

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

FERNANDO JOSÉ GIZA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE LEITURA E CÁLCULO DO
RENDIMENTO PARA FITAS TRANSPORTADORAS A GRANEL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2017

FERNANDO JOSÉ GIZA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE LEITURA E CÁLCULO DO
RENDIMENTO PARA FITAS TRANSPORTADORAS A GRANEL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Eletrônica – COELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus, Toledo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Marcos Kolling

Coorientadora: Prof. Ma. Jaqueline Vargas

TOLEDO

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso Nº 52

Desenvolvimento de um sistema de leitura e cálculo do rendimento para fitas transportadoras a granel

por

Fernando José Giza

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 15h30 do dia **22 de junho de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Eletrônica**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Fábio Rizental Coutinho
(UTFPR-TD)

Prof. Me. Victor A. F. de Carvalho
(UTFPR-TD)

Prof. Dr. Evandro M. Kolling
(UTFPR-TD)
Orientador(a)

Prof. Me. Jorge A. V. Alves
Coordenador(a) da COELE

Dedico este trabalho à minha família e meus amigos.

“A mente que se abre à uma nova ideia, jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui registrados meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de alguma forma para que fosse possível a realização deste trabalho em especial:

Aos docentes do curso de Engenharia Eletrônica envolvidos na minha formação;

Ao professor Dr. Evandro Marcos Kolling pela orientação e incentivo à iniciação científica;

Aos meus familiares por todo apoio concedido durante minha formação no curso de Engenharia Eletrônica.

RESUMO

GIZA, Fernando José. Desenvolvimento de um Sistema de Leitura e Cálculo do Rendimento para Fitas Transportadoras a Granel. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Bacharelado em Engenharia Eletrônica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2017.

Atualmente, não é possível medir manualmente e instantaneamente, parâmetros como ângulo de repouso e vazão de produto em uma fita transportadora durante seu funcionamento por delimitações humanas. De posse desses parâmetros, o gerenciamento de uma unidade de armazenamento de grãos seria otimizado, uma vez que o ângulo de repouso por exemplo, implica no dimensionamento de armazéns onde o produto é estocado. Além disso, a leitura de vazão de produto em uma fita transportadora, auxilia em tomadas de decisões importantes como o tempo necessário para transportar determinado volume de grãos ao seu destino, ou até mesmo, formação de uma estimativa de rendimento de processos de beneficiamento de grãos como processos de limpeza e secagem de grãos. Com base nisso, o presente trabalho teve seu foco na implementação de um sistema microcontrolado de coleta de dados em tempo real em fita transportadora, o qual foi capaz de coletar dados de ângulo de repouso e volume de produto transportado por unidade de tempo em uma fita transportadora desenvolvida para ensaios em laboratório. Os dados obtidos pelo sistema desenvolvido demonstram ter proximidade com os valores reais medidos com um erro relativo absoluto máximo de 8,17% na medição de volume total de produto transportado pela fita e erro relativo absoluto máximo de 10,04% na medição de ângulo de repouso médio de produto. A margem de erro pode ser otimizada com pequenas melhorias no sistema o que indica que o mesmo tem possibilidade de ser implementado em ambientes comerciais de modo a atender seus objetivos propostos.

Palavras-chave: Fita Transportadora, Ângulo de Repouso, Monitoramento Pós-Colheita.

ABSTRACT

GIZA, Fernando José. System Real Time Monitoring of Grain Transport Tape Carrier Agroindustrial Development. 2017. Final Project Report (Bachelor's Degree in Electronics Engineering), Federal University of Technology – Paraná, Toledo, 2017.

Currently, it is not possible to measure manually and instantly, parameters such as angle of repose and product flow on a conveyor belt during its operation because of human delimitation. With the use of these parameters, the management of a grain storage company would be optimized, since the angle of repose, for example, implies in the sizing of warehouses where the product is stored. In addition, the reading of product flow on a conveyor belt assists in making important decisions such as the time required to transport a given volume of grain to its destination, or even, an estimation of the yield of cleaning and drying processes. Based on this, the present work focused on the implementation of a microcontrolled system of data collection in real time on conveyor, which was able to collect data of grain angle of repose and volume of product transported per unit of time on a conveyor belt developed for laboratory testing. The data obtained by the developed system show to be close to the actual values measured with a maximum absolute relative error of 8.17% in the measurement of total volume of product transported by the conveyor belt and maximum absolute relative error of 10.04% in the measurement of the product angle of repose average. The margin of error can be optimized with small improvements in the system, which indicates that it has the possibility of being implemented in commercial environments in order to meet its proposed objectives.

Keywords: Conveyor Belts, Resting Angle Grain, Post-harvest Monitoring.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Etapas de produção e pré-processamento..... | 6 |
| Figura 2. Fita Transportadora Industrial..... | 7 |
| Figura 3. Dispositivo HC-SR04..... | 7 |
| Figura 4. Forma de onda nos pinos do dispositivo HC-SR04 durante seu funcionamento..... | 8 |
| Figura 5. Dispositivo GP2Y0A41SK..... | 9 |
| Figura 6. Curva Típica do dispositivo GP2Y0A41SK0F..... | 10 |
| Figura 7. Fita Transportadora construída..... | 13 |
| Figura 8. Inversor de frequência e Disjuntor motor..... | 14 |
| Figura 9. Diagrama Trifilar de Força..... | 15 |
| Figura 10. Curvatura da fita transportadora..... | 16 |
| Figura 11. Caixa de contenção de grãos..... | 17 |
| Figura 12. Placa de Desenvolvimento Mega 2560..... | 18 |
| Figura 13. Conversor AC/DC encapsulado..... | 19 |
| Figura 14. Interface de programação da placa de desenvolvimento..... | 20 |
| Figura 15. Interface gráfica de monitoramento do sistema..... | 21 |
| Figura 16. Sensores ultrassônicos instalados..... | 22 |
| Figura 17. Metodologia de levantamento de pontos da equação da curva dos sensores infravermelhos..... | 24 |
| Figura 18. Curva distância x valor digital para Sensor 1..... | 25 |
| Figura 19. Sinal com ruídos..... | 27 |
| Figura 20. Sinal com ruído suavizado..... | 27 |
| Figura 21. Esquema do divisor resistivo de tensão..... | 28 |
| Figura 22. Etapas de simplificação do cálculo da seção transversal instantânea de grãos..... | 30 |
| Figura 23. Processo de medição de ângulo de repouso do milho..... | 32 |
| Figura 24. Representação do método de cálculo de ângulo de repouso..... | 33 |
| Figura 25. Vazão de grãos de milho na fita transportadora..... | 35 |
| Figura 26. Deslocamento de erro relativo para diferentes grupos de coleta de dados..... | 39 |
| Figura 27. Histograma de uma coleta de dados de ângulo de repouso..... | 43 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| AVR | Família de microcontroladores desenvolvidos pela ATMEL |
| IDE | <i>Integrated Development Environment</i> |
| PCI | Placa de Circuito Impresso |
| PWM | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| UBE | Unidade de Beneficiamento e Estocagem |
| USART | <i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i> |
| USB | <i>Universal Serial Bus</i> |
| PSD | <i>Position Sensitive Detector</i> |
| IR-LED | <i>Infrared Light Emitting Diode</i> |
| A/D | <i>Analog/Digital</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REFERENCIAL TEÓRICO | 3 |
| 2.1. CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS..... | 3 |
| 2.1.1. Ângulo de Repouso..... | 3 |
| 2.1.2. Medição de Volume e Vazão de Grãos..... | 4 |
| 2.2. EQUIPAMENTOS E SISTEMAS ELETRÔNICOS E ELETROME CÂNICOS...5 | |
| 2.2.1. Transportadores..... | 5 |
| 2.2.2. Sensores Ultrassônicos..... | 7 |
| 2.2.3. Sensores infravermelhos..... | 9 |
| 2.2.4. Microcontroladores..... | 11 |
| 2.2.5. Sensores de Velocidade..... | 11 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 13 |
| 3.1. CONSTRUÇÃO DA FITA TRANSPORTADORA..... | 13 |
| 3.1.1. Motor..... | 14 |
| 3.1.2. Roletes..... | 15 |
| 3.1.3. Caixa de Contenção de Produto | 16 |
| 3.2. SISTEMA ELETRÔNICO..... | 17 |
| 3.2.1. Microcontrolador | 18 |
| 3.2.2. Interface de Programação..... | 19 |
| 3.2.3. Interface Gráfica do Sistema Desenvolvido..... | 20 |
| 3.3. SENSORES DE DISTÂNCIA | 22 |
| 3.4. VELOCIDADE INSTANTÂNEA DA FITA..... | 28 |
| 3.5. MEDIÇÃO DO PERFIL DA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS GRÃOS NA FITA TRANSPORTADORA..... | 30 |
| 3.6. CÁLCULO DO ÂNGULO DE REPOUSO..... | 32 |
| 3.7. CÁLCULO DE VAZÃO E VOLUME TOTAL DE GRÃOS..... | 34 |
| 3.8. COLETA DE DADOS..... | 35 |
| 4. RESULTADOS | 37 |
| 4.1. VOLUME TOTAL DE PRODUTO..... | 37 |
| 4.1.1. Análise de Exatidão..... | 37 |

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| 4.1.2. Análise de Repetitividade..... | 39 |
| 4.2. ÂNGULO DE REPOUSO..... | 40 |
| 4.2.1. Análise de Exatidão..... | 41 |
| 4.2.2. Análise de Repetitividade..... | 42 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 44 |
| REFERÊNCIAS..... | 46 |

1. INTRODUÇÃO

Grande é o avanço tecnológico atual em alguns setores da agricultura, como em máquinas agrícolas, tipo tratores, semeadoras e colhedoras. No entanto, as atividades de pós-colheita ainda demandam de tecnificação e automação para que se uniformizem com as demais ramificações setoriais.

Modernizadas ou não, as UBE (Unidades de Beneficiamento e Estocagem), unidades responsáveis pelo beneficiamento e armazenamento temporário de produtos agrícolas, necessitam do frequente acompanhamento e monitoramento funcional, para o gerenciamento administrativo e respaldo das tomadas de decisões operacionais no trato da matéria prima. Boa parte destas, passa pela análise de algumas das propriedades físicas dos produtos manipulados na unidade.

Neste sentido, várias informações precisam ser levantadas pelas unidades. Muitas destas informações ainda estão vinculadas a atividades manuais para o levantamento de dados, cálculos e determinação das propriedades dos produtos transportados. Este processo demanda de tempo e disposição de mão de obra, o que pode atrasar e até inviabilizar decisões ou, em alguns casos estão condicionadas ao emprego de equipamentos específicos que demandam alto investimento de aquisição e instalação.

Nessa etapa de produção, em que o homem pode controlar cada acontecimento, o conhecimento técnico e operacional das etapas, o emprego de equipamentos e sistemas de monitoramento e automatização podem constituir o diferencial qualitativo e econômico da tomada de decisão e repercutir na eficiência dos sistemas contribuindo com a sustentabilidade dos mesmos.

Um fator relevante para a competitividade no setor de equipamentos para a armazenagem agrícola é a constante evolução tecnológica, principalmente envolvendo a automação dos equipamentos. A automação empregada no processo permite o total controle sobre a atividade da unidade, garantindo que a qualidade final do produto esteja compatível com o padrão exigido pelos clientes (KANTOR, 2011).

Com base nisso, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de medição e cálculo do volume e ângulo de repouso, propriedade esta dependente do tipo e característica de cada produto. O sistema é composto por sensores que auxiliam na tomada de dados do perfil superficial do produto

transportado em fitas transportadoras. Associado com a informação da velocidade da fita, é possível obter indiretamente parâmetros como ângulo de repouso do produto, vazão e volume total transportado. Além disso, a visualização destes parâmetros em tempo real através de interface gráfica facilita a tomada de decisões e análise do comportamento da fita transportadora e de algumas das características do produto transportado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas informações em torno dos elementos deste trabalho levantadas através de consultas bibliográficas.

2.1. CARACTERÍSTICAS DOS PRODUTOS AGRÍCOLAS

O conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos produtos agrícolas é de fundamental importância para uma correta conservação e para o projeto, dimensionamento, construção e operação dos diversos equipamentos utilizados nas principais operações de pós-colheita destes produtos (PUZZI,2000). Além disso, as características do produto são de grande interesse para o controle e automação de equipamentos, que podem agregar valor econômico ou reduzir custos com mão de obra e tempo na operação de processamento do produto (NUNES, 2015).

Algumas características como a massa específica granular são usadas para a determinação de teor de umidade e dos danos causados por insetos e pragas nos grãos armazenados. Outras características como velocidade terminal dos grãos, são utilizados para dimensionamento de separação e limpeza, transportes pneumáticos, secagem, resfriamento, seleção densimétrica, etc. Outras características como calor específico, condutividade, tamanho e forma são úteis para se avaliar a qualidade dos grãos bem como auxiliar no projeto de sistemas de beneficiamento e armazenamento adequados para os mesmos.

Dentre as propriedades físicas do produto, destacamos o ângulo de repouso e, do sistema transportador, o volume de produto (empregado na obtenção de outras propriedades), as quais constituíram objeto de caso neste trabalho e representam uma enorme importância no que se trata de dimensionamento da unidade de armazenamento de grãos e controle de fluxo de produto.

2.1.1. Ângulo de Repouso

O conhecimento do valor do ângulo de repouso dos grãos é importante para determinar a capacidade estática dos silos, capacidade de fitas transportadoras e o

dimensionamento de moegas, dutos e rampas de descarga de grãos. O ângulo de repouso é aquele formado entre a superfície da massa de grãos e o plano horizontal, quando descarregados numa superfície plana (ELIAS, 2008).

Essa propriedade é determinada geralmente por métodos como do funil fixo, da inclinação de caixa, cilindro giratório, etc. Entretanto, exigem mão de obra e tempo para execução, e podem ser considerados inviáveis para situações em que há a necessidade de verificações frequentes. O ângulo de repouso interfere no preenchimento do volume de um silo. Assim, quanto menor o ângulo de repouso, maior será o volume de grãos de soja que poderão ser armazenados em um silo, com acomodação natural do produto (POHNDORF,2011). Os fatores que afetam o ângulo de repouso são o tamanho e a forma dos grãos, o teor de umidade, a presença de material estranho, a orientação das partículas e, principalmente, a rugosidade da superfície da semente (MOHSENIN,1974).

2.1.2. Medição de Volume e Vazão de Grãos

A atividade de medir a capacidade volumétrica de silos, armazéns e a vazão de fitas transportadoras, pode representar uma importante prática para o controle de estoque e na determinação da capacidade operacional real e/ou instantânea de transportadores. Neste caso o uso de célula de carga, sensores volumétricos ou os atuais sistemas de escaneamento, são soluções que permitem estimar o volume em curto espaço de tempo, permitindo acompanhamento frequente da massa.

Um exemplo de equipamento similar existente atualmente são as balanças de fluxo contínuo. As balanças de fluxo contínuo são equipamentos que realizam a medição da massa de produto através do uso de células de carga. Para isto, o produto agrícola é inserido em câmaras de pesagem e, logo após um tempo de estabilização, através do auxílio de sistema eletrônico, realiza-se a pesagem. Para manter o fluxo do produto, são utilizados no mínimo duas câmaras de pesagem, as quais trabalham de forma alternada, ou seja, enquanto uma câmara cheia de produto realiza a medição da massa, a outra está em processo de enchimento ou então, liberação do produto para o processo de transporte. O limitante de tecnologias como esta, estão geralmente associados à alocação e custo de instalação destes sistemas (ELIAS, 2008).

2.2. EQUIPAMENTOS E SISTEMAS ELETRÔNICOS E ELETROMECAÂNICOS

Os equipamentos eletrônicos e eletromecânicos permitem automatizar de forma inteligente tarefas repetitivas em locais como indústrias fazendo com que as atividades sejam realizadas com maior eficiência, rapidez e qualidade. Com a utilização de microcontroladores por exemplo, as decisões são baseadas e cálculos rápidos e o comando de atuadores torna-se ágil corrigindo falhas e otimizando o sistema antes mesmo de ocasionar danos aos produtos ou operadores.

2.2.1. Transportadores

Os transportadores são equipamentos desenvolvidos para o transporte de grânéis sólidos de um ponto para outro, em qualquer direção, com o menor dano possível, de forma contínua, individual ou integrado (OCHÔA, 2011). São geralmente utilizados em cooperativas para deslocar o produto armazenado inicialmente em moegas para sistemas de limpeza, secagem e demais processos de beneficiamento que visam adequá-lo às condições de comercialização.

Os principais tipos de transportadores são elevadores de caçamba, rosca transportadora e fitas ou correias transportadoras. A fita transportadora ou transportador de correia é o meio mais versátil e mais difundido para movimentação de carga em instalações industriais (DIAS, 2008).

Em UBEs, as fitas transportadoras são responsáveis por movimentar grandes quantidades de produtos. Estes são transportados para outros equipamentos, armazenadores ou mesmo para expedição.

A Figura 1 exibe um fluxograma representativo de uma UBE. Cada indicação de fluxo pode representar a necessidade de um meio transportador, como uma fita transportadora.

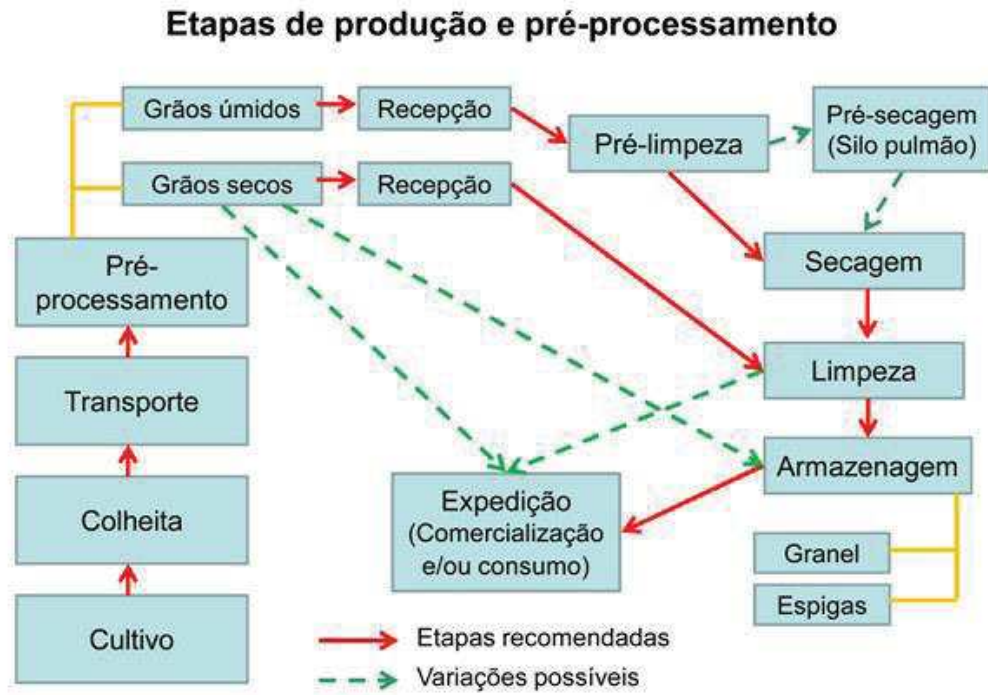


Figura 1. Etapas de produção e pré-processamento.
 Fonte: www.cnpms.embrapa.br

Basicamente, uma fita transportadora é composta por um motor, o qual é responsável por fornecer o torque necessário para movimentar uma fita, geralmente constituída de borracha onde o produto é depositado e transportado. A fita se move apoiada em roletes os quais giram em torno de seu eixo constituído de mancais, permitindo o deslizamento da fita de forma livre. Sua curvatura permite assegurar que o produto não escoe para as laterais e geralmente é definida com um ângulo variando de 5 a 10 graus menor que o ângulo de repouso do produto transportado (FILHO, 1994).

Geralmente as fitas transportadoras trabalham com velocidades em torno de três metros por segundo dependendo do porte da fita e possuem comprimento que pode variar de dezenas a centenas de metros dependendo da distância entre os pontos de inserção e destino do produto, necessitando em muitos casos da utilização de um número maior de fitas para cumprir a função de transportar produtos a longas distâncias.

A Figura 2 ilustra um exemplo de fita transportadora utilizada em cerealistas.



Figura 2. Fita Transportadora Industrial.
Fonte: www.jmsequipamentos.com.br

2.2.2. Sensores Ultrassônicos

Sensores ultrassônicos são muito utilizados para medição de distância sem realizar o contato com o meio sob medição. Um exemplo de dispositivo utilizado para este fim é o dispositivo HC-SR04, cuja imagem pode ser visualizada na Figura 3.



Figura 3. Dispositivo HC-SR04.
Fonte: Autor.

A operação do dispositivo HC-SR04 se dá a partir do recebimento de um pulso de tensão de 5 V em um de seus pinos denominado *Trigger* e então, através de um transdutor de efeito piezelétrico, são disparados oito pulsos de onda ultrassônica com frequência igual a 40 kHz. Ao receber o eco desta onda através de outro transdutor piezelétrico, o dispositivo transmite um pulso através de seu outro pino denominado *Echo* (NAKATANI,2014). Portanto, para o controle deste dispositivo, deve ser utilizado um microcontrolador, o qual em tempo determinado, enviará um pulso ao pino *Trigger* e aguardará um sinal vindo do pino *Echo* do dispositivo a partir do qual realizará o cálculo do tempo de resposta da onda ultrassônica.

Utilizando do tempo de resposta e das propriedades da onda sonora e seu meio de propagação é possível calcular a distância entre o sensor ultrassônico e o obstáculo logo a sua frente. As formas de onda geradas neste processo podem ser visualizadas na Figura 4.

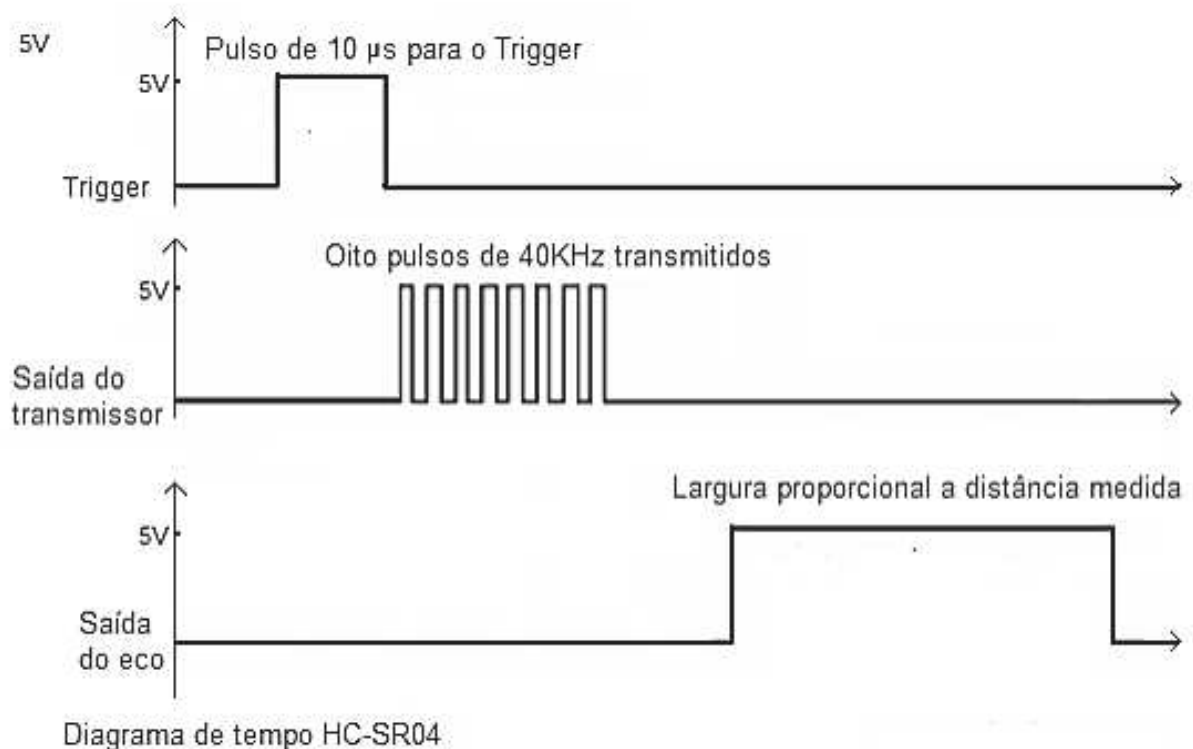


Figura 4. Forma de onda nos pinos do dispositivo HC-SR04 durante seu funcionamento. Fonte: www.circuitstoday.com

Este dispositivo é muito utilizado em projetos didáticos, protótipos comerciais e segundo o fabricante pode realizar leitura de distância entre 20 e 4000 mm com precisão que pode chegar até 3 mm. Para seu funcionamento é exigido uma fonte de alimentação com tensão contínua de 5 V. Fatores como temperatura e superfície a ser medida podem influenciar em sua medição devido ao fato de que a velocidade de propagação pode variar e as ondas ultrassônicas disparadas possuem um ângulo ligeiramente aberto que pode causar efeitos acústicos e diminuir a precisão da medição.

2.2.3. Sensores infravermelho

Os sensores de distância infravermelhos, apresentam-se como outro método otimizado de leitura de distância não invasivo. Um dos dispositivos para medição de distância por efeito infravermelho encontrado no mercado é da marca Sharp, modelo GP2Y0A41SK que pode ser visualizado na Figura 5.



Figura 5. Dispositivo GP2Y0A41SK
Fonte: Autor.

É composto por uma combinação de um PSD (*position sensitive detector*), IR-LED (*infrared-light emitting diode*) e um circuito de processamento de sinal. Para sua alimentação é necessária uma tensão de corrente contínua na faixa de 4,5 a 5,5 V.

Possui um pino de saída analógica o qual fornece tensão que varia de acordo com a distância mensurada pelo dispositivo. A curva típica de leitura do valor de tensão neste pino em relação à distância medida pode ser visualizado na Figura 6.

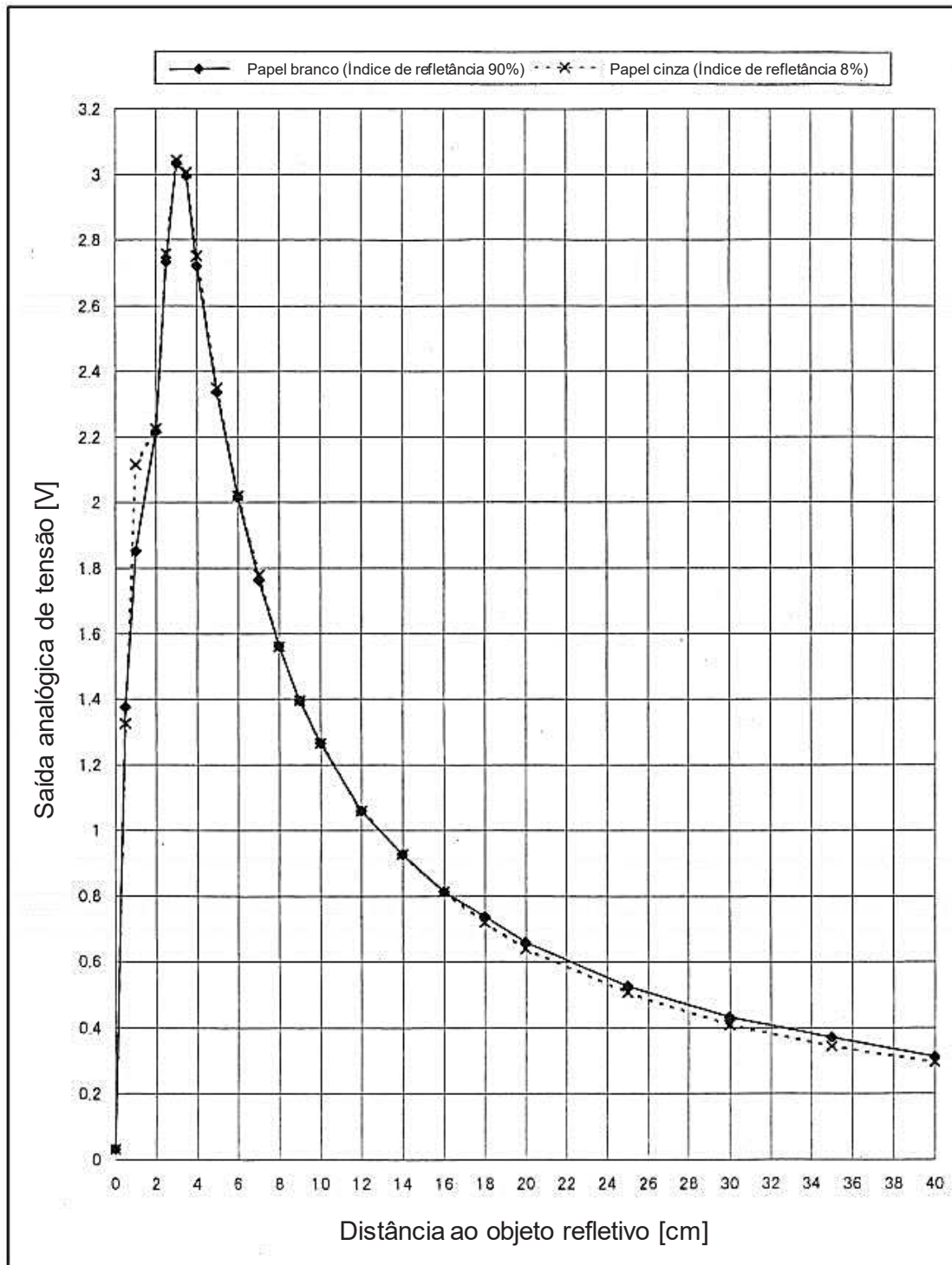


Figura 6. Curva Típica do dispositivo GP2Y0A41SK0F.
Fonte: GP2Y0A41SK0F Datasheet.

Este dispositivo possui capacidade de medir com boa precisão distâncias entre 40 e 300 mm utilizando o método da triangulação o qual impede que fatores como temperatura e índice de reflexão da superfície influenciem significativamente na medição de distância.

2.2.4. Microcontroladores

Os microcontroladores são dispositivos eletrônicos programáveis que desempenham diversas tarefas, dentre elas: controle de processos industriais, realização de cálculos matemáticos, leitura de sensores, armazenamento de dados, etc. Os microcontroladores estão presentes em quase tudo o que envolve a Eletrônica, diminuindo o tamanho, facilitando a manutenção e gerenciando tarefas internas de aparelhos eletroeletrônicos. (MARTINS, 2005). Muitos produtos que temos disponíveis, simplesmente não existiriam, ou não teriam as mesmas funcionalidades sem um microcontrolador. É o caso, por exemplo, de vários instrumentos biomédicos, instrumentos de navegação por satélite, detectores de radar, equipamentos de áudio e vídeo, eletrodomésticos, entre outros (SOUZA, 1999).

Um exemplo de microcontrolador é o ATMEGA2560, produzido pela Atmel, o qual possui uma memória flash de programa com 256 KB, e funciona tipicamente em uma frequência de *clock* igual à 16 MHz. Além disso, possui 86 linhas de entrada/saída de propósito geral, geração de PWM (*Pulse Width Modulation*), 4 canais de comunicação USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*), 16 canais de conversão A/D (*Analog/Digital*) e opera com uma tensão entre 4,5 e 5,5 V. O ATMEGA2560 faz parte da família de microcontroladores AVR de 8 bits, que são muito comercializados por sua alta performance e um baixo consumo de energia.

2.2.5. Sensores de Velocidade

Os sensores de velocidade são muito importantes em sistemas automatizados onde há motores, esteiras e demais mecanismos em movimento pois permite obter

dados precisos sobre estes movimentos que podem ser utilizados como parâmetros para várias funções do sistema. Há várias formas indiretas de se medir a velocidade dependendo do tipo de movimento que se deseja medir.

No caso de fitas transportadoras, é possível medir a velocidade da mesma com base no deslocamento de pontos de referência localizados na fita dentro de um tempo determinado. A partir disso, calculando-se a razão do deslocamento percorrido e o tempo pré-determinado, obtêm-se a velocidade da fita.

Outra forma seria de medir indiretamente a velocidade da fita baseando-se em equipamentos de controle de velocidade de motores como inversores de frequência que disponibilizam interfaces de comunicação serial ou analógica pelas quais é possível adquirir informação da frequência aplicada ao motor. Porém como se trata de um parâmetro indireto, deve-se atentar-se a fatores que podem afetar a precisão como o deslizamento da fita e também o coeficiente de arrasto do motor relacionado com a carga a qual está movimentando.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados neste trabalho bem como a metodologia adotada para desenvolvimento do sistema proposto.

3.1. CONSTRUÇÃO DA FITA TRANSPORTADORA

A fita transportadora utilizada para este trabalho, foi construída utilizando para sua estrutura de sustentação, elementos de madeira os quais foram acoplados com uso de parafusos, pregos e barras rosçadas conforme Figura 7.

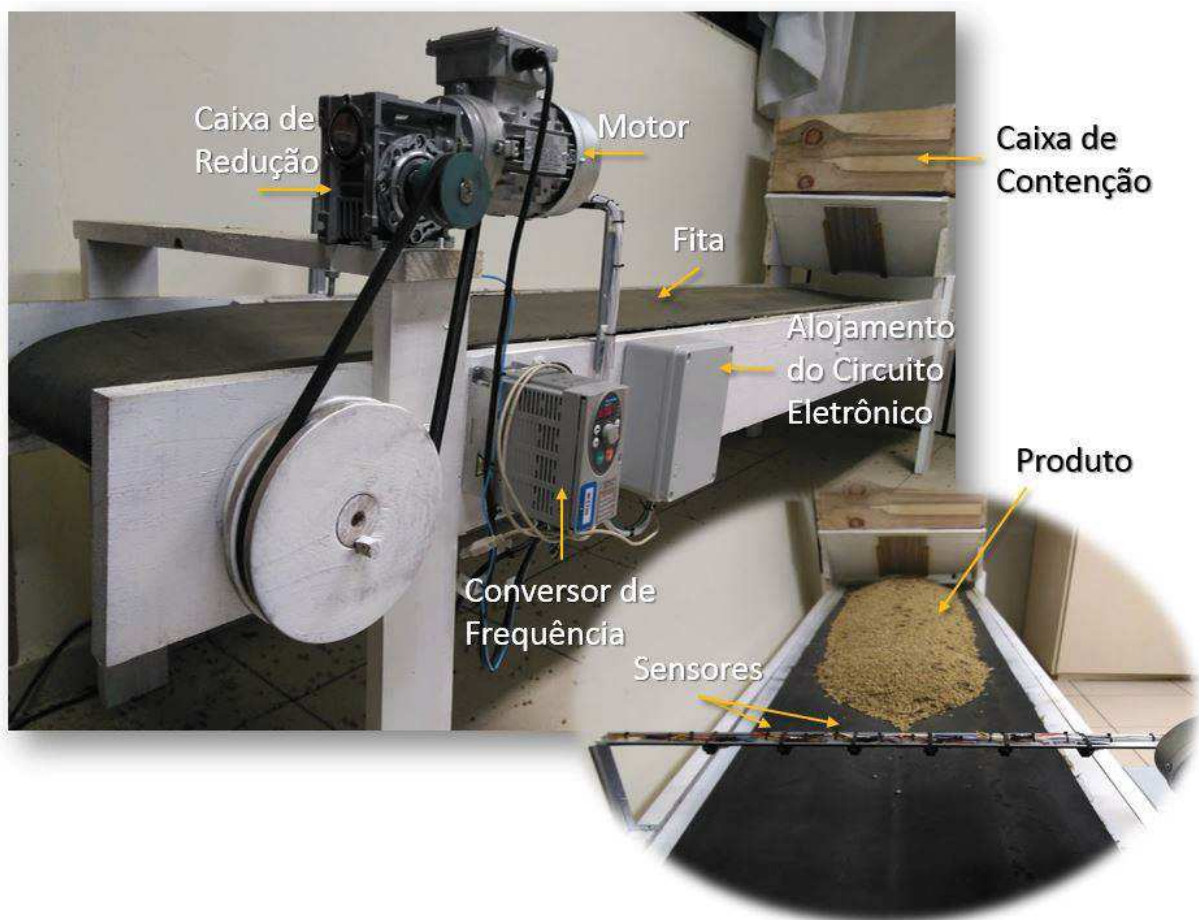


Figura 7. Fita Transportadora construída
Fonte: Autor.

3.1.1. Motor

Foi utilizado um motor de indução trifásico o qual possui as seguintes especificações:

- Tensão de Alimentação: Trifásico, 220 Vac / 60 Hz;
- Potência Nominal: 0,25 CV / 0,186 kW;
- Caixa de Redução 60:1;

O motor é controlado por um inversor de frequência da linha Altivar 31, produzido pela Schneider Electric conforme Figura 8.

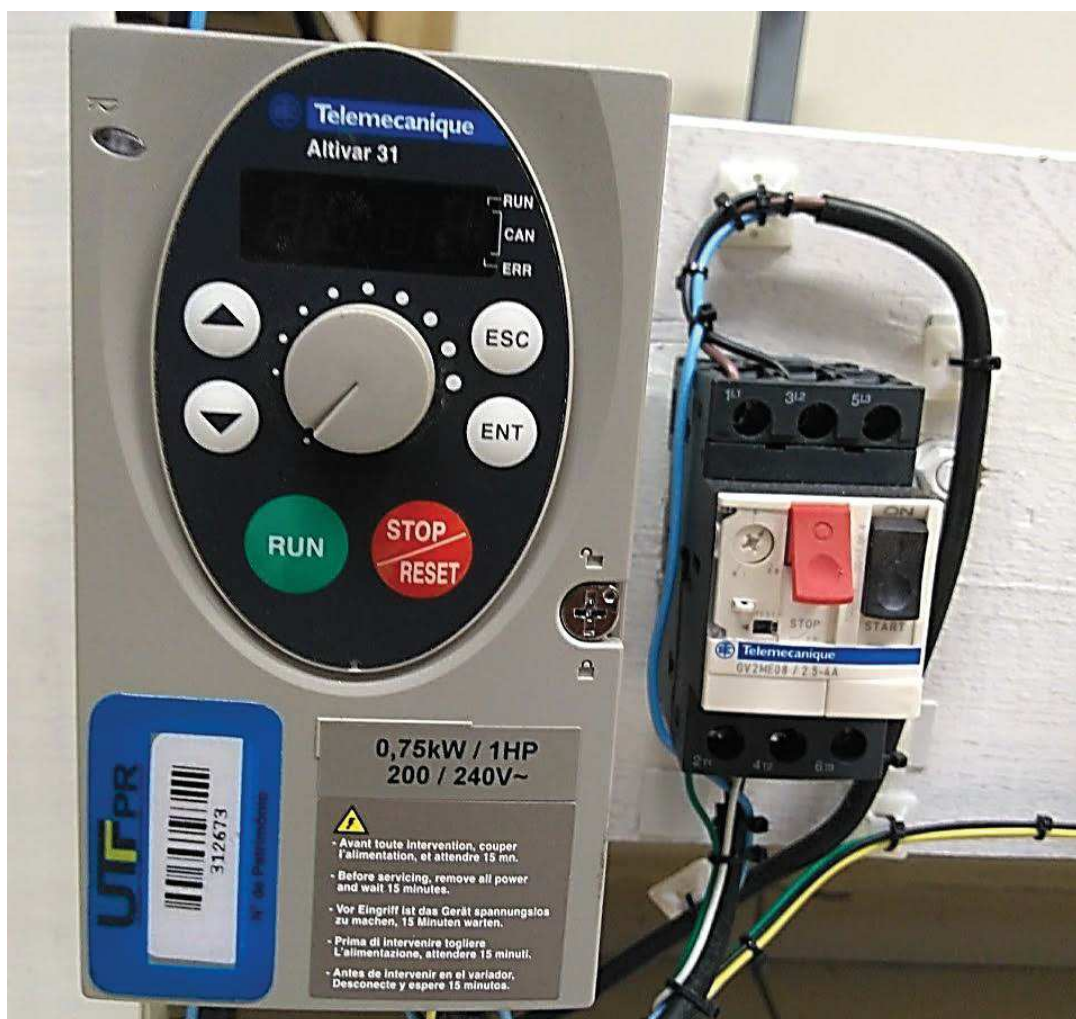


Figura 8. Inversor de frequência e Disjuntor motor.
Fonte: Autor.

O inversor de frequência permite alterar a velocidade do motor, e conseqüentemente da fita transportadora. O circuito elétrico é protegido por um disjuntor motor termomagnético com faixa de corrente regulada para 3 A com capacidade para corrente de curto-circuito de até 60 kA.

O diagrama elétrico de força pode ser visualizado na Figura 9:

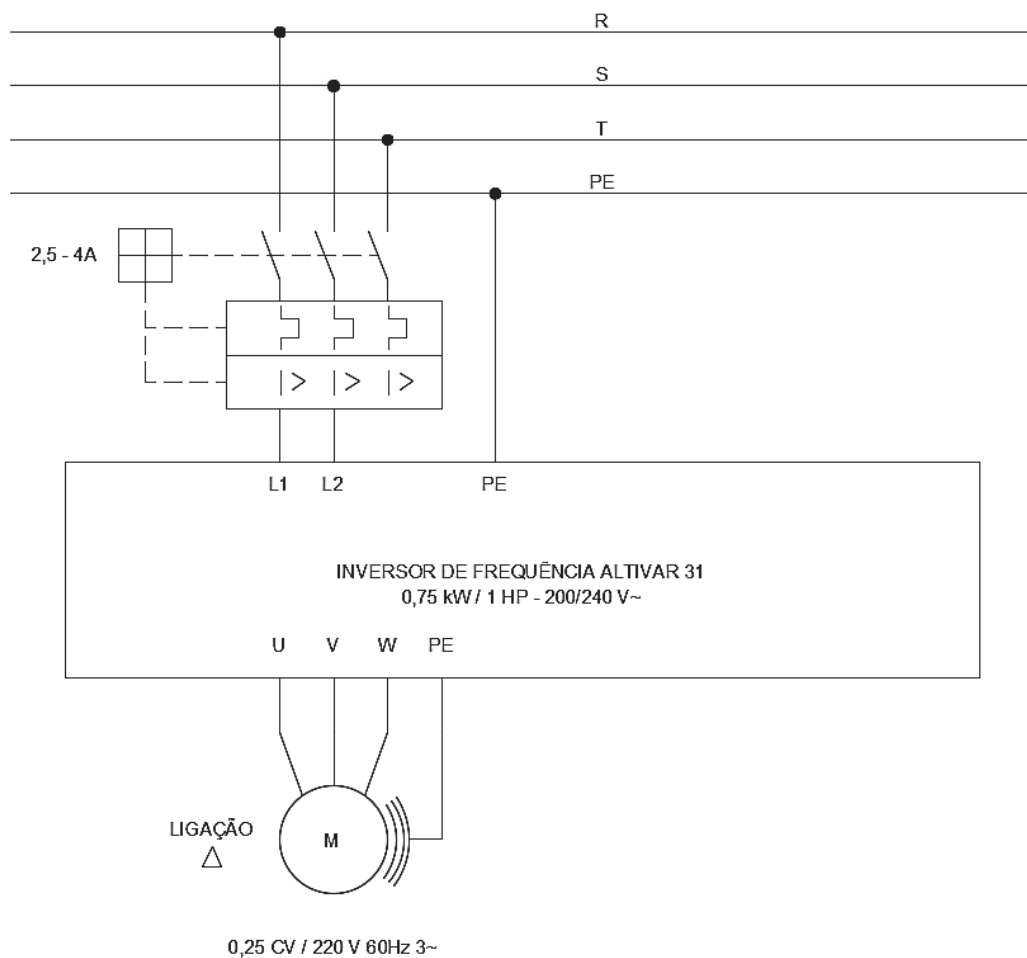


Figura 9. Diagrama Trifilar de Força.
Fonte: Autor.

3.1.2. Roletes

Os roletes foram confeccionados de madeira com auxílio de torno e possuem as seguintes especificações:

- Comprimento: 50 cm;

- Diâmetro: 10 cm.

Na parte central foram utilizadas pranchas de madeira como guia e sustentação da fita, mantendo-a em forma “V”, de maneira que as bordas possuam 5 centímetros de elevação em relação ao ponto central localizado à 22 centímetros da borda conforme é possível observar na Figura 10.



Figura 10. Curvatura da fita transportadora.
Fonte: Autor.

3.1.3. Caixa de Contenção de Produto

Foi construída uma caixa de madeira (Figura 11), a qual está localizada no ponto inicial da esteira e é utilizada para acomodar os grãos antes dos mesmos serem despejados para transporte na esteira. A caixa possui formato em “V” com altura de 24 centímetros, comprimento de 53 centímetros e largura na parte superior de 23,5 centímetros. Sua capacidade volumétrica é de 29892 cm³ podendo aumentar com o

auxílio de outro aparato de madeira o qual pode ser encaixado logo acima da caixa e permite conter um volume maior de grãos.



Figura 11. Caixa de contenção de grãos.
Fonte: Autor.

A caixa possui uma abertura ajustável que permite regular a velocidade com que os grãos são inseridos na fita, portanto sendo possível ajustar a vazão de grãos na fita durante o funcionamento da mesma.

3.2. SISTEMA ELETRÔNICO

Neste tópico será detalhado a forma com que foi desenvolvido o sistema eletrônico para o objetivo proposto neste trabalho.

3.2.1. Microcontrolador

Foi utilizado uma placa de desenvolvimento com um microcontrolador ATMEGA2560 embarcado em seu circuito. A placa de desenvolvimento microcontrolada utilizada foi a Mega 2560 que pode ser visualizada na Figura 12:

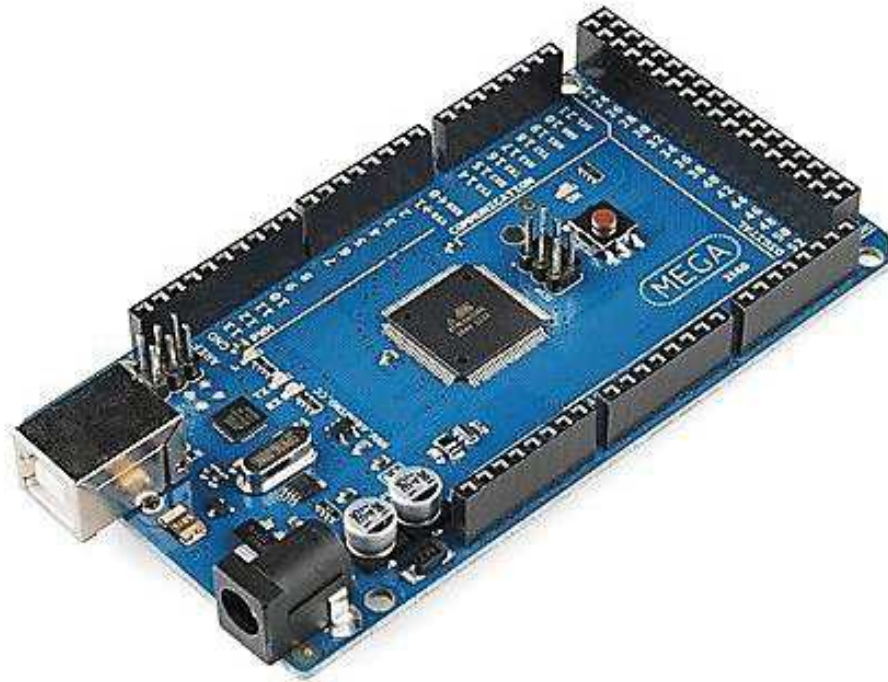


Figura 12. Placa de Desenvolvimento Mega 2560.
Fonte: www.filipeflop.com

A alimentação da placa pode ser fornecida tanto por conexão USB (*Universal Serial Bus*), tanto por conector específico para esta função com tensão que se situe na faixa de 5 a 12 V. O conector USB é utilizado para realização a comunicação com um computador e desta forma, seu microcontrolador é possível de ser programado utilizando as ferramentas de prototipação Arduino. A alimentação da placa microcontrolada bem como de todo sistema eletrônico foi realizada através da utilização de um conversor AC/DC que permite converter tensões de rede entre 90 e 264 V de corrente alternada para uma tensão retificada e filtrada de 5 V de corrente contínua, possibilitando então utilizar a rede a qual fornece alimentação do motor também para alimentar o circuito eletrônico. O conversor utilizado pode ser visualizado na Figura 13:



Figura 13. Conversor AC/DC encapsulado.
Fonte: Autor.

A escolha deste conversor foi realizada efetuando o cálculo da potência máxima consumida pelo sistema que resultou em uma potência máxima de aproximadamente 0,7 watts, valor inferior à capacidade de fornecimento potência do conversor que chega à 3 watts.

Acessórios como suportes de PCI (Placa de Circuito Impresso), *jumpers* e bornes foram utilizados para facilitar a instalação além de uma caixa plástica com grau de proteção IP65, para proteger os dispositivos contra danos físicos. O conversor AC/DC foi soldado em placa ilhada para facilitar a fixação juntamente com a placa de desenvolvimento no lado interno da caixa plástica.

3.2.2. Interface de Programação

A programação do microcontrolador foi realizada em ambiente de desenvolvimento a qual faz parte da plataforma Arduino. A linguagem utilizada foi a linguagem C, escolhida por sua facilidade e pela característica do processo se constituir de forma simplificada e sequencial. O software pode ser visualizado na Figura 14 onde há também um trecho de código em linguagem C.

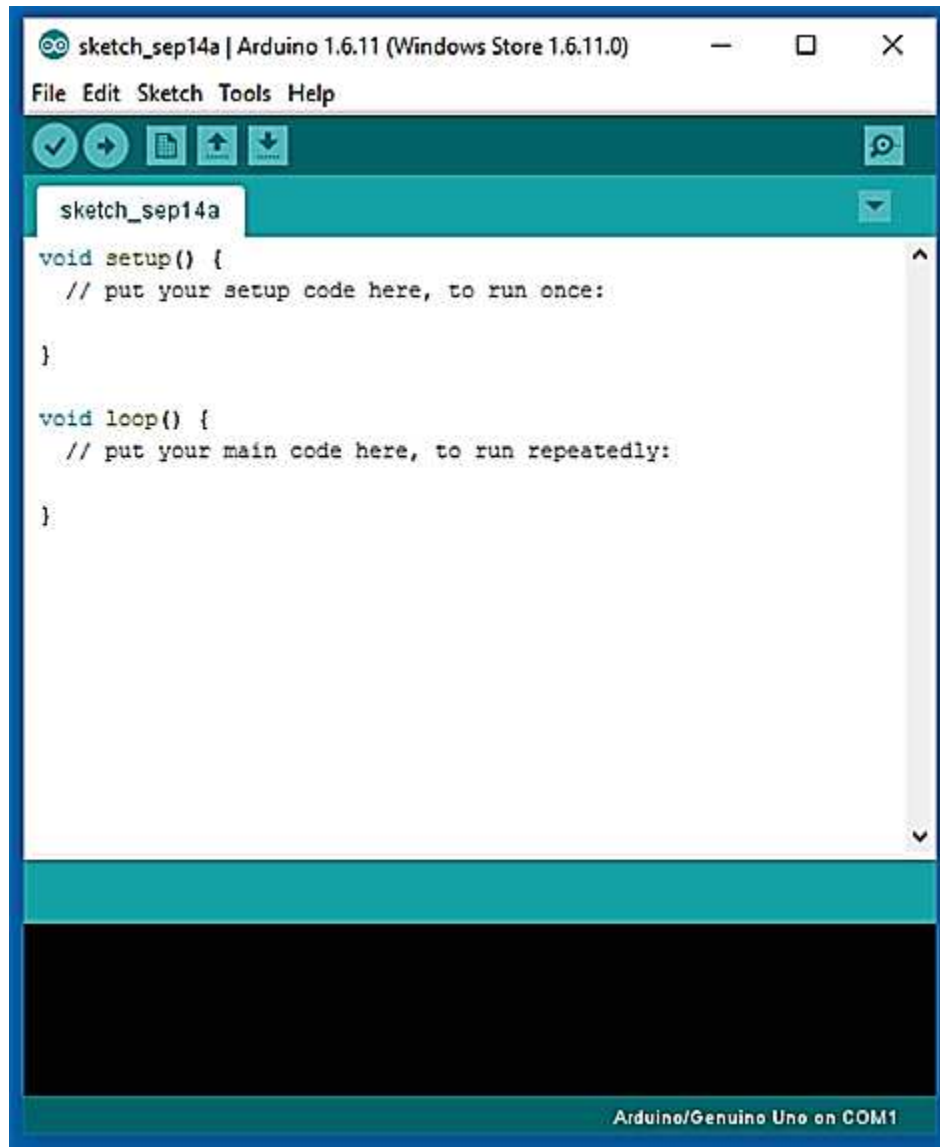


Figura 14. Interface de programação da placa de desenvolvimento.
Fonte: Autor.

Há também opções de interface serial com a placa de desenvolvimento exibindo tanto em forma de texto, como em forma gráfica, valores trocados entre o microcontrolador e o computador quando da utilização deste método de comunicação.

3.2.3. Interface Gráfica do Sistema Desenvolvido

A interface gráfica utilizada para leitura, monitoramento e análise dos dados foi desenvolvida no software LabView, desenvolvido pela National Instruments. Na Figura

15 é possível observar a disposição dos parâmetros disponíveis para visualização durante o funcionamento do sistema os quais são adquiridos via comunicação USB.

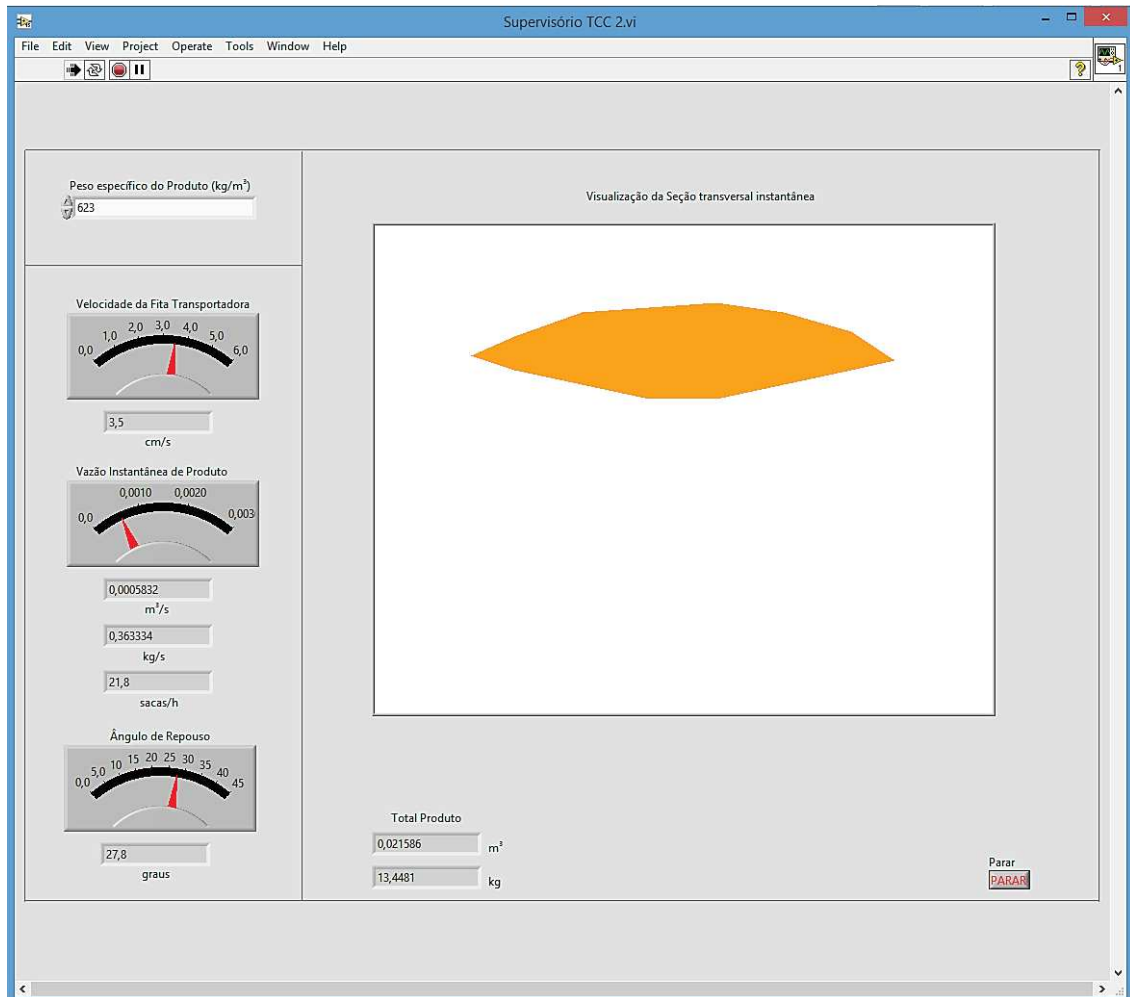


Figura 15. Interface gráfica de monitoramento do sistema.
Fonte: Autor.

Na tela de monitoramento é possível visualizar os valores de velocidade instantânea da fita transportadora, vazão instantânea dos grãos em transporte na fita, ângulo de repouso instantâneo e volume total de produto transportado, além de um quadro que permite monitorar a seção transversal instantânea do produto em forma de desenho gráfico.

3.3. SENSORES DE DISTÂNCIA

Inicialmente foi realizada a instalação de seis sensores HC-SR04. Os mesmos foram instalados lado a lado, de forma transversal ao sentido de movimento da fita com distanciamento de 7 centímetros conforme apresentado na Figura 18. A altura da estrutura que sustenta os sensores é de 16,5 centímetros em relação à borda da fita.

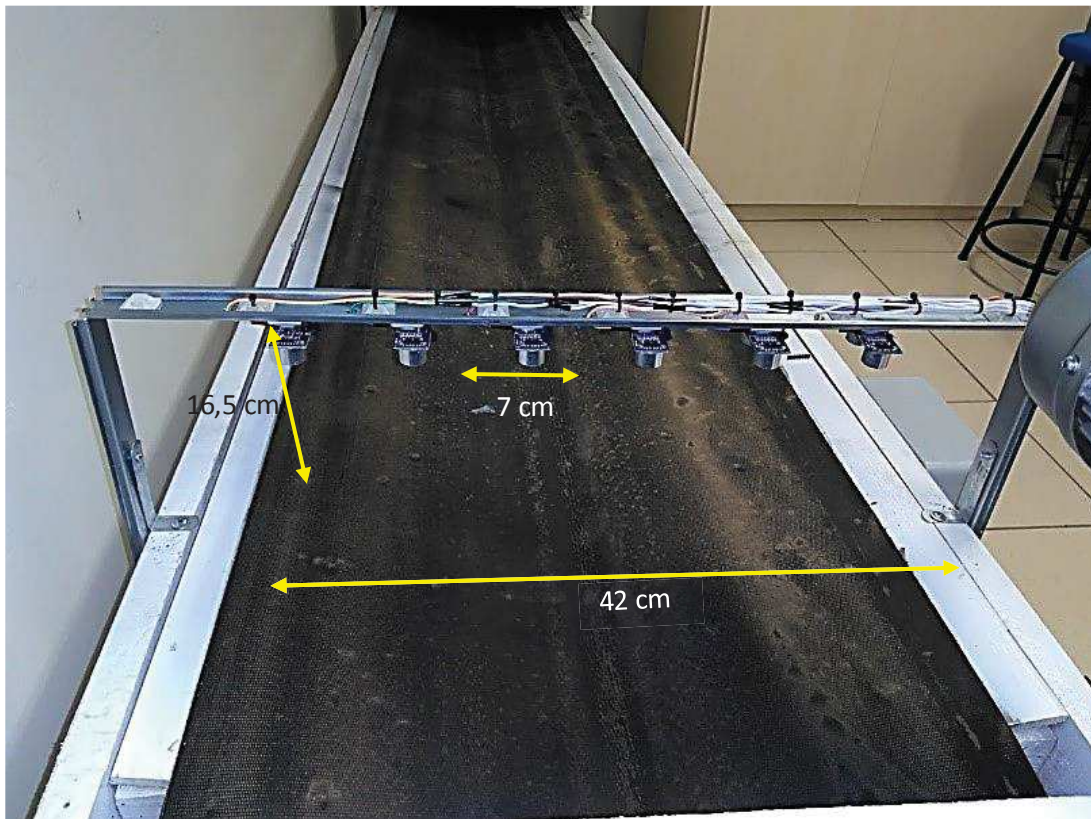


Figura 16. Sensores ultrassônicos instalados.
Fonte: Autor.

Para realizar a medição através de cada sensor ultrassônico, foi efetuado o disparo dos mesmos através de um pulso de tensão de 5 V no pino *Trigger* de cada sensor. Após o disparo, realizou-se a contagem de tempo de retorno do eco do sinal ultrassônico, medição esta, realizada pelo microcontrolador através de lógica implementada em sua programação.

Para converter o tempo de retorno do eco em distância entre cada sensor e a superfície de grãos localizada logo abaixo, considerou-se um valor de velocidade de propagação do som constante de 340 m/s.

Desta forma, multiplicando o valor de tempo de resposta obtida para cada sensor pela velocidade de propagação do som no ar, obteve-se a distância percorrida pela onda desde sua geração até a detecção de seu eco. Dividindo este valor por 2, adquiriu-se o valor da distância entre o sensor e a superfície de grãos.

O comportamento dos sensores atuando na medição de distância quando da passagem de grãos, no entanto, não correspondeu às expectativas, uma vez que devido ao seu ângulo de disparo de onda ultrassônica ligeiramente aberto houveram medições incoerentes de distância entre o sensor e a superfície de grãos. Este fator é agravado pelo fato da superfície de grãos não se constituir totalmente lisa, o que faz com que a frente de onda ultrassônica se difunda causando interferência em outros sensores.

Em alternativa aos sensores ultrassônicos, foram utilizados sensores de distância infravermelho, da marca Sharp, modelo GP2Y0A41SK (Figura 5) cuja instalação seguiu o mesmo método dos sensores anteriores.

Os sensores infravermelhos possuem 3 pinos: pino de alimentação (5 V), pino terra (GND) e pino de saída analógico (DATA). Os primeiros fornecem a alimentação para o sensor, e o pino DATA fornece então a referência de tensão que pode ser utilizado para se calcular a distância medida.

Foram utilizados ao total, 6 sensores infravermelhos cujos pinos DATA foram conectados às entradas analógicas do microcontrolador. Com isso, realizou-se o levantamento da equação para cada sensor da curva que relaciona a distância medida com o valor convertido pelo conversor analógico. A equação característica é dada por $D = f/V_{LA}$, onde D é a distância obtida em mm, f é um fator adimensional que varia conforme as características do sensor e V_{LA} o valor do sinal obtido do pino DATA convertido pelo microcontrolador através do conversor A/D. O conversor A/D possui resolução de 10 bits, ou seja, converte uma faixa de tensão de 0 a 5 V em um valor inteiro entre 0 a 1023. Com isso, a variação mínima que se pode obter é de 0,00488 V.

A metodologia utilizada para se obter o fator f foi de levantar pontos da curva medindo a distância de um objeto de cor clara e com superfície lisa logo à frente de cada sensor e o valor inteiro obtido através da conversão A/D do sinal de tensão respectivo.

Na Figura 17 exibe a metodologia de levantamento dos pontos da curva na qual foi utilizado uma lâmina de isopor de cor clara e superfície plana.



Figura 17. Metodologia de levantamento de pontos da equação da curva dos sensores infravermelhos.
Fonte: Autor.

Segundo curva típica do sensor disponibilizada pelo fabricante, observa-se pouca interferência do fator de reflexão do material com a precisão da distância mensurada, portanto considera-se válido o uso destes sensores para medição da superfície de grãos. Além disso, é sugerido que se disponha os sensores de forma que seu comprimento maior seja perpendicular ao sentido de fluxo de objetos em movimento, porém como a velocidade usual na fita desenvolvida para a coleta de dados não excede o valor de 5 cm/s, considera-se desprezível a influência deste fator na precisão dos dados coletados. De qualquer forma, para medições futuras que venham a utilizar de meios de transporte mais rápidos, recomenda-se a instalação dos sensores conforme recomendação do fabricante.

Foram levantados um total de nove pontos da curva para cada sensor que possibilitaram obter o fator f para a equação de cada sensor conforme tabela a seguir:

Tabela 1. Fator f obtido para levantamento da curva dos sensores

| Sensor | Fator f |
|--------|-----------|
| 1 | 26210 |
| 2 | 25500 |
| 3 | 25000 |
| 4 | 23700 |
| 5 | 23950 |
| 6 | 24200 |

Fonte: Autor.

A Figura 18 apresenta um gráfico com o comportamento da equação obtida para o Sensor 1 e a proximidade com os pontos obtidos empiricamente.

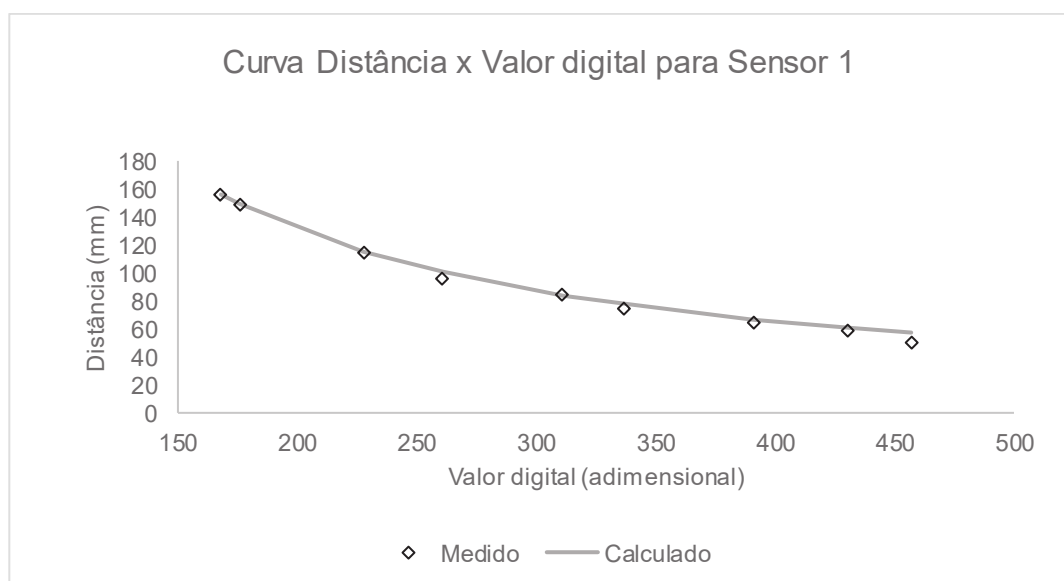


Figura 18. Curva distância x valor digital para Sensor 1.
Fonte: Autor.

A equação característica dos sensores não é linear, o que implica que o erro associado à precisão do conversor A/D é maior para distâncias menores e menor para distâncias maiores medidas pelo sensor. Através de consulta à folha de dados do ATMEGA2560, constatou-se uma precisão absoluta de 2 níveis digitais (± 2 LSB).

Considerando o pior caso o qual seria da medição da distância mínima de 40 milímetros, segundo faixa de distância especificada para os sensores, e utilizando o

método de Kleine e McClintock para o cálculo de propagação de erros, obtém-se os seguintes valores de erro de medição para cada sensor conforme Tabela 2:

Tabela 2. Erro de medição de distância

| Sensor | Erro absoluto Aproximado (mm) |
|--------|-------------------------------|
| 1 | 0,42 |
| 2 | 0,40 |
| 3 | 0,40 |
| 4 | 0,38 |
| 5 | 0,38 |
| 6 | 0,40 |

Fonte: Autor.

Inicialmente, realizando-se a leitura dos sensores a uma taxa de amostragem de 50 S/s, os valores lidos possuíam ruídos, o que fez com que as informações de distância fossem distorcidas se tornando pouco precisas.

A solução encontrada para diminuir o ruído foi implementar via lógica de programação, um filtro de média móvel que é definida por $y[n] = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N x[n-k]$. Com base nisso, foi implementado um filtro de Média Móvel com N igual à 29, o que reduziu significativamente ruídos indesejáveis no sinal obtido dos sensores.

Nos primeiros testes, foi posicionado um objeto em frente ao sensor e em seguida, iniciou-se o monitoramento do valor digital convertido através da leitura do conversor A/D no canal do respectivo sensor. O valor digital médio obtido foi de 210, porém o sinal apresentou surtos que chegavam a um valor próximo de 240 conforme apresentado na Figura 19.

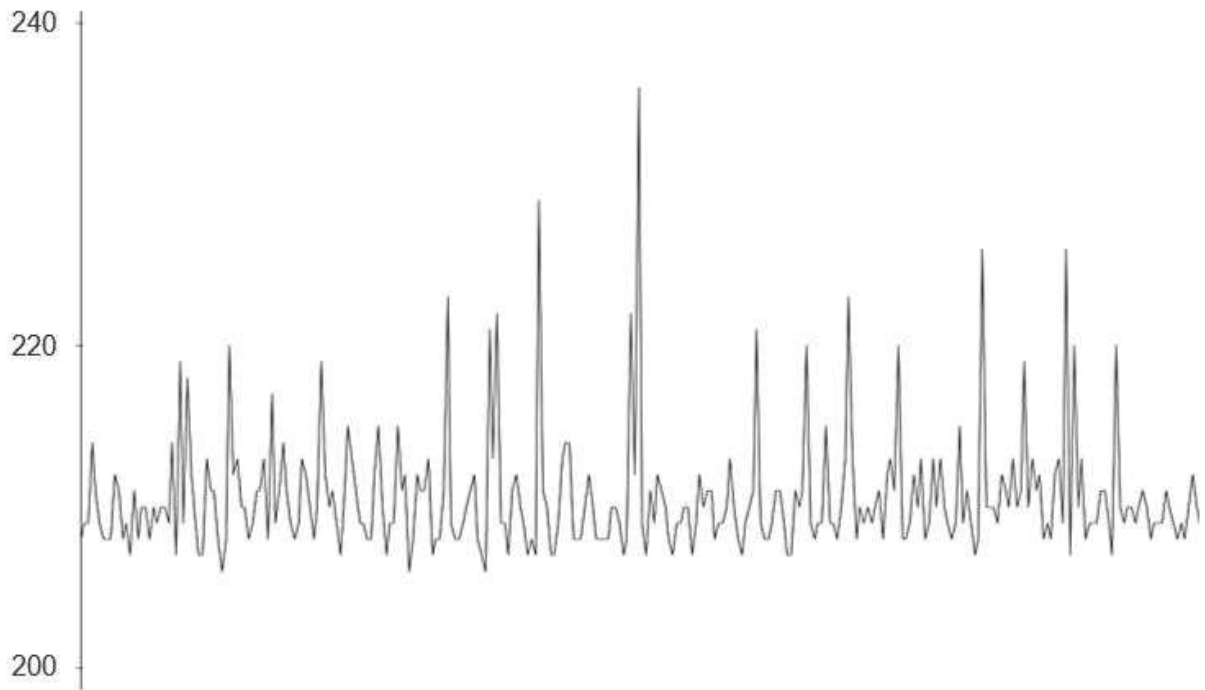


Figura 19. Sinal com ruídos.
Fonte: Autor.

O resultado após a aplicação do filtro pode ser visualizado na Figura 20.

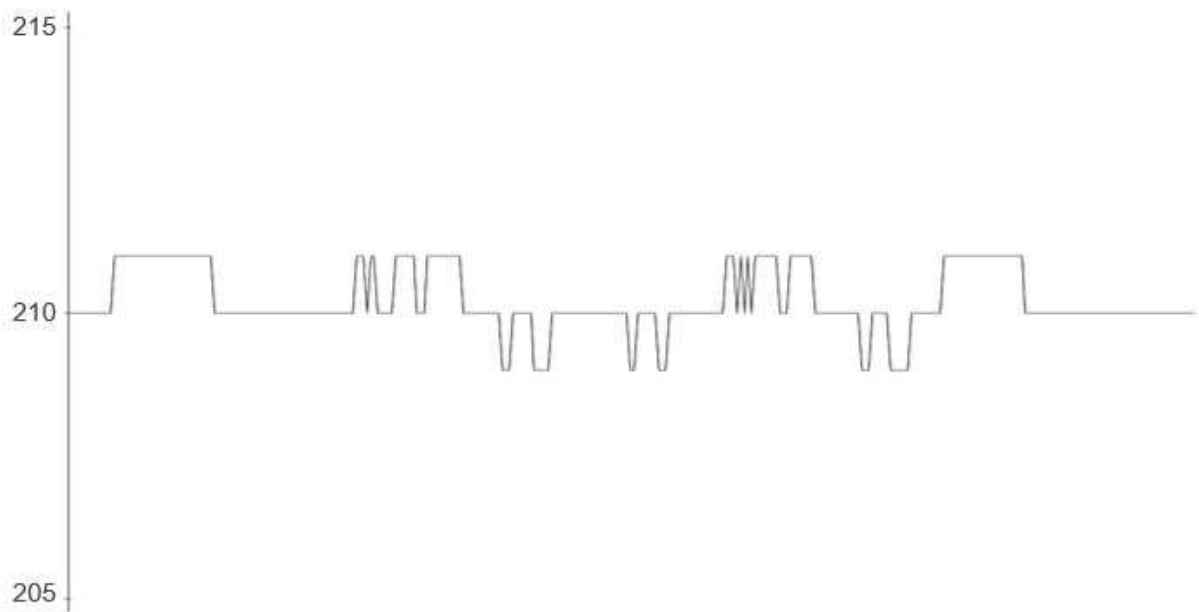


Figura 20. Sinal com ruído suavizado.
Fonte: Autor.

3.4. VELOCIDADE INSTANTÂNEA DA FITA

Para aquisição dos valores de velocidade instantânea da fita transportadora, foram utilizados canais de saída analógica do inversor de frequência.

O inversor de frequência possui um canal de saída analógica denominado de AOV, capaz de fornecer um sinal de 0 a 10 V que ao se efetuar as configurações necessárias, é proporcional à frequência da onda de tensão produzida pelo inversor e aplicada aos terminais do motor da fita transportadora.

Considerando que o motor trabalha com pouca carga, o que lhe confere um escorregamento desprezível, e a lona da fita possui deslizamento insignificante ao ser tracionada devido à sua baixa velocidade, é possível obter indiretamente a velocidade da fita transportadora através do monitoramento da frequência mencionada anteriormente.

Uma vez que o conversor A/D aceita faixa de tensões entre 0 a 5 V, para adequar o sinal fornecido pelo inversor, foi então utilizado um divisor resistivo utilizando dois resistores de igual valor, e então é realizada a leitura da tensão do nó central conforme esquema da Figura 21.

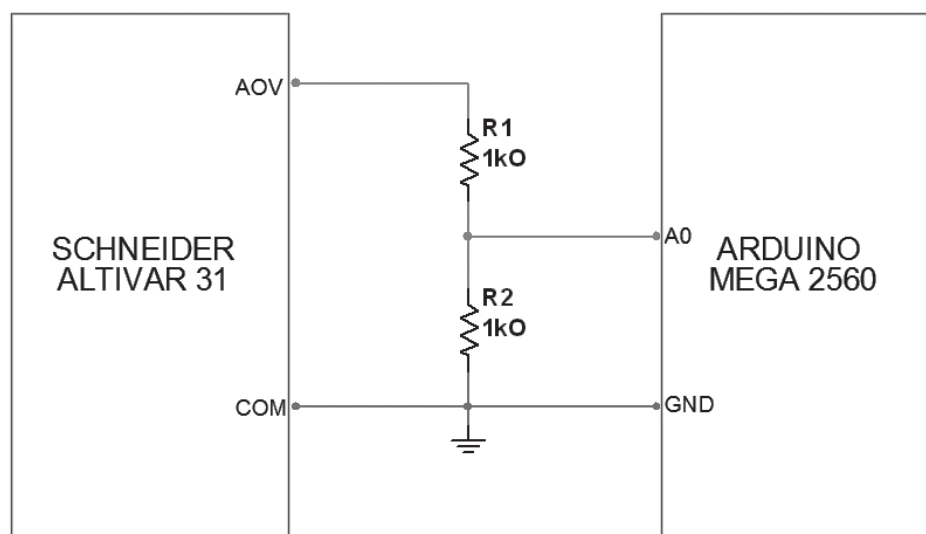


Figura 21. Esquema do divisor resistivo de tensão.
Fonte: Autor.

Para o levantamento da equação da curva que relaciona a velocidade da fita com a leitura digital obtida, foram realizadas medições de velocidade diretamente na fita, com auxílio de fita métrica e cronômetro.

A metodologia definida foi a seguinte: Iniciou-se o movimento da fita com a partida do motor. Após a estabilização da velocidade, efetuou-se a contagem de tempo em que a fita levou para percorrer a distância de um metro. Ao mesmo tempo, monitorou-se o valor digital obtido com a leitura do conversor A/D correspondente ao pino A0 da placa de desenvolvimento. A velocidade foi calculada pela seguinte fórmula: $V_{fita} = 100/T_{medido}$, onde V_{fita} é a velocidade da fita em cm/s e T_{medido} é o tempo que levou para que a fita percorresse um metro de distância dado em segundos. Os valores obtidos estão contidos na Tabela 3.

Tabela 3. Valores digitais em função da velocidade da fita coletados.

| Valor digital | Velocidade da fita (cm/s) |
|---------------|---------------------------|
| 1006 | 5,16 |
| 756 | 3,88 |
| 503 | 2,65 |
| 256 | 1,45 |

Fonte: Autor.

A equação obtida que relaciona a velocidade da fita com o valor digital convertido através da leitura do nível de tensão do canal analógico do inversor de frequência está descrita na Equação (1):

$$Velocidade_{fita} = Valor_{digital} 0,00513 \pm 0,01 \text{ cm/s} \quad (1)$$

Como sugerido na equação, a mínima variação de velocidade possível de se detectar, devido à resolução do conversor A/D utilizado, é de 0,01 cm/s em uma faixa de valores que vai de 0 a 5,25 cm/s.

3.5. MEDIÇÃO DO PERFIL DA SEÇÃO TRANSVERSAL DOS GRÃOS NA FITA TRANSPORTADORA

Com a informação de distância obtida de cada um dos sensores associado com o conhecimento das medidas da fita, foi possível levantar a informação da seção transversal de produto em transporte de forma instantânea. Para isso, inicialmente foi mensurado a distância de cada sensor à superfície da fita, sem grãos em transporte. Em seguida, com a passagem dos grãos, iniciou-se a medição contínua de distância de cada sensor. O cálculo da diferença da distância inicial e da distância instantânea, resultou na altura do produto em cada ponto monitorado por sensor.

Vinculando as informações adquiridas de cada sensor foi possível obter o polígono formado pela seção transversal dos grãos, o qual pode ser dividido em sete partes as quais auxiliaram em um cálculo mais simplificado da seção transversal como ilustrado na Figura 22.

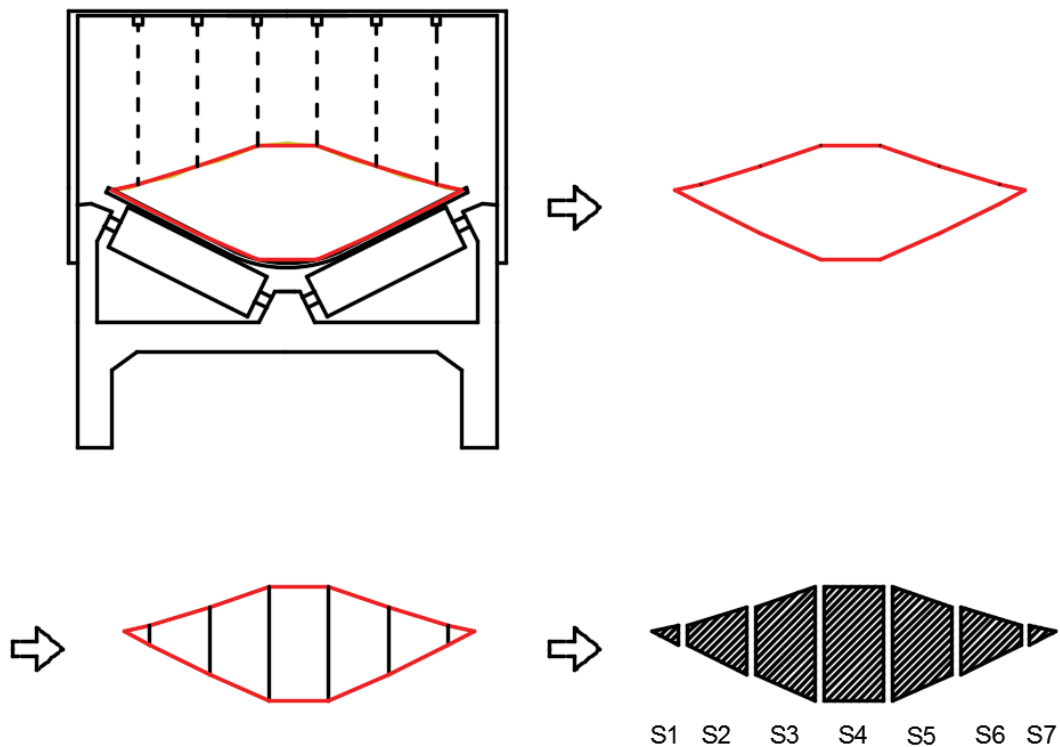


Figura 22. Etapas de simplificação do cálculo da seção transversal instantânea de grãos.
Fonte: Autor.

As partes resultantes, caracterizam um trapézio, cuja área pode ser obtida através da seguinte fórmula: $S = \frac{B+b}{2}h$, onde S é a área do trapézio em cm^2 , B e b são respectivamente o comprimento da base maior e o comprimento da base menor do trapézio dado em cm e h , altura do mesmo também em cm .

No caso em análise, os valores de B e b são os valores da altura de produto obtido por dois sensores próximos um ao outro e h , a distância entre os dois sensores cujo valor é de 7 cm .

Com o cálculo de $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ e S_7 posteriormente realizou-se o cálculo do valor da seção instantânea (S_{total}) do produto em transporte na fita transportadora conforme Equação (2):

$$S_{total} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 \quad (2)$$

Utilizando novamente a Teoria de Propagação de Erros através do Método de Kleine e McClintock e considerando o erro já calculado para a medição de distância de cada sensor conforme Tabela 2, obteve-se um erro aproximado de $25,8 \text{ cm}^2$ no valor de cada seção parcial formada por dois sensores. Considerando a contribuição do erro do valor das sete seções, obteve-se um valor de erro absoluto aproximado de $68,34 \text{ cm}^2$.

Para isto foram feitas algumas considerações baseadas em valores empíricos necessárias para a resolução das equações. Considerou-se erro absoluto médio de $0,4 \text{ mm}$ para a distância lida pelos sensores, e com isso, o valor da base maior e menor que compõem a fórmula da área do trapézio apresentaram um erro absoluto de $0,57 \text{ mm}$.

Calculando a derivada da função da área do trapézio em relação às suas bases e considerando valor típico de base maior igual à 100 mm e base menor igual à 80 mm , próximos aos valores medidos no sistema desenvolvido, obteve-se então o erro absoluto da seção parcial acima já mencionado. E, por conseguinte, obteve-se o erro absoluto aproximado para a seção total também apresentado anteriormente.

3.6. CÁLCULO DO ÂNGULO DE REPOUSO

Inicialmente foram realizadas medições de forma manual para identificar o ângulo de repouso dos produtos a serem submetidos ao transporte na fita transportadora. Coletou-se em um recipiente uma pequena quantidade de grãos de milho e soja separadamente e então despejou-se os mesmos em superfície plana, conforme apresentado na Figura 23.



Figura 23. Processo de medição de ângulo de repouso do milho.
Fonte: Autor.

Em seguida, com auxílio de instrumentos de medição como paquímetro e trena métrica, efetuou-se a medição da altura central do aglomerado de produto e do raio da base formada pelo mesmo. De posse destes parâmetros, o ângulo de repouso do produto foi obtido pela seguinte fórmula: $\theta_{repouso} = \arctan\left(\frac{d_{raio}}{d_{altura}}\right)$, onde $\theta_{repouso}$ é o

ângulo de repouso em graus, d_{raio} é o raio (cm) formado pelo produto despejado e d_{altura} é a altura (cm) formada pelo mesmo.

Para o cálculo do ângulo de repouso instantâneo dos grãos submetidos ao transporte na fita transportadora, foram utilizados os dados obtidos pelos sensores de distância. Através do cálculo do ângulo de repouso formado pelas diversas combinações de planos formados pela altura mensurada em cada ponto da superfície dos grãos pelos sensores de distância, foi determinado o ângulo máximo calculado através da equação (3):

$$\theta_{repouso} = \arctan\left(\frac{d_{base}}{d_{altura}}\right) \pm 6,5 \text{ graus} \quad (3)$$

Na Equação (3), $\theta_{repouso}$ é o ângulo de repouso máximo formado pelos grãos, d_{base} é a distância horizontal (mm) entre os dois pontos em análise que é igual à distância entre dois sensores com valor múltiplo de 7 cm, e d_{altura} é a diferença entre a distância medida pelos dois sensores infravermelhos conforme exemplificado na Figura 24. Para o cálculo do erro de propagação, foi considerado um ângulo de 30 graus, valor aproximado baseado nas coletas de dados realizadas.

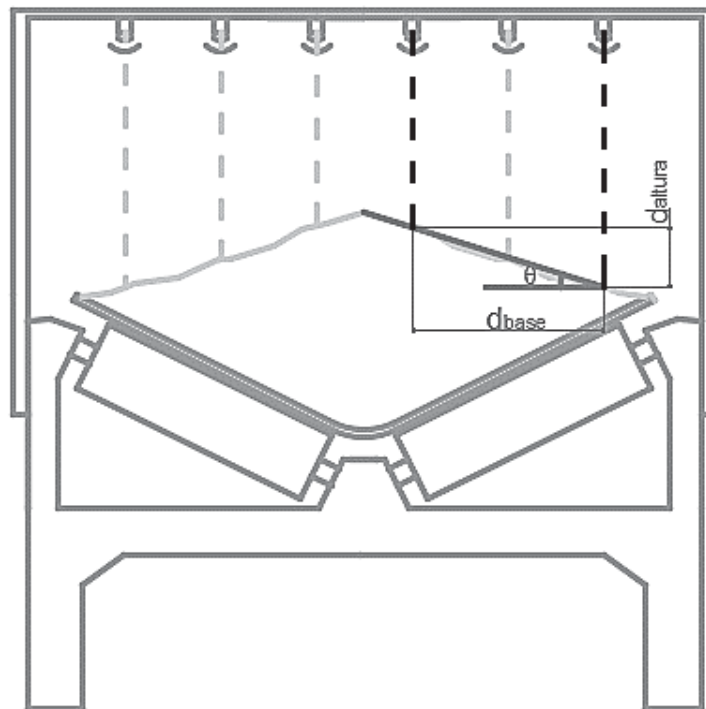


Figura 24. Representação do método de cálculo de ângulo de repouso.
Fonte: Autor.

A coleta do ângulo de repouso foi feita durante o transporte de grãos, tanto para milho como para soja, com uma taxa de amostragem de 50 S/s. Os valores obtidos foram salvos e compõem a base de análise deste trabalho.

3.7. CÁLCULO DE VAZÃO E VOLUME TOTAL DE GRÃOS

O cálculo de volume de produto transportado pela fita por unidade de tempo foi obtido pela equação (4)

$$V_{seg} = S_{total} V_{fita} \pm 341,71 \text{ cm}^3/\text{s} \quad (4)$$

V_{seg} representa a vazão de grãos dada em cm^3/s , S_{total} a seção transversal instantânea do produto em cm^2 e V_{fita} a velocidade instantânea da fita em cm/s .

Cada coleta realizada para medir os parâmetros de vazão e volume total, foi iniciada despejando-se um volume de grãos pré-fixado na caixa de contenção desenvolvida. O volume total adotado foi de 29892 cm^3 . Com a partida do motor e o início da amostragem do sistema, foi controlado a vazão de grãos através da regulagem da abertura da caixa de contenção. A taxa de amostragem utilizada novamente foi de 50 S/s, ou 50 amostras por segundo. O volume total de grãos transportado na fita foi calculado somando ao longo do tempo, o valor da vazão do produto multiplicado pelo período de cada amostragem que é igual a 20 milissegundos.

Ao final da passagem de todo produto armazenado na caixa de contenção, obteve-se então o volume total calculado pelo sistema.

3.8. COLETA DE DADOS

Foram realizadas ao total 160 coletas de dados para levantamento de resultados que compuseram a análise que será descrita no próximo capítulo deste trabalho. A cada 10 coletas mudou-se as configurações de velocidade da fita, vazão de grãos e produto agrícola inserido no sistema.

Foram adotados dois valores de velocidade para a fita: 2,5 cm/s e 5,0 cm/s, ao mesmo tempo que foram definidos dois níveis de abertura na caixa de contenção para regulagem da vazão de grãos: Nível 1 e Nível 2. O Nível 1 de abertura proporciona uma regulagem de vazão de grãos de forma que o volume total da caixa de contenção preenchido com grãos leva em torno de 65 segundos para ser escoado para a fita transportadora enquanto que no Nível 2 necessita-se de um tempo menor de aproximadamente 40 segundos. A Figura 25 exhibe o comportamento da vazão de grãos de milho na fita transportadora e o tempo percorrido para escoamento de todo volume de grãos armazenados na caixa de contenção para cada nível de abertura utilizado.

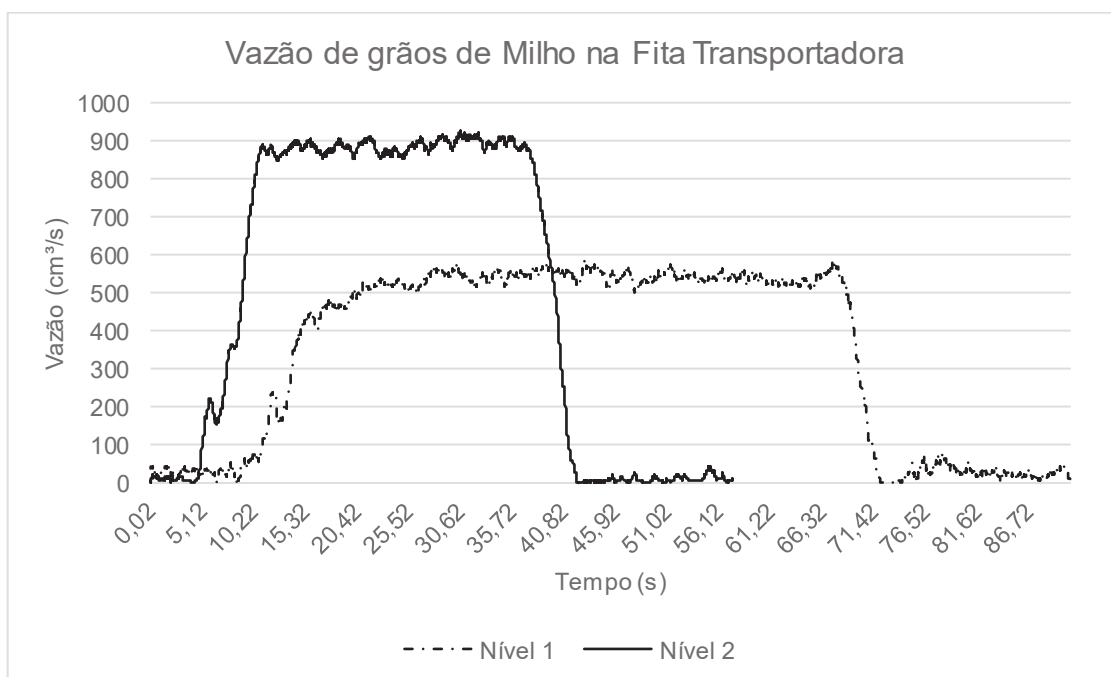


Figura 25. Vazão de grãos de milho na fita transportadora.
Fonte: Autor.

Foram utilizados dois produtos agrícolas: soja e milho.

A Tabela 4 apresenta de maneira simplificada a organização das coletas de dados realizadas.

Tabela 4. Descrição das Coletas de Dados

| Grupo | Produto utilizado | Velocidade da fita | Regulagem de abertura da caixa | Parâmetro monitorado | Número de coletas |
|-------|-------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------|
| A | Soja | 2,5 | Nível 1 | Ângulo de repouso | 10 |
| B | Soja | 2,5 | Nível 2 | Ângulo de repouso | 10 |
| C | Soja | 2,5 | Nível 1 | Vazão e Volume Total | 10 |
| D | Soja | 2,5 | Nível 2 | Vazão e Volume Total | 10 |
| E | Soja | 5,0 | Nível 1 | Ângulo de repouso | 10 |
| F | Soja | 5,0 | Nível 2 | Ângulo de repouso | 10 |
| G | Soja | 5,0 | Nível 1 | Vazão e Volume Total | 10 |
| H | Soja | 5,0 | Nível 2 | Vazão e Volume Total | 10 |
| I | Milho | 2,5 | Nível 1 | Ângulo de repouso | 10 |
| J | Milho | 2,5 | Nível 2 | Ângulo de repouso | 10 |
| K | Milho | 2,5 | Nível 1 | Vazão e Volume Total | 10 |
| L | Milho | 2,5 | Nível 2 | Vazão e Volume Total | 10 |
| M | Milho | 5,0 | Nível 1 | Ângulo de repouso | 10 |
| N | Milho | 5,0 | Nível 2 | Ângulo de repouso | 10 |
| O | Milho | 5,0 | Nível 1 | Vazão e Volume Total | 10 |
| P | Milho | 5,0 | Nível 2 | Vazão e Volume Total | 10 |

Fonte: Autor.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o funcionamento do sistema bem como a análise de exatidão e de repetitividade. Os parâmetros utilizados para análise serão: volume total de produto e ângulo de repouso.

Para análise de exatidão será calculado o erro relativo dos dados dada pela fórmula $Er_{\%} = \frac{V_{medido} - V_{exato}}{V_{exato}} 100$.

Para análise de repetitividade será calculado o coeficiente de variação o qual é dado por $CV_{\%} = \frac{s}{\bar{x}}$, onde s é o desvio padrão do conjunto de valores a serem analisados e \bar{x} é a média do mesmo conjunto de valores.

4.1. VOLUME TOTAL DE PRODUTO

Nesta seção serão apresentados os dados de volume total obtido através das coletas de dados, os quais servirão de base para se avaliar a legitimidade dos valores de vazão registrados pelo sistema.

4.1.1. Análise de Exatidão

Nesta subseção será analisado a exatidão com que o sistema desenvolvido obteve os resultados de volume para as coletas realizadas.

Inicialmente, a Tabela 5 exibe os valores de erro relativo calculados para todas as coletas de volume total obtidas pelo sistema considerando organização de acordo com velocidade da fita, nível de abertura da caixa de contenção de produto e produto agrícola utilizado para a coleta. Os resultados foram ordenados de forma crescente de acordo com o valor absoluto.

Tabela 5. Percentual de Erro Relativo calculado para coletas de Volume Total de Produto.

| Produto | Soja | | | | Milho | | | |
|----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | 1 | | 2 | | 1 | | 2 | |
| | Nível de abertura | Velocidade da fita | Nível de abertura | Velocidade da fita | Nível de abertura | Velocidade da fita | Nível de abertura | Velocidade da fita |
| | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 |
| Erro Relativo | -0,53% | -1,36% | 0,18% | 0,02% | -2,08% | 1,36% | -1,28% | 3,06% |
| | -0,69% | -1,38% | -0,46% | 0,09% | -2,72% | 1,64% | 2,50% | 3,43% |
| | -0,83% | -1,49% | -0,60% | -0,18% | -3,01% | 2,12% | -3,14% | 3,47% |
| | -1,11% | -1,56% | -0,66% | -0,39% | -3,14% | 2,34% | 3,32% | 4,34% |
| | -1,29% | -1,66% | -1,06% | -0,41% | -3,17% | 2,38% | 6,85% | -4,57% |
| | -1,35% | -1,69% | -1,27% | -0,43% | -3,23% | 2,68% | 7,09% | -5,16% |
| | -1,69% | -1,76% | -1,41% | 0,44% | -3,49% | 2,87% | 7,27% | -5,19% |
| | -1,80% | -1,82% | -1,43% | -0,58% | -4,01% | 3,70% | 7,55% | -5,26% |
| | -1,99% | -1,85% | -2,36% | 0,78% | -4,30% | 3,82% | 8,02% | -5,45% |
| | -2,50% | -1,76% | -2,63% | -1,01% | -4,36% | 4,10% | 8,17% | -5,47% |
| Média | -1,38% | -1,63 % | -1,17% | -0,17% | -3,35% | 2,70% | 4,63% | -1,68% |

Fonte: Autor.

Com base nos valores calculados, obteve-se valores de volume total de produto agrícola transportado medido pelo sistema com um mínimo de erro absoluto igual a 0,02% o qual apresenta-se em coleta pertencente ao grupo H realizada com soja, com nível de abertura da caixa na posição Nível 2 e velocidade da fita de 5 cm/s. O maior erro absoluto calculado foi de 8,17% em coleta realizada com milho, regulação da abertura da caixa em Nível 2 e velocidade da fita de 2,5 cm/s. Entretanto, levando em consideração a média de erro calculada para cada grupo de coletas, houve menor exatidão para coletas incluindo grãos de milho, especialmente com velocidade da fita mantida em 2,5 cm/s, caracterizadas por um número maior de amostras coletadas pelo sistema e um tempo de demora maior para o escoamento de todo produto.

Além disso, nota-se que a maioria dos valores de erro relativo nas coletas de soja são negativos, o que significa que pode haver erro sistemático o qual se propaga conforme o número de amostras aumenta.

A Figura 26 apresenta o deslocamento da curva de erro relativo entre os quatro diferentes grupos de coletas de dados realizadas com soja.

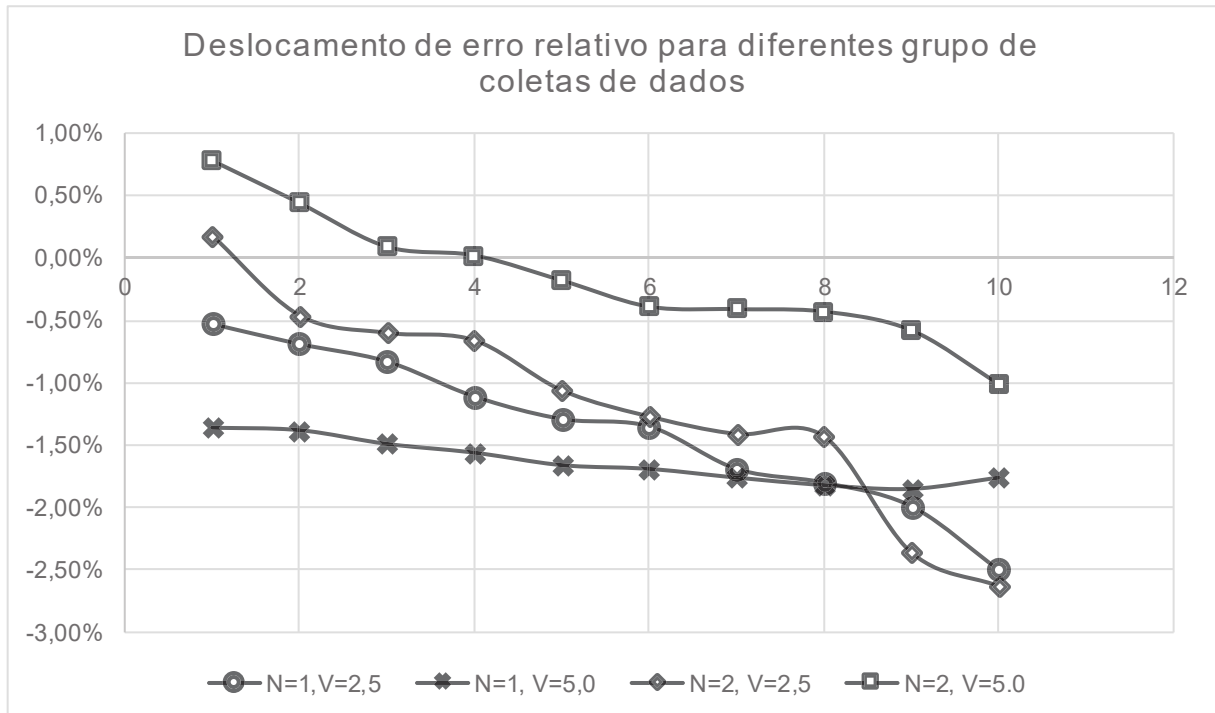


Figura 26. Deslocamento de erro relativo para diferentes grupos de coleta de dados.
Fonte: Autor.

É possível notar que se considerando velocidade baixa, não há influência da quantidade de produto inserido por metro na fita na exatidão do sistema. Porém conforme aumenta-se a velocidade da fita, observa-se um deslocamento da curva de erro que indica que o sistema está medindo valores sempre menores do que o valor exato, o que pode ser explicado devido ao fato de haver muito pouco produto e com isso, ser impossível levantar a seção transversal com total precisão. Isso faz com que haja incoerência no cálculo da vazão caracterizado por um valor sempre menor ao valor real o que gera consequentemente um valor menor de volume total transportado.

4.1.2. Análise de Repetitividade

A Tabela 6 apresenta os dados de desvio padrão para os valores de volume registrados em cada coleta de dados.

Tabela 6. Valores de coeficiente de variação para volume total de produto

| Produto | Soja | | | | Milho | | | |
|-------------------------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-------|
| | Nível de abertura | | Nível de abertura | | Nível de abertura | | Nível de abertura | |
| Velocidade da fita | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Coeficiente de Variação | 0,62% | 2,74% | 0,86% | 0,52% | 0,71% | 0,93% | 4,11% | 4,54% |

Fonte: Autor.

De acordo com a Tabela 6, o maior coeficiente de variação calculado foi de 4,54% em coleta incluindo o milho como produto, regulagem de abertura da caixa em Nível 2 e velocidade da fita mantida em 5 cm/s. E o menor coeficiente de variação, e, portanto, menor dispersão de valores de volume total de produto registrado, com valor de 0,52% para coletas do grupo H, com velocidade de 5 cm/s, abertura da caixa regulada para Nível 2 utilizando soja como produto em transporte na fita.

4.2. ÂNGULO DE REPOUSO

Seguindo a metodologia adotada para a medição do ângulo de repouso através de fita métrica, obteve-se, despejando cada produto agrícola em superfície plana, valores de altura, raio e ângulo de repouso calculado descritos na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros de medição do ângulo de repouso para cada produto agrícola

| Produto | Altura (cm) | Raio formado (cm) | Ângulo de repouso (graus) |
|---------|-------------|-------------------|---------------------------|
| Soja | 12,4 | 20,5 | 31,17 |
| Milho | 10,7 | 20,3 | 27,79 |

Fonte: Autor.

Estes valores servirão de base para as análises de exatidão e repetitividade dos valores de ângulo de repouso registrados pelo sistema durante as coletas de dados.

4.2.1. Análise de Exatidão

A Tabela 8 traz os valores de erro relativo calculados para as médias de ângulo de repouso obtidas para cada coleta de dados em relação ao valor de ângulo de repouso exato do produto agrícola utilizado.

Tabela 8. Percentual de Erro Relativo calculado para coletas de Ângulo de Repouso considerando a média de cada coleta em relação ao valor exato do ângulo de repouso.

| Produto | Soja | | | | Milho | | | |
|---------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | 1 | | 2 | | 1 | | 2 | |
| | Nível de abertura | Velocidade da fita | Nível de abertura | Velocidade da fita | Nível de abertura | Velocidade da fita | Nível de abertura | Velocidade da fita |
| | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 |
| Erro Relativo | 1,70% | -0,55% | -1,83% | 0,10% | -0,68% | -0,68% | -2,84% | -4,64% |
| | 1,06% | -1,51% | -2,15% | -1,51% | -3,92% | -2,12% | -3,20% | -6,44% |
| | 1,06% | -1,51% | -2,47% | -2,15% | -5,72% | -2,48% | -3,92% | -6,80% |
| | 0,74% | -1,51% | -2,79% | -2,15% | -5,72% | -2,84% | -5,00% | -6,80% |
| | 0,10% | -1,83% | -2,79% | -2,15% | -5,72% | -3,92% | -5,00% | -6,80% |
| | 0,10% | -1,83% | -2,79% | -2,15% | -6,08% | -3,92% | -5,72% | -7,52% |
| | -0,22% | -2,15% | -3,43% | -2,79% | -6,44% | -5,00% | -6,44% | -7,88% |
| | -1,19% | -2,15% | -3,75% | -3,11% | -7,52% | -5,36% | -7,52% | -7,88% |
| | -1,51% | -2,15% | -4,07% | -4,07% | -8,96% | -5,72% | -8,60% | -8,24% |
| | -5,04% | -2,47% | -4,72% | -4,40% | -9,32% | -5,72% | -10,04% | -8,60% |
| Média | -0,32% | -1,76% | -3,08% | -2,44% | -6,01% | -3,78% | -5,83% | -7,16% |

Fonte: Autor.

De acordo com os valores calculados, nota-se que novamente, coletas realizadas com milho, apresentaram menor exatidão principalmente com vazões de produto e velocidade da fita maiores.

Além disso, é possível observar que a maioria dos valores de erro relativo calculados são negativos, ou seja, os valores medidos na maioria das vezes são menores que o valor exato indicando que pode haver um erro sistemático o qual pode teoricamente ser corrigido seja pela multiplicação por um fator ou pela soma a uma constante.

Ainda de acordo com a Tabela 8, o sistema realizou as medições com um erro relativo absoluto mínimo de 0,1% em coleta de dados pertencente ao grupo A, com regulagem de abertura da caixa em Nível 1 e transporte de grãos de soja a uma velocidade de 2,5 cm/s. O erro relativo máximo encontrado foi de 10,04% em coleta de dados pertencente ao grupo J utilizando milho, com uma velocidade de 2,5 cm/s e regulagem de abertura em Nível 2.

4.2.2. Análise de Repetitividade

A Tabela 9 apresenta os valores de coeficiente de variação calculados para cada grupo de coleta.

Tabela 9. Valores de coeficiente de variação para cada grupo de coletas de dados

| Produto | Soja | | | | Milho | | | |
|--------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Nível de abertura | | 2 | | 1 | | 2 | |
| Velocidade da fita | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 | 2,5 | 5 |
| Coeficiente de Variação | 1,94% | 0,54% | 0,90% | 1,28% | 2,47% | 1,71% | 2,34% | 1,14% |

Fonte: Autor.

Os dados apresentados na Tabela 9 sugerem que a variação da média obtida em cada grupo de coleta de dados possui pouca variação, cujo coeficiente de variação não superou o valor de 2,47%, o qual foi obtido em coletas do grupo I. A menor variação constatada foi de 0,9% em coletas do grupo B.

A Figura 27 apresenta um histograma de uma coleta de dados de ângulo de repouso realizada com milho, a uma velocidade de 2,5 cm/s e regulagem de abertura da caixa de contenção em Nível 2.

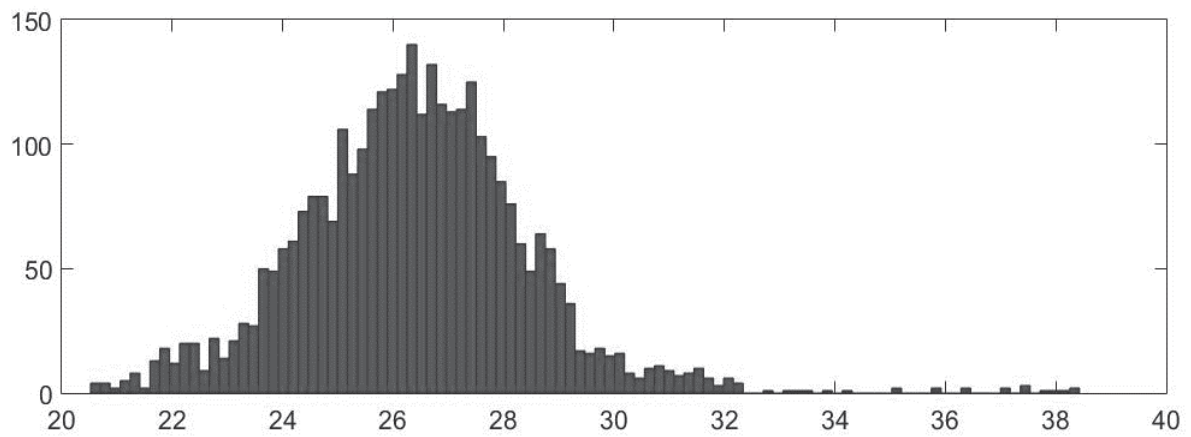


Figura 27. Histograma de uma coleta de dados de ângulo de repouso.
Fonte: Autor.

É possível notar que há valores muito distantes do valor real o que os torna incoerentes, e, portanto, com auxílio de filtros poderiam ser eliminados, uma vez que os mesmos são responsáveis por deslocar a média e influenciar na exatidão no sistema.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos pelo sistema desenvolvido demonstram ter proximidade com os valores reais medidos com um erro relativo absoluto máximo de 8,17% na medição de volume total de produto transportado pela fita e erro relativo absoluto máximo de 10,04% na medição de ângulo de repouso médio de produto.

Além disso, os valores de volume total de produto registrados apresentaram um coeficiente de variação máximo de 4,54%, correspondente ao valor aproximado de 1357 cm³ o que é aceitável visto que o erro de propagação calculado para a metodologia utilizada indica que poderia haver variações maiores de forma proporcional ao número de amostras sendo que para cada operação de cálculo da vazão, foi calculado um erro de propagação de aproximadamente 341,71 cm³/s. Em uma coleta de 4500 amostras, haveria um erro absoluto aproximado de 22922,6 cm³, o que equivale a 76,7% do valor exato.

Já para o ângulo de repouso, foi calculado um erro de propagação de aproximadamente 6,5 graus. Porém realizando-se a média de todas amostras de uma coleta de dados de 4500 amostras, o erro diminui para um valor aproximado de 0,097 graus, equivalente a 0,31% para soja e 0,35% para milho. Na prática obteve-se valores de coeficiente de variação entre 0,54 e 2,54%, pouco além do que foi calculado acima.

Entretanto, há algumas melhorias a serem consideradas para o sistema, uma vez, que em ambientes comerciais preza-se pela precisão, e para isso, o erro nos dados deve ser desprezível.

Para isto, uma sugestão de melhoria está associada ao aumento do número de sensores de distância para a realização de escaneamento com maior exatidão, visto que a distância entre sensores adotada no sistema desenvolvido ainda se mostra grande em relação à irregularidade que pode existir em uma superfície de grãos mal distribuída na fita, o que é típico em ambientes industriais. Associado com as velocidades de fita altas típicas em ambientes industriais, é necessário também se levantar outras opções de sensores de distância que possam ser instalados sem que provoquem interferência entre si.

Outra sugestão de melhoria importante, é utilizar microcontroladores, ou até microprocessadores com maior poder de processamento, uma vez que aumentando o número de sensores, há um número maior de operações a se realizar em um pequeno espaço de tempo.

O aumento da taxa de amostragem também pode ser um fator relevante, especialmente ao se adotar velocidades maiores para a fita, o que faz com que haja maior variação de superfície de grãos que requer uma varredura com frequências maiores. Associado ao aumento de taxa de amostragem é necessário também a melhoria do sistema de conversão analógico/digital se adotando uma maior resolução.

Para estimativa do peso total de produto transportado, foi utilizado um meio de inserção manual do valor de densidade de produto na interface gráfica desenvolvida. Porém, recomenda-se a criação de um sistema que seja capaz de coletar essa informação de forma autônoma e contínua diretamente do produto transportado. Desta forma, o valor do peso total de produto medido possuirá uma maior exatidão, visto que varia devido a desuniformidade do produto principalmente quando o mesmo provém de diferentes regiões de produção e quando há diversas variedades misturadas no mesmo sistema de armazenamento.

Ademais, o sistema desenvolvido correspondeu à expectativa de se coletar os dados de volume e ângulo de repouso dos produtos submetidos ao transporte na fita transportadora. Observou-se também um melhor desempenho dos sensores infravermelhos em relação aos sensores ultrassônicos os quais apresentaram dados não confiáveis devido à característica de atuação sobre a superfície de grãos.

Além disso, a interface gráfica desenvolvida facilitou o acompanhamento do comportamento dos dados e possibilitou uma melhor análise dos mesmos através da exibição gráfica da seção instantânea do produto a qual foi obtida através dos sensores de distância.

REFERÊNCIAS

- AL ZAHER, Mariana; IBRAHIM, Ricardo Cury. Estudo de um sensor de distância tipo PSD. **Anais**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2008.
- BROOKER, D. B. Drying cereal grains and their products. The AVI Publishing Company, Westport, Connecticut. 1974.
- DIAS, J. H. Uso do método LWG-LTR para o controle de velocidade em transportadores de correia visando a eficiência energética. INDUSCON-VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas, 2008.
- ELIAS, M. C. Manejo tecnológico da secagem e do armazenamento de grãos. Editora Cópias Santa Cruz, Pelotas, p.368, 2008.
- FILHO, A. F. L. **Manuseio de Grãos e Farelos**. Viçosa-MG: Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, 1994. 15-22 p.
- KANTOR, N. L. S. Análise da viabilidade técnica e econômica da automação de armazéns de grãos. XVIII CREEM. Congresso em engenharia mecânica, Erechim-RS, 2011.
- MARTINS, N. A. **Sistemas Microcontrolados: Uma abordagem com o Microcontrolador PIC 16F84**. [S.l.]: Editora Novatec Ltda, 2005.
- MOHSENIN, N. N. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach, New York, USA, p. 734, 1974.
- MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos. 2015.
- NAKATANI, A. M. Medição com sensor ultrassônico HC-SR04. III CIMEC, Curitiba-PR, 2014.
- NOTARO, I. A. Desenvolvimento de sistema topográfico a laser. Campinas-SP, p. 80, 1995.
- NUNES, J. A. S. Determinação do ângulo de repouso, volume unitário, eixos ortogonais e esfericidade de trigo. Acta Iguazu, Cascavel-PR, 2015.

OCHÔA, A. L. S. Avaliação do Índice de quebra de grãos em transportadores agrícolas. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Panambi-RS, 2011.

PINTO, M. S. S. Especificação de projeto para medição de velocidade de vento utilizando sensores ultra-sônicos com o método da diferença de fase. XVI Congresso Brasileiro de Automática, Salvador-BA, p. 1944-1949, 2006.

POHNDORF, R. S. Influência da umidade e do percentual de grãos quebrados e inteiros no ângulo de repouso de soja. Encontro de Pós-Graduação – UFPEL, Pelotas, 2011.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenamento de grãos.** [S.l.]: Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 2000.

SABATO, J. E. Comercio de tecnologia. Washington, OEA, Departamento de Assuntos Científicos, p. 35, 1972.

SOUZA, A. H. Uma proposta de linguagem visual orientada a objetos para programação de microcontroladores. P. 160, 1999.

TAVAKOLI, H. Moisture-dependent some engineering properties of soybean grains. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal, 2009.

Ultrasonic Ranging Module HC-SR04. ElecFreaks. Datasheet. Disponível em: <<http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/HCSR04b.pdf>> Acessado em 26 jun. 2017.

GP2Y0A41SK Distance Measuring Sensor Unit. Sharp. Datasheet. <http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a41sk_e.pdf> Acessado em 26 jun. 2017.

ALTIVAR 31 Manual de operação e programação: Inversores de frequência para motores assíncronos. Schneider Electric. <http://ferramentas.schneider-electric.com.br/treinamento/atv31/manual/atv31_manual_do_usuario.pdf> Acessado em 26 jun. 2017.