcionamento dos equipamentos envolvidos.

Outra característica das pelotas que não são corretamente sinterizadas é que elas apresentam um coloração específica, tipicamente sendo denominadas de pelotas “verdes” (embora essa cor não seja necessariamente verde. O termo é empregado uma vez que as pelotas não se encontram “maduras”). Tais pelotas apresentam comportamento rúptil e também podem gerar “finos”. Detectar o aumento, em tempo real, da taxa de pelotas “verdes” existentes permite ao operador do processo atuar, evitando que elas continuem a ser produzidas, o que otimizará a produção.

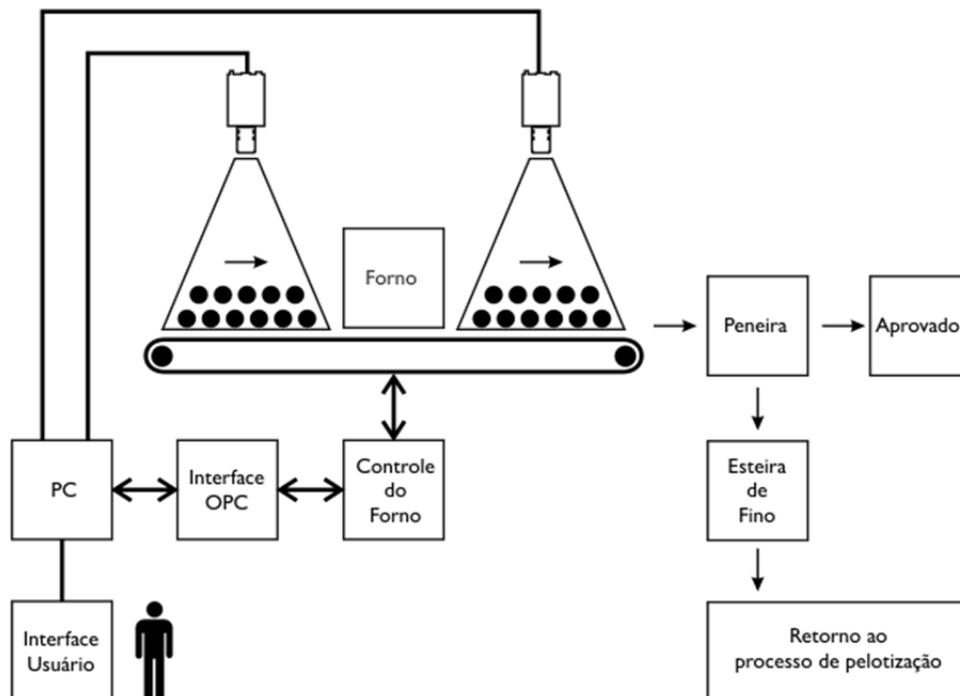


Figura 1 - Esquema representando o processo de sinterização aplicados às pelotas de minério. Perceba que as pelotas passam por uma inspeção de sistema de visão antes e após o alto-forno. O resultado dessa inspeção é mostrado ao operador por meio de uma interface e também é comunicado ao sistema de automação da planta.

Esse tipo de solução pode ser implementada em um cenário similar ao ilustrado na **Figura 1**. Nessa figura, as pelotas oriundas do processo de pelotização chegam por meio de uma esteira para serem aquecidas. O sistema de visão é conectado a um conjunto de câmeras antes e depois do forno de forma a inspecionar o diâmetro antes do cozimento e a coloração após o cozimento. No fim da esteira as pelotas seguem para uma peneira, de forma que pelotas mal sinterizadas quebram com o impacto e caem em um repositório de fino, retornando novamente ao processo de pelotização.

A inspeção do sistema de visão disponibiliza uma interface com o operador de forma que este consiga visualizar:

- o percentual de pelotas antes de entrar no forno para cada faixa de diâmetro.
- o percentual de pelotas verdes após sair do forno.

Com base no resultado dessa inspeção o operador pode ter conhecimento se o percentual de pelotas verdes (que posteriormente irão gerar fino) está acima do aceitável. Esse percentual poderá ser usado pelo operador para tomar decisões em relação ao ajuste de parâmetros do sistema (por exemplo, temperatura do forno).

A informação sobre a quantidade de pelotas verdes ou diâmetros acima do aceitável poderão ser configurados de forma a, automaticamente, permitir que o sistema envie comandos ao controlador do forno para que ele altere a temperatura do forno, por exemplo. Na **Figura 1**, esse tipo de comunicação é feito por meio de um protocolo OPC que recebe as requisições do cliente (sistema de visão) e então efetua os comandos de controle de temperatura do forno.

Neste trabalho foram implementados (i) o problema da medição do diâmetro das pelotas e (ii) o problema da determinação da coloração das pelotas, conforme

ilustrado no cenário descrito na **Figura 1**. A integração do sistema de visão com os sistemas de automação da linha serão tratados futuramente. Os resultados obtidos na resolução de cada problema são discutidos nas seções a seguir.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A implantação de um sistema de visão computacional requer o entendimento dos componentes desse sistema. Esses componentes, apresentados na Figura 1(1) serão descritos a seguir.

2.1 Componentes de um Sistema de Visão

- *Câmeras*: As câmeras são os dispositivos responsáveis por capturar imagens dos objetos ou regiões inspecionados. A escolha da câmera ideal requer a definição cuidadosa de parâmetros tais como resolução, sensibilidade, velocidade de aquisição e interfaces padrão.
- *Ótica*: A escolha das lentes e filtros deve levar em consideração a distância focal e a distância de trabalho, de forma a permitir a captura de imagens ideais. Lentes inadequadas podem ocasionar imagens com distorção além do tolerado, o que dificulta os métodos de visão computacional.
- *Sistema de Iluminação*: Nos ambientes de siderurgia, a variação de luminosidade pode ser brusca devido à presença de elementos incandescentes causados, por exemplo, pelo carregamento de ferro gusa em uma panela. Dentre as opções de iluminação pode-se citar as lâmpadas fluorescentes e halógenas, além de iluminação por *leds*.
- *Software*: O software é a alma do sistema de visão e pode ser executado pelo computador ou por um processador embutido na câmera, no caso das chamadas Smart Cameras.
- *Unidade de Interface - IHM e Unidade de E/S*: Os sistemas de visão possuem algumas interfaces principais, além da interface com a câmera: a interface com o operador e a interface com a automação. A interface com o operador do sistema normalmente é composta por um sinótico simplificado que mostra ao operador questões críticas do teste ou do status do sistema, permitindo a rastreabilidade das peças e sinais luminosos ou sonoros indicando alguma condição de alerta aos operadores. Já a interface com a automação envolve comunicação via portas serial e/ou ethernet, ou qualquer outro meio de comunicação do computador com um hardware externo capaz de transmitir sinais de controle para a automação.

2.2 Procedimentos e Configuração dos Equipamentos Utilizados no Trabalho

A parametrização de um sistema de visão para uma aplicação específica é realizada através da utilização de um banco de imagens coletado *in-loco*. Esse banco deve conter amostras de imagens representativas da variabilidade do processo.

Um parâmetro importante para a realização de análise dimensional por imagens é a obtenção da resolução espacial do sistema que é dada em *pixels/mm*. Esse parâmetro é obtido considerando-se basicamente a resolução da câmera, a

distância até o alvo e a lente utilizada. Além disso, é comum utilizar objetos com tamanho conhecido para se realizar uma calibração.

Nas próximas seções serão descritas as montagens para cada um dos sistemas implementados.

2.2.1 Montagem utilizada no sistema de medição de diâmetro de pelotas

No caso da medição de diâmetro de pelotas, a montagem foi realizada sobre a esteira que transporta as pelotas ao forno, após a saída da peneira, na esteira localizada logo antes do forno da **Figura 1**, com orientação perpendicular a sua superfície a uma distância de aproximadamente 690mm. O esquema da montagem realizada está ilustrado na **Figura 2**.

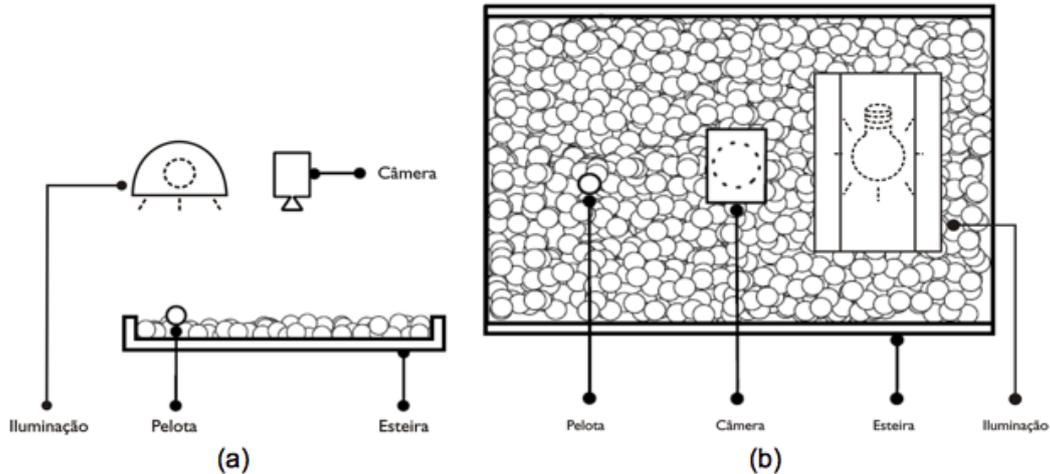


Figura 2 - Instalação da câmera. (a) Visão em seção lateral e (b) horizontal.

2.2.2 Montagem utilizada no sistema de determinação de coloração de pelotas.

No caso da determinação da coloração das pelotas, a montagem foi realizada próximo a uma esteira que transporta as pelotas ao resfriador, na esteira localizada após o forno na **Figura 1**. O esquema da montagem realizada está ilustrado na figura **Figura 3**.

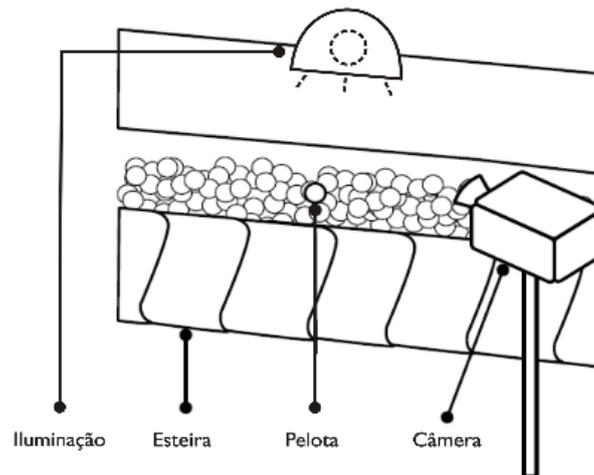


Figura 3 - Esquema de instalação da câmera.

A calibração *pixel/mm* não é importante nesta montagem, já que é realizada uma inspeção por cor.

Nas seções a seguir serão apresentadas as metodologias desenvolvidas para cada um dos sistemas.

2.3 Metodologia para Medição de Diâmetro de Pelotas

Consideremos como imagem de entrada a **Figura 4a**. A **Figura 4b** corresponde a uma porção da **Figura 4a**, ampliada para melhor visualização.

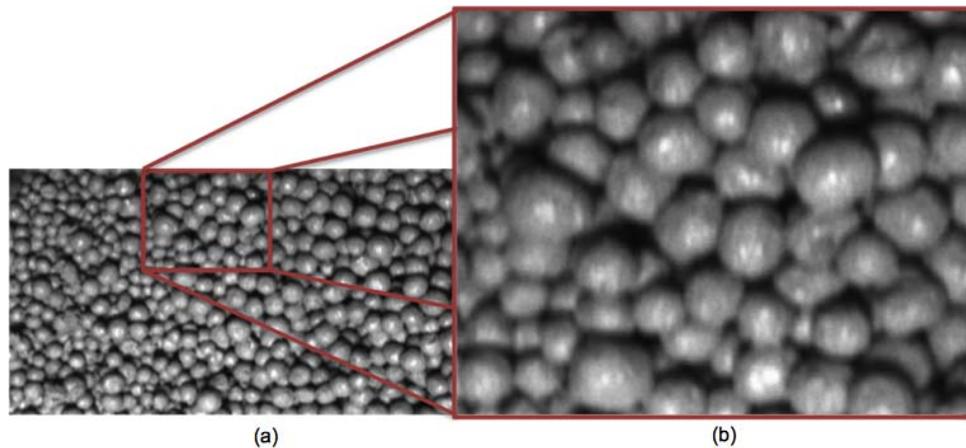


Figura 4 - (a) Imagem de entrada do algoritmo. (b) Porção ampliada da imagem (a).

Para medir o diâmetro das pelotas, foi desenvolvido um algoritmo que percorre toda a imagem em busca de formas semelhantes a pelotas. Encontrando-se essas pelotas, filtram-se aquelas que estão sobrepostas e mede-se o diâmetro de cada uma delas, classificando-o em faixas. O algoritmo proposto pode ser dividido em 4 etapas: pré-processamento, detecção de centros, estimativa de área e segmentação.

No primeiro passo do algoritmo, o de pré-processamento, procura-se remover ruídos e equalizar a o brilho da imagem (na captura das imagens, a fonte de iluminação estava mais próxima das pelotas localizadas na parte inferior da imagem, causando uma diferença de brilho nas pelotas verticalmente).

O segundo passo do algoritmo proposto consiste em encontrar o ponto de máximo de iluminação de cada uma dessas pelotas e aproximá-los como sendo o centro de cada uma delas. Para tanto, aplica-se inicialmente um filtro sobre a imagem, para remover a informação de alta frequência. Após essa operação, procede-se com uma operação de binarização. Sobre a imagem resultante, eliminam-se aglomerados de pixel com áreas muito pequenas (que podem representar ruídos) e encontra-se o centro de massa de cada aglomerado. A **Figura 5a** mostra o resultado dessa operação.

Encontrados os pontos de luminosidade máxima de cada pelota, o algoritmo segue para a etapa de estimativa de área de cada pelota, e cria um diagrama de células a partir dos pontos de máximo obtidos. O diagrama correspondente é apresentado na **Figura 5b**.

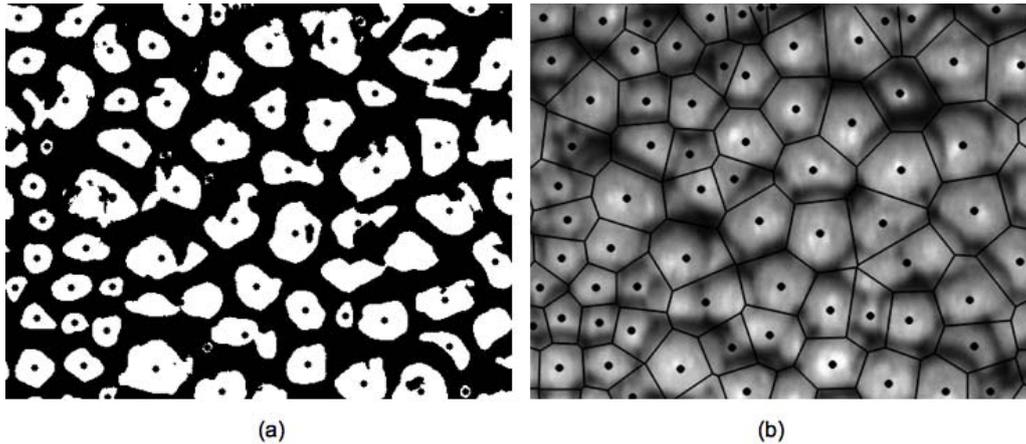


Figura 5 - (a) Centro dos pontos de luminosidade máxima detectados. (b) Diagrama de célula dos pontos de máximo encontrados.

Em seguida, o algoritmo aproxima cada pelota por um círculo com área igual à da célula correspondente. Dessa forma, na etapa de segmentação, o centro de cada circunferência é aproximado como sendo o ponto de máximo de iluminação. Para filtrar circunferências mal posicionadas, eliminam-se aquelas que possuam valor médio de intensidade dos pixels internos abaixo de um limiar T_{gray} . Eliminam-se, também, circunferências que possuam quantidade de pixels escuros acima de um limiar T_{dark} e que representem, potencialmente, transições entre duas pelotas.

A **Figura 6** mostra o resultado do algoritmo após o passo realizado acima.

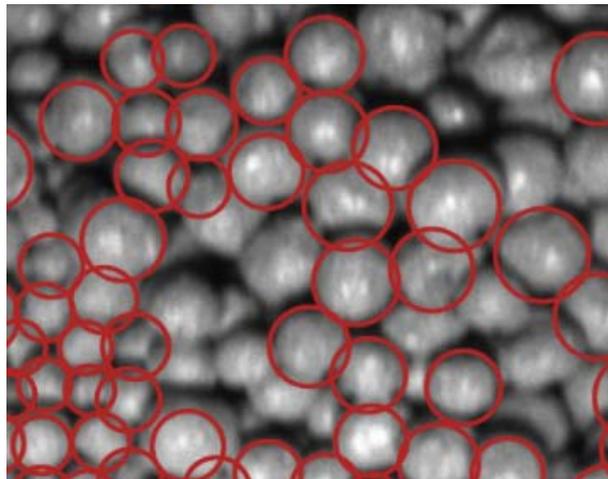


Figura 6 - Circunferências detectadas.

A partir das informações obtidas dessas circunferências, é possível agrupá-las em faixas de diâmetro. É importante verificar que, devido à forma com que o diagrama de células foi construído, pelotas próximas às extremidades da imagem de entrada possuem células com vértices localizados fora dos limites da imagem, o que faz com que tenham áreas maiores que o real. Para tornar o resultado mais preciso, desconsideram-se as células localizadas nas bordas (repare que na parte superior da imagem poucas pelotas foram reconhecidas).

2.4 Metodologia para Determinação da Coloração de Pelotas

Consideremos como imagem de entrada a **Figura 7a**. Para identificar as pelotas “verdes”, foi desenvolvido um algoritmo que percorre uma imagem numa região de interesse e busca por pixels dentro da faixa de cores as quais elas podem assumir. Caso a área ocupada por esses pixels seja igual ou superior a um limiar T_{area} , considera-se que uma pelota foi encontrada, sendo ela segmentada na imagem de saída.

O algoritmo proposto pode ser dividido em 3 etapas básicas: pré-processamento, detecção e segmentação. Na etapa de pré-processamento, define-se a região de interesse. Para essa figura, a região de interesse foi definida como sendo a área delimitada pelo quadrilátero vermelho da **Figura 7a**. Após esse passo, aplica-se sobre essa figura um filtro, visando a eliminar informação de alta frequência que, em geral, representa ruído.

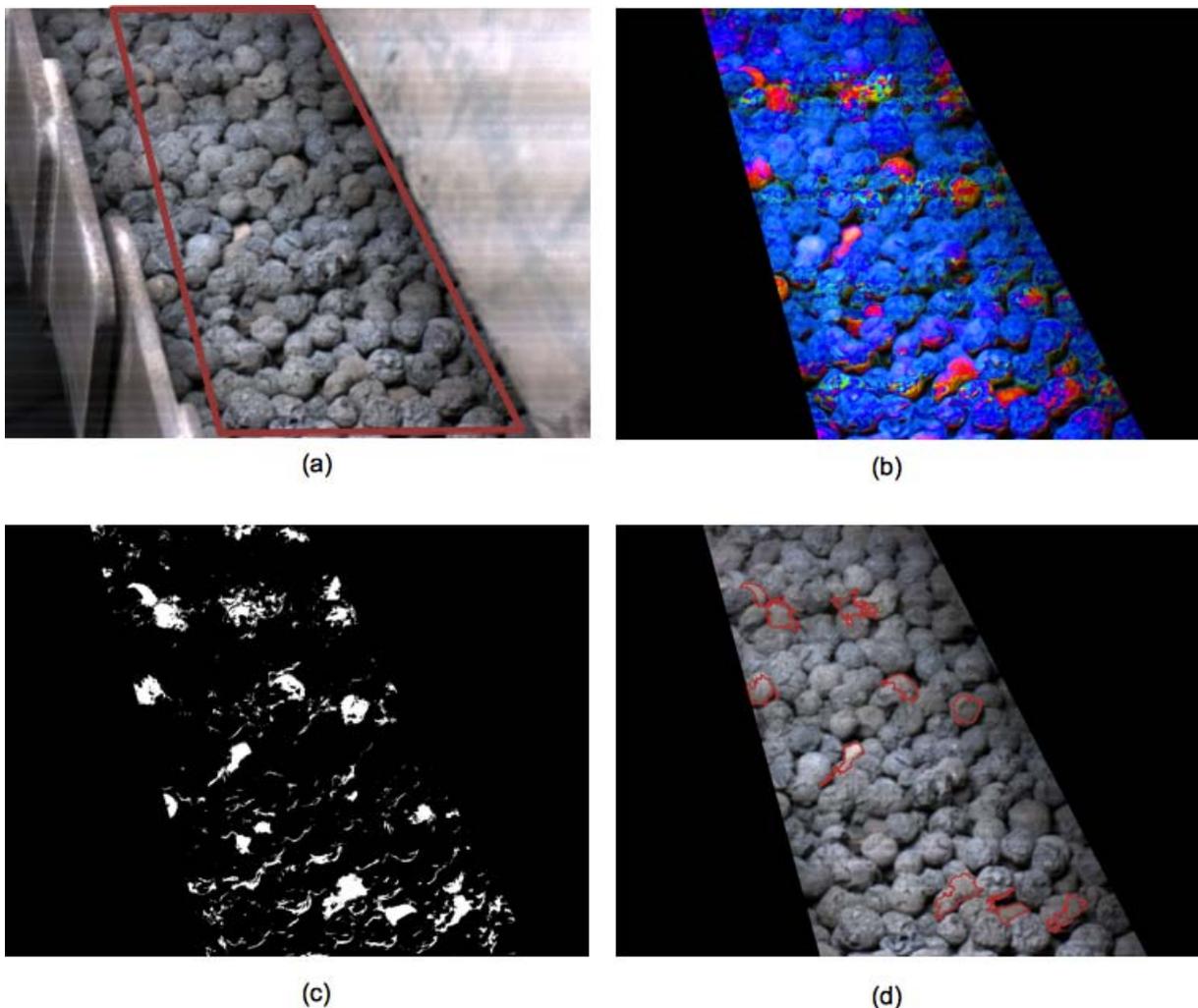


Figura 7 - (a) Imagem de entrada. (b) Região de interesse após filtro de mediana e saturação máxima. (c) Pixels pertencentes à faixa de cor desejada. (d) Pelotas "verdes" segmentadas.

Inicia-se, então, na fase de detecção, a busca das pelotas de cor desejada nessa região. Para tanto, converte-se a imagem para um espaço de cor mais adequado para a resolução deste problema. Em seguida, buscam-se os pixels na região de interesse que se encontrem na faixa de cor desejada. Nesse momento, a

informação de saturação do pixel é desconsiderada. Pixels de luminância muito alta ou muito baixa (próximos do branco e do preto, respectivamente) também são desconsiderados. O algoritmo deve ser capaz de identificar pixels de cores próximas ao vermelho e ao amarelo na **Figura 7b**.

Após o passo descrito acima, o algoritmo desenvolvido produz o resultado mostrado na **Figura 7c**. Nessa figura, a cor branca representa regiões cuja cor se encontra dentro da faixa desejada. Dessa forma, para prosseguir na identificação das áreas que representam as pelotas de cor desejada, na etapa de segmentação, removem-se os contornos considerados pequenos na **Figura 7c**. O resultado dessa operação é o apresentado na **Figura 7d**, com as pelotas consideradas “verdes” segmentadas.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados do Sistema de Medição de Diâmetro de Pelotas

Para testar o algoritmo proposto, foi utilizada a sequência de imagens capturadas em campo. Assim, com uma sequência de 60 imagens, o algoritmo produziu como resultado a síntese das dimensões das pelotas presentes nas imagens, agrupadas em faixas, conforme apresentado no gráfico da **Figura 8**, gerado em tempo real durante a execução do algoritmo. É possível observar que as pelotas detectadas encontram-se, em sua maioria, na faixa de 10mm a 14mm.

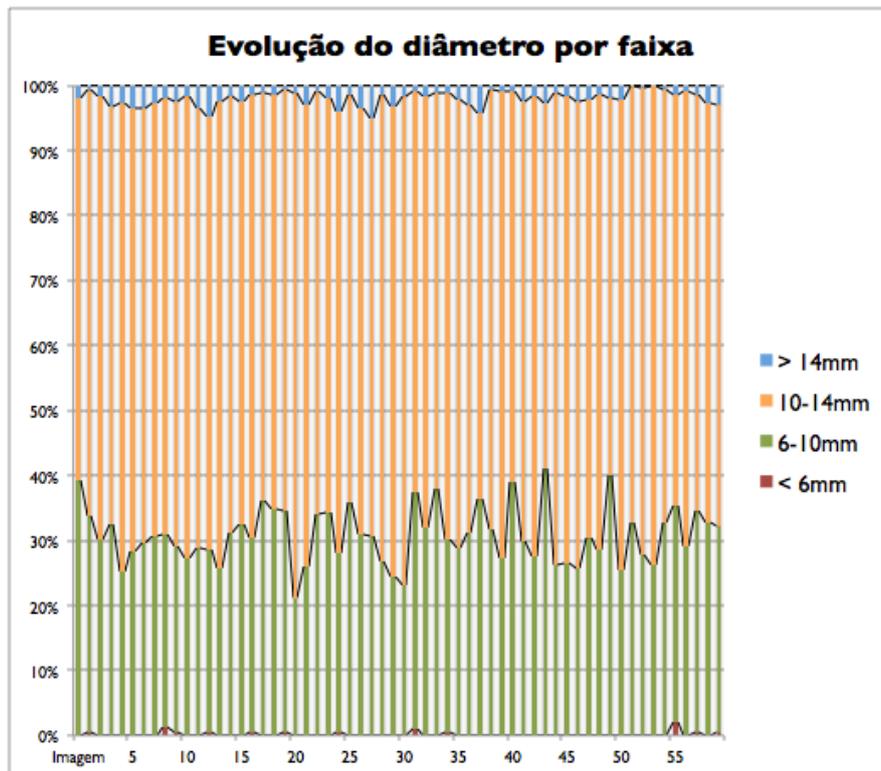


Figura 8 - Evolução do diâmetro das pelotas por faixa.

Considerando as pelotas de todas as faixas de diâmetro da imagem de entrada, a média do diâmetro se manteve estável ao longo do processo, com valores próximos a 10,8mm. Este valor corrobora o valor médio de diâmetro das pelotas.

3.2 Resultados do Sistema de Determinação de Coloração de Pelotas

Para testar o algoritmo proposto, foi utilizada uma sequência de imagens capturadas em campo. Dessa forma, para a primeira imagem da sequência foi definida a região de interesse (que é a mesma para todas as outras imagens da sequência), e, em seguida, todas as imagens da sequência foram processadas pelo algoritmo proposto.

Devido às dificuldades no acesso dos locais ótimos para instalação da câmera utilizada na obtenção das imagens, a imagem de entrada do processo retrata apenas uma porção das pelotas que passaram pelo cozimento, já que a câmera foi instalada em uma posição onde há oclusão de grande parte da esteira por onde passam as pelotas, como pode ser visto na **Figura 9**. É importante frisar que, considerando uma instalação definitiva, a câmera deve ser instalada em um local onde é possível visualizar a maior parte da esteira possível.

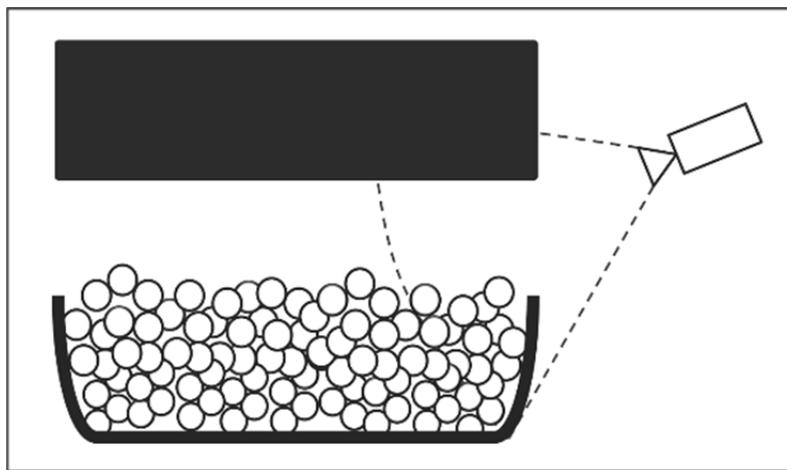


Figura 9 - Captura das imagens não abrange todas as pelotas da esteira.

Além disso, algumas das pelotas estão parcialmente cozidas (possuem duas colorações distintas), e não são contabilizadas como pelotas “verdes”. Dessa forma, pode não ser adequado apresentar como resultado do processo apenas a quantidade de pelotas consideradas “verdes”, mas o percentual de pixels da faixa de cor procurada. Considerou-se mais adequado apresentar como resultado o percentual de área verde, já que esse dado deve representar uma melhor aproximação do estado de cozimento de toda a esteira.

O gráfico da **Figura 10** representa a evolução da área considerada “verde” ao longo da sequência de imagens.

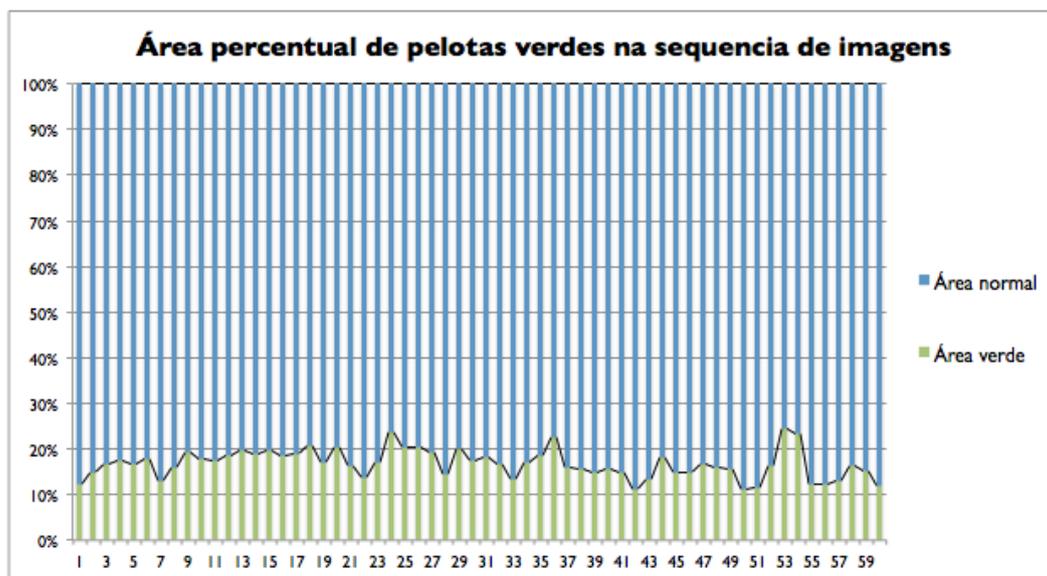


Figura 10 - Evolução da área “verde” ao longo da sequência.

Para uma sequência de 20 imagens, buscaram-se, manualmente, pelotas “verdes”. Foram contabilizadas 288 pelotas. A contagem realizada pelo algoritmo buscou retornar um total de 278 pelotas. Desse total, 6 pelotas foram contadas a mais (falsos positivos), o que pode ser justificado pois a contagem manual pode ter levado em conta uma faixa de cor que extrapola aquela definida para o algoritmo. Entretanto, 16 pelotas não foram contabilizadas (falsos negativos).

Assim, para esse conjunto de dados, o algoritmo obteve uma taxa de acerto de 92%.

4 CONCLUSÃO

Analisando-se os resultados obtidos através da execução do sistema com imagens capturadas em produção, verifica-se que os valores de diâmetro obtidos estão de acordo com as medidas esperadas para as pelotas, assim como a taxa de pelotas “verdes” detectada também reflete corretamente a quantidade real de fino produzido na ocasião da captura.

O método utilizado para medir o diâmetro das pelotas apresenta algumas limitações a serem trabalhadas. Por exemplo, a detecção dos centros das pelotas (necessária para a correta inspeção) depende de um setup de iluminação uniforme que garantirá que não existam regiões da imagem mais escuras que outras. Além disso, por ser um sistema que não garante ausência de luminosidade externa, é interessante investigar soluções implementadas para ambientes externos.⁽⁵⁾ Com esse tipo de alternativa, um maior número de centros de pelotas poderão ser identificados e não haverá a ocorrência de centros mal localizados.

Da mesma forma, são necessárias melhorias no algoritmo de agrupamento utilizado para identificação de pelotas verdes para identificar corretamente os limites de cada pelota e eliminar ruídos que causem falsos positivos.

Por fim, com o aumento da precisão do sistema, é interessante que seu resultado possa se integrar aos demais sistemas de controle do processo além de ser apresentado de maneira amigável ao operador. Para tanto, a criação de uma interface de comunicação com os sistemas de automação deverá ser implementada, bem como uma interface apropriada com o operador e com sistemas de banco de

dados. Essas interfaces permitirão a análise de resultados e a tomada de decisão adequadas para a melhoria do processo.

REFERÊNCIAS

- 1 MOREIRA, L.F.E.; OLIVEIRA, C.A.A.; SOARES, M.B; SILVA, E. Sistema de tratamento e processamento de imagens: sistemas de visão no processo produtivo. Revista InTech América do Sul, n. 120, p. 32-39. ISSN: 1518-6024.
- 2 SOARES, M.B, MOREIRA, L.F.E.; DINIZ, L. F. De M. Das NEVES, A. R. Sistemas para automatização de processos por meio de visão computacional nas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas. In: 16º Seminário de Automação e TI Industrial, 2012, Belo Horizonte/MG, Brasil.
- 3 Reis, L. M. S. M.; MOREIRA, L.F.E.; SOARES, M.B; Reconhecimento automático do número da panela por visão computacional para *tracking* de painéis em aciarias. In: 15º Seminário de Automação e TI Industrial, 2011, São Paulo/SP, Brasil.
- 4 Machado, H. N., Silva, E. D., Tamiatti, M. V. G., Moreira, L. F. E., Oliveira, M., Quintão, I. Reconhecimento de texto impresso em chapas através de OCR. In: 15º Seminário de Automação e TI Industrial, 2011, São Paulo/SP, Brasil.
- 5 SOARES, M.B, MOREIRA, L.F.E.; DINIZ, L. F. De M. Das NEVES, A. R. Detecção e rastreamento de emissão de particulado em processos siderúrgicos por imagem. In: 16º Seminário de Automação e TI Industrial, 2012, Belo Horizonte/MG, Brasil.