

## PROTÓTIPO AUTOMATIZADO PARA OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE REJEITO

## AUTOMATED PROTOTYPE FOR OPTIMIZATION OF A REJECT SYSTEM

Luciano Heliodoro Silva; Danilo Camargo Medeiros; Hélio Oliveira  
Ferrari.

### RESUMO

Este artigo objetiva demonstrar a otimização de um sistema de rejeito, de uma planta industrial do ramo alimentar, através da construção de um protótipo automatizado. O sistema é composto por uma esteira controlada por Controlador Lógico Programável, interligado e codificado com sensores capacitivos, onde o enlatamento é acompanhado através da esteira desde quando a lata adentra no sistema de inspeção (um comando digital Alto ou Baixo, que vem do sinal do raio X para CLP confirmando a entrada) até a saída da lata. A partir da observação do sistema original, fez-se o levantamento dos requisitos necessários para a elaboração da programação Ladder e a correta instalação dos sensores. Trata-se, portanto, de uma pesquisa experimental nas áreas de automação industrial e pneumática. Verificou-se que a otimização efetivada no sistema estudado garantiu que produtos não conformes sejam devidamente detectados e eliminados pelo sistema de rejeito. Através de comunicação digital entre os periféricos, consegue-se identificar o momento em que acontece uma falha de descarte de produto contaminado parando assim todo o processo e evitando que esse produto consiga chegar até o empacotamento e consequentemente o consumidor final.

**Palavras-chave:** Automação industrial; CLP; Otimização.

### ABSTRACT

*This article aims to demonstrate the optimization of a tailings system, of an industrial plant in the food industry, through the construction of an automated prototype. The system consists of a conveyor controlled by Programmable Logic Controller, interconnected and coded with capacitive sensors, where canning is followed through the conveyor from when the can enters the inspection system (a digital command High or Low, which comes from the X-ray signal to CLP confirming the entry) until the can exit. From the observation of the original system, the necessary requirements for the elaboration of Ladder programming and the correct installation of sensors were surveyed. It is therefore an experimental research in the areas of industrial and pneumatic automation. It was found that the optimization carried out in the studied system ensured that non-compliant products are properly detected and*

*eliminated by the tailing system. Through digital communication between the peripherals, it is possible to identify the moment when a failure occurs in the disposal of contaminated product, thus stopping the entire process and preventing this product from reaching the packaging and, consequently, the final consumer.*

**Keywords:** Industrial automation; PLC; Optimization.

## INTRODUÇÃO

As empresas que trabalham com produção de alimentos têm buscado propiciar além dos aspectos nutricionais, a qualidade e integridade dos alimentos disponíveis à população. A Segurança Alimentar é uma das principais preocupações da Indústria, com a finalidade de promover um elevado nível de segurança à saúde e bem estar dos consumidores. A garantia de segurança alimentar é uma exigência em qualquer setor que envolva a produção e o fornecimento de gêneros alimentícios. Isso implica em minimizar os riscos, centrada em normas alimentares e de higiene (MALUF *et al.*, 2000)

A qualidade dos alimentos depende dos processos de produção, manufatura, acondicionamento, transporte e armazenamento. Atualmente a ampla utilização de embalagens metálicas no acondicionamento de alguns tipos de produtos alimentícios tem sido prioridade devido às suas características de impermeabilidade, hermeticidade (totalmente fechado), baixo peso, facilidade de moldagem e resistências mecânica e térmica (GRIGG, McALIDEN, 2001). As empresas necessitam cada vez mais de um sistema de inspeção para detecção de contaminantes nas latas, com maior critério de precisão para diminuir os riscos aos clientes, assegurando assim, um produto com maior confiabilidade.

Segundo Batchelor *et al.* (2004) o sistema de inspeção feito por raio X possibilita a detecção de diversos tipos de materiais dentro de enlatados, por exemplo vidro, metal, minerais, plásticos de alta densidade e osso calcificado, podendo monitorar os níveis de enchimento e verificar os defeitos nos recipientes. Isso é feito através da variação de densidade e espessura do produto pois, a quantidade de energia absorvida pelo produto é proporcional à densidade e espessura. Uma abordagem usual de algumas indústrias é associar os sistemas de inspeção por raio X à tecnologia de automação por uso do controlador lógico

programável, também conhecido como CLP ou PLC (Programmable Logic Controller). Segundo Immel (2012), Moraes e Castrucci (2007) o CLP é um dos mais importantes avanços da automação industrial de todos os tempos por se adaptar em várias aplicações, podendo alterar movimentos em uma máquina, ou gerir resposta de encerramento para uma parada de emergência na linha, sendo assim poderá criar até mesmo um sistema de inspeção para acompanhamento do processo.

Assim, este artigo está circunscrito na análise de um sistema de inspeção por raio X controlado por CLP's em uma empresa do ramo alimentícia. A partir desse sistema levantou-se um conjunto de requisitos que geraram a necessidade de construir um protótipo automatizado otimizado para inspeção e prevenção de não conformidades para garantir maior segurança do produto final. As etapas a seguir descrevem o funcionamento do sistema analisado:

1) Quando a esteira é ligada a lata passa pelo detector Raio X. Caso não seja detectado não conformidades no produto (NÃO), a lata segue o fluxo normal;

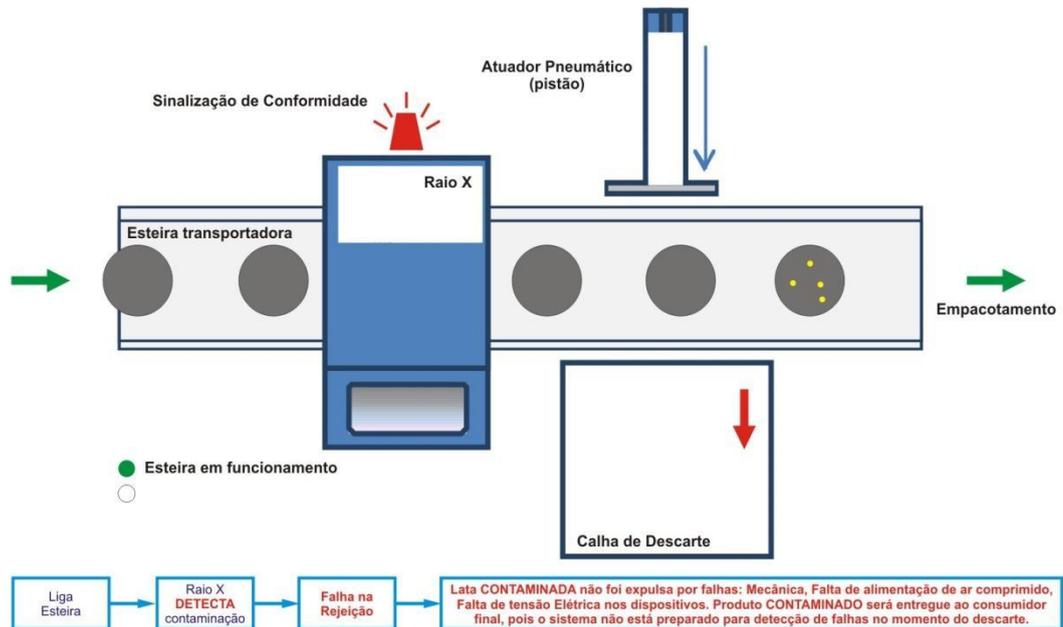
2) Caso seja detectado alguma não conformidade possui dois procedimentos:

A) Se detectado com material estranho (SIM), o detector envia um sinal para o CLP que aciona o atuador pneumático (expulsador) para a retirada do produto. Porém existindo um problema mecânico ou elétrico no expulsador, trazendo um comprometimento de sua ação, a lata continuará na esteira, pois não existe nenhum meio de confirmação de expulsão do produto, causando assim possibilidades de entrega do produto não conforme ao consumidor final.

B) Verifica-se que quando a embalagem adentra no detector (Raio X) o mesmo detecta material estranho (SIM) e envia o sinal para o expulsador, que atua, porém se este estiver com pressão de ar baixa ocasionará uma lentidão no acionamento do pistão fazendo com que a lata se choque com a guia da esteira e continue no processo, seguindo o fluxo normal e sendo enviada ao consumidor.

A figura 1 demonstra a fragilidade do processo atual, descrevendo que as haja falhas no sistema de rejeito (atuador pneumático), como por exemplo o pistão com insuficiência de ar na alimentação, travamento mecânico da esteira, rompimento de cabo elétrico e outros, não existe nenhum sistema (sinalização) que detecta tal falhas e que venha impedir que a lata com não conformidade continue na esteira e com isto compromete toda a produção.

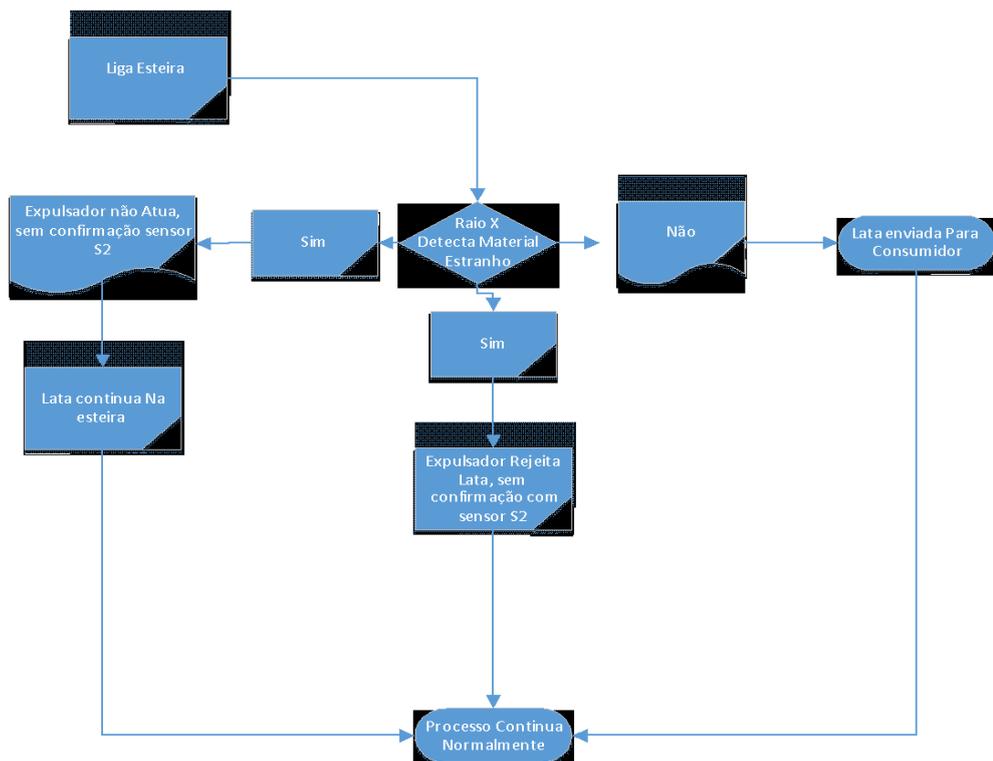
**Figura 1 - Processo atual em vista superior**



Fonte: Autoria própria (2020)

O processo anterior é também descrito através do fluxograma da figura 2:

**Figura 2 - Fluxograma do processo atual**



Fonte: Autoria própria (2020)

Percebe-se, portanto que há um comprometimento do sistema de controle de qualidade e segurança dos alimentos, devido a existência de vários fatores interferentes no processo, justificando-se assim a necessidade do estudo para a otimização deste sistema de rejeito.

Para tanto, objetivou-se neste artigo, um modo de otimizar esse processo através da construção de um protótipo, onde foi implantado um sistema de sensores acoplado na esteira que visa inspeção e prevenção permanente de não conformidades, intencionando a eficiência do sistema de rejeito, propondo-se assim a atender o princípio de prevenção, e obter garantias de uma maior segurança do produto final.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Segundo Silva e Menezes (2005), esta pesquisa se classifica como de natureza aplicada, por trabalhar com conhecimentos para aplicação prática com o intuito de solucionar problemas. Quanto aos procedimentos técnicos utiliza de pesquisa bibliográfica e experimental. As tecnologias de automação e atuação pneumática darão a fundamentação para a construção do protótipo.

A automação Industrial conforme Rosário (2009), na maioria das vezes processa-se da seguinte maneira: um computador recebe os sinais provenientes dos vários instrumentos de medidas da fábrica, compara tais medidas com os valores ideais e realiza operações matemáticas com a finalidade de gerar sinais de correção, que instruirão os dispositivos de controle acerca da alteração mais apropriada para cada instante, com o intuito de conduzir a uma produção ótima sob um determinado ponto de vista, seja ele qualitativo ou quantitativo.

De acordo com Fialho (2011) e Festo (1995) a pneumática trata dos movimentos e fenômenos dos gases, enquanto a eletropneumática é ramo da pneumática que passa a utilizar energia elétrica para acionamento de válvulas direcionais monitoramento via sensores magnéticos de posicionamento, pressostatos, microswitches, etc. Por sua vez, pneumática é “uma evolução da eletropneumática, em que a eletrônica passa a ter uma maior aplicação, utilizando controladores lógicos programáveis, sensores digitais, sistemas robotizados, etc”

(FIALHO, 2011).

Segundo Immel (2012), o controladores lógico programável, ou simplesmente CLP, é um computador digital genérico que, com a devida programação, pode ser utilizado para automatizar praticamente qualquer processo eletromecânico. Um Controlador Lógico Programável é definido pelo IEC (International Electrotechnical Commission) como:

Sistema eletrônico operando digitalmente, projetado para uso em um ambiente industrial, que usa uma memória programável para a armazenagem interna de instruções orientadas para o usuário para implementar funções específicas, tais como lógica, sequencial, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de entradas e saídas digitais ou analógicas, vários tipos de máquinas ou processos. O controlador programável e seus periféricos associados são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle industrial e facilmente usados em todas suas funções previstas. (FRANCHI; CAMARGO, 2013, p. 23).

O CLP funciona de forma seqüencial, fazendo um ciclo de varredura em algumas etapas. É importante observar que quando cada etapa do ciclo é executada, as outras etapas ficam inativas. O tempo total para realizar o ciclo é denominado CLOCK. A linguagem Ladder foi a primeira que surgiu na programação dos CLPs, pois sua funcionalidade procurava imitar os antigos diagramas elétricos. Dessa forma torna-se elementar a transposição de um diagrama elétrico para linguagem Ladder. Para desenvolvimento e construção do protótipo foram elencados os seguintes requisitos:

1. Analisar seqüenciamento do processo de detecção e Rejeito;
2. Analisar todas as possíveis causas de falhas que envolvem os equipamentos do processo (Falhas mecânicas, falhas na alimentação de ar comprimido, falta de tensão elétrica nos dispositivos).
3. Realizar rejeição do produto contaminado em tempo real;
4. O funcionamento do sistema de rejeito deve estar apto a expulsar a embalagem com não conformidade;
5. O funcionamento do sistema de rejeito deve estar apto a parar o processo quando for detectado irregularidades e o sistema de expulsão não atuar;
6. Garantir que não seja enviado produto com não conformidades ao consumidor;

Com a definição dessas especificações foi iniciado o desenvolvimento do protótipo, onde será explorados controladores lógicos programáveis e as linguagens de programação definidas pela norma IEC 61131-3 (IEC, 1993),(YOUNG,2019), (ALLEN-BRADLEY, 2016).

A figura 3 demonstra a bancada de desenvolvimento do protótipo composta pelos itens a seguir: - uma esteira rolante; - um CLP; - 3 dispositivos periféricos (sensores capacitivos); - pistão;- calha; - computador; - motor

**Figura 3** – Bancada de Desenvolvimento do Protótipo



Fonte: Autoria própria (2020)

Foi desenvolvido um programa computacional que executa toda a lógica do processo através de um Controlador Lógico Programável, alguns sensores de detecção foram instalados para que seja feita a comunicação efetiva entre todos os dispositivos periféricos inclusive o atuador pneumático (Pistão) e Raios-X, acoplados a uma esteira transportadora de enlatados, que de acordo com a análise removerá

automaticamente o produto que não esteja dentro dos parâmetros previamente estabelecidos. Quanto à programação, observa-se que o software utilizado neste artigo dispõe apenas duas linguagens definidas pela norma IEC 61131-3: Diagrama Ladder e Diagrama de Blocos Funcionais.

Outra ferramenta indispensável, conforme exposta por Young (2019), para a elaboração deste artigo foi a possibilidade de simulação do programa de aplicação, característica muito importante do protótipo foram os possíveis testes, para evitar movimentos (atuação) indesejadas.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

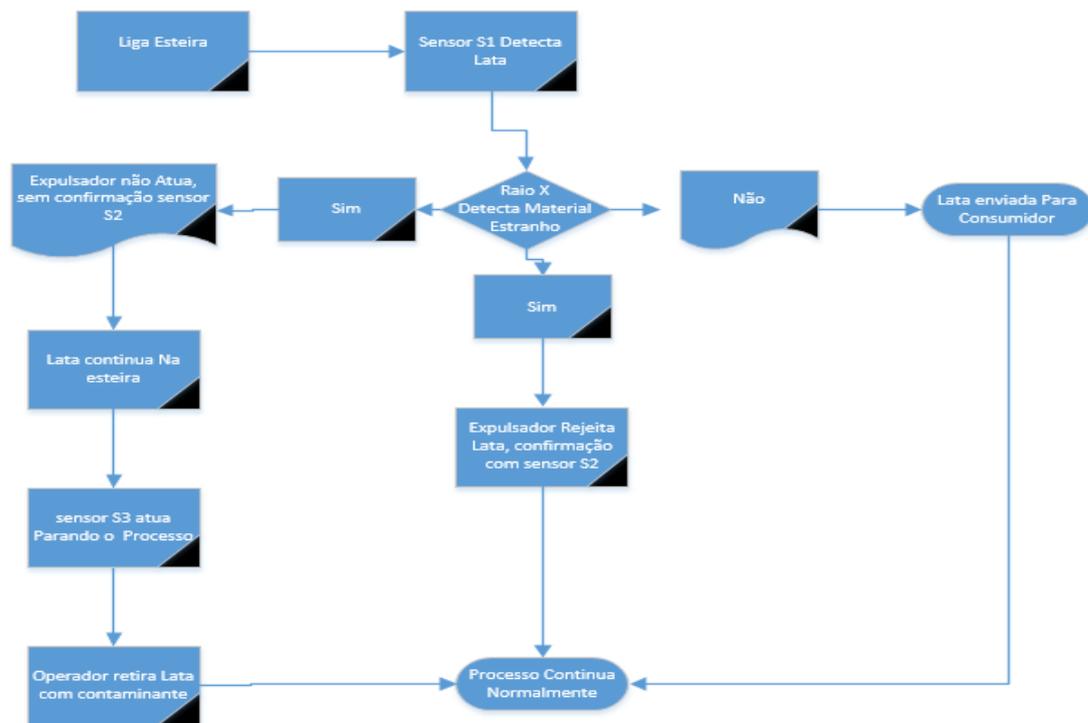
Através da análise de uma linha de produção do ramo alimentício, foram verificadas falhas no sistema de inspeção, caso haja a não conformidade do produto o mesmo pode chegar até o consumidor final, pelo fato de não existir um sistema seguro e redundante para a expulsão dos produtos detectados com não conformes. A partir dos dados obtidos através de análise, foi criado um protótipo com as modificações necessárias para vistoriar e prevenir todas as possíveis falhas do sistema observado como se verifica na metodologia.

Desenvolvido a programação em Ladder com toda a lógica do processo que é controlado pelo o CLP SLC 500 (YOUNG, 2019) interligado e codificado com sensores de detecção na esteira transportadora antes e após o sistema de detecção (Raios-X) efetivamente eliminaram o risco do produto com não conformidade ser entregue ao consumidor por possíveis falhas nos sistemas mecânico, elétrico e pneumático após os dispositivos que garante a otimização do processo.

A figura 4 acima mostra um esboço do fluxo de informações que define a base do protótipo. De acordo com a figura 4 onde demonstra o processo otimizado que poderá ser visto através do protótipo que simula uma linha de produção de enlatados, onde a lata inicia o processo passando pelo sistema de detecção que é implantado na esteira transportadora e através desta, a lata é transportada e existirá a confirmação de entrada no equipamento radiológico por meio de sensor capacitivo (S1), que fará a comunicação com os demais sensores e atuadores da própria linha. Neste instante uma inspeção radiológica será feita no recipiente, constatando a presença ou não de contaminantes físicos.

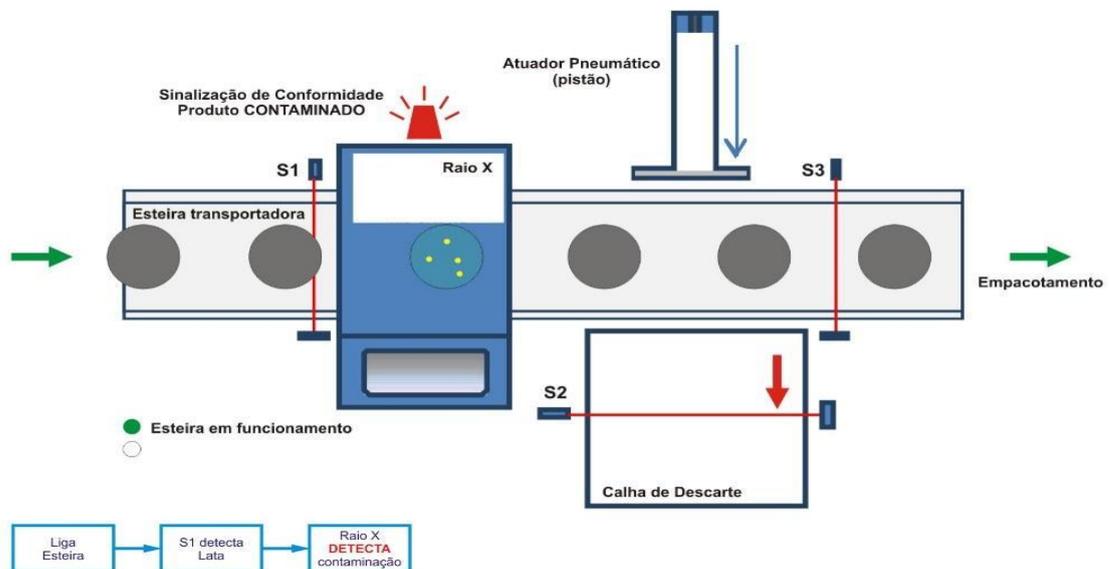
A partir do momento que a embalagem for detectada pelo sensor S1 e passar no detector (Raio X), e nesta for detectado uma não conformidade, a confirmação da embalagem rejeitada será ocorrida pelo sensor S2, o que torna-se essencial para a continuidade do processo, caso isso não ocorra o processo é interrompido a partir do sensor capacitivo S3 que acionará o alarme imediatamente quando esta lata continuar no fluxo, sendo necessário a intervenção do operador para a retirada manual. No caso de não detecção de irregularidades, o produto seguirá através da esteira até o empacotamento, e depois para o consumidor final.

**Figura 4** – Fluxograma do processo otimizado



Fonte: Autoria própria (2020)

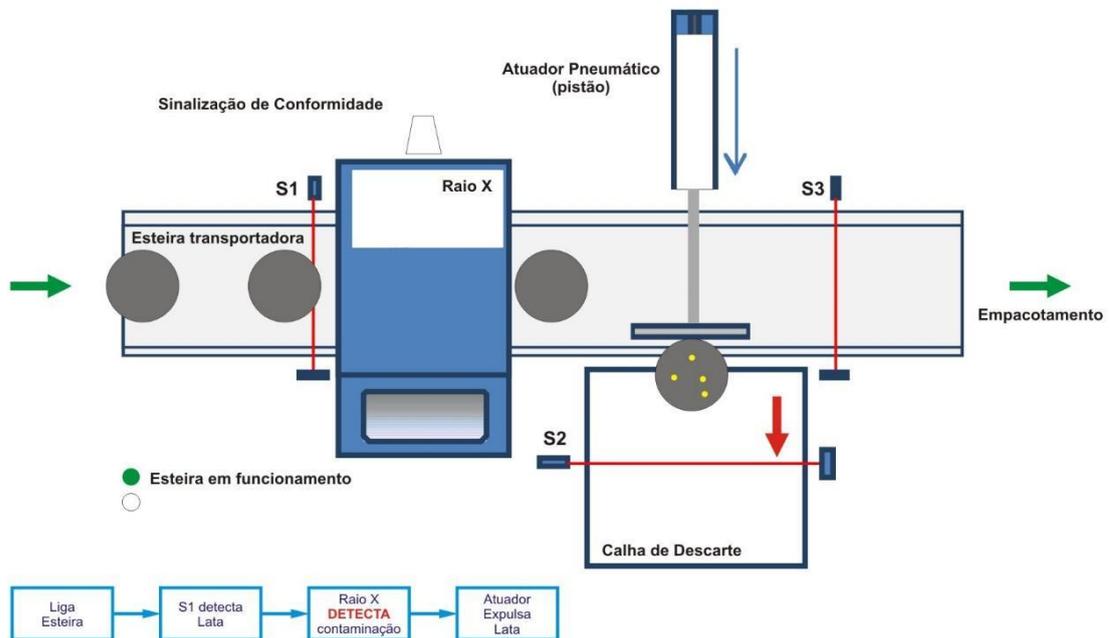
Os resultados apresentados serão analisados a partir das figuras abaixo:

**Figura 5** – Detecção de contaminante em vista superior

Fonte: Autoria própria (2020)

Conforme mostra a figura 5, o protótipo é composto por uma esteira transportadora, um sistema de detecção (Raio x) que detecta e sinaliza a conformidade do produto (contaminado ou não contaminado) e um atuador pneumático (pistão) que atua quando detecta a não conformidade da lata e expulsa a mesma por uma calha de descarte. Nesta figura 5 ocorreu a primeira modificação que foi a implementação do sensor S1, através deste sensor será possível saber exatamente quando a lata inicia passagem pelo sistema de detecção, podendo assim estabelecer o início do ciclo lógico. No exemplo em detalhe na figura acima, este produto foi detectado com não conformidades pelo sistema de Raio X, sendo assim este produto terá que ser descartado da linha de produção, que será detalhado nas figuras seguintes.

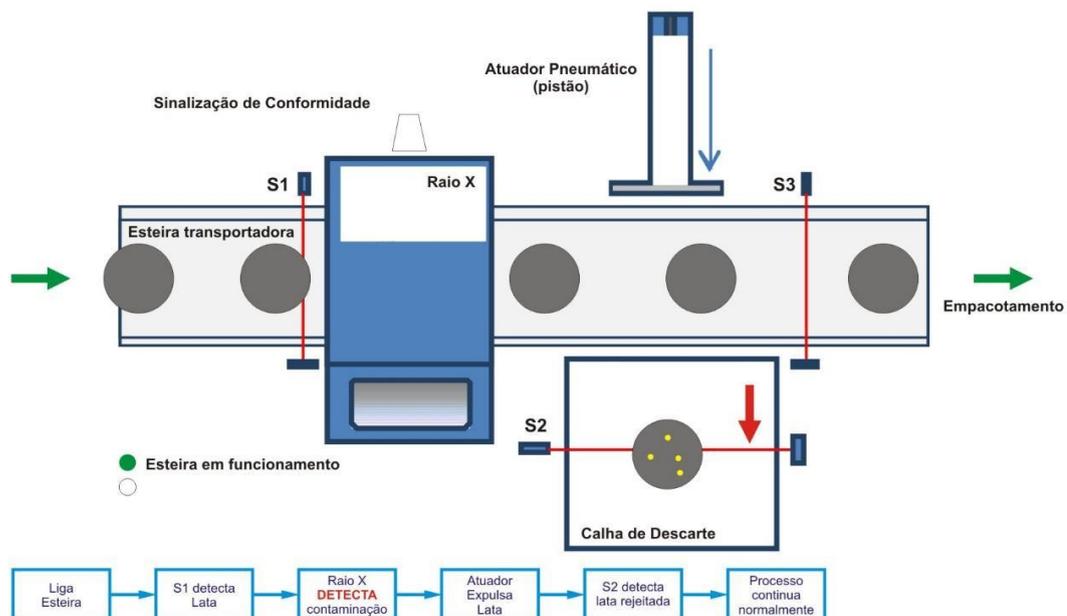
**Figura 6** – Atuador expulsando produto não conforme em vista superior



Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 6 podemos notar o momento exato em que o atuador expulsa o produto detectado com não conformidades, para uma calha de descarte.

**Figura 7** – Sensor confirmando o correto descarte do produto em vista superior

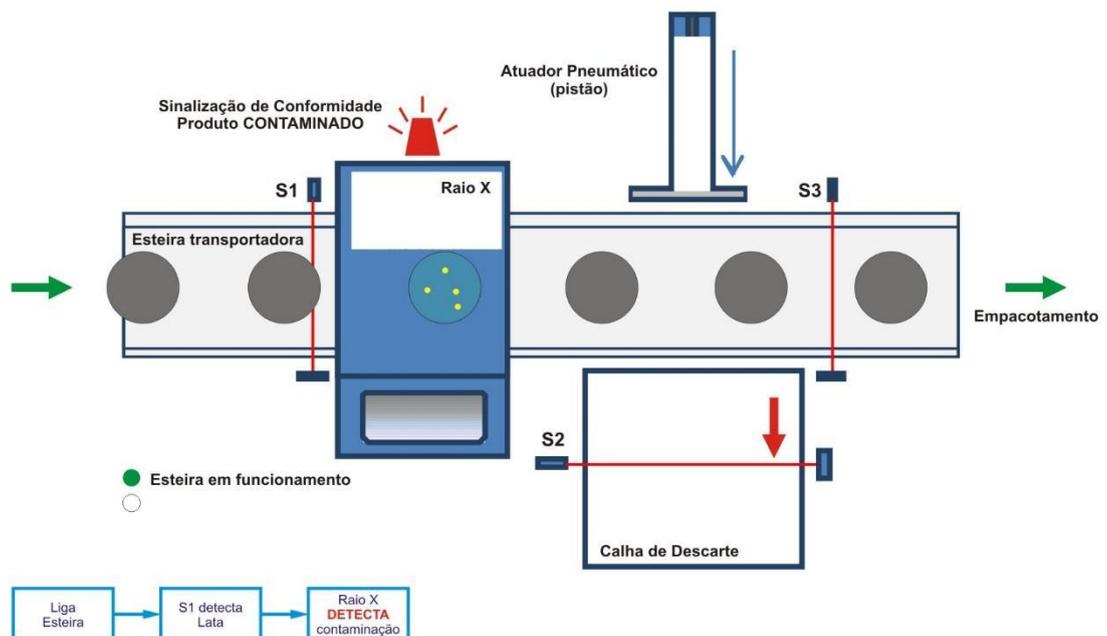


Fonte: Autoria própria (2020)

Na figura 7 temos a segunda modificação importante, que é a introdução no protótipo do sensor S2. Podemos observar o momento em que o sensor verifica a passagem do produto expulso, pela calha de descarte, confirmando que o acionamento do pistão foi eficiente, inibindo falhas como baixa pressão de ar comprimido, diminuição do curso do pistão por travamentos, que possam comprometer o sistema no momento de expulsão da lata.

Esse sensor como todos os outros, é de extrema importância durante o processo, pois toda lata rejeitada terá de ser confirmada por ele, senão todo o processo será parado no exato momento em que essa lata não conforme, passar pelo sensor S3, sensor exclusivo para latas aprovadas pelo sistema de inspeção de Raio X, indicando assim o acontecimento de uma falha no sistema de expulsão.

**Figura 8** - Detecção de contaminante em vista superior



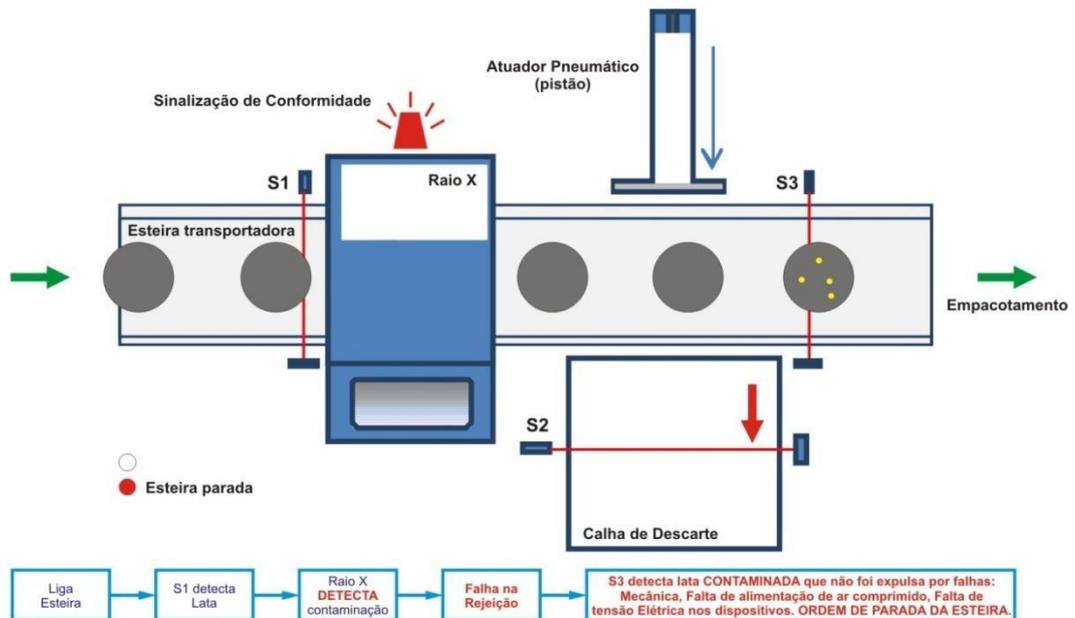
Fonte: Autoria própria (2020)

Na Figura 8 observamos que o Raio X detecta um produto não conforme, devendo este ser expulso pelo sistema de rejeito da esteira, que será detalhado nas figuras seguintes.

No momento em que o sistema de inspeção verifica a existência de contaminantes ou até mesmo a não conformidade do produto, seja ela por

quantidade errada ou embalagem avariada, o sistema segue um padrão de tempo para que a lata se aproxime do sistema de expulsão (atuador pneumático) e seja efetivada a expulsão do produto no momento exato da lata com o atuador.

**Figura 9** – Sensor detecta falha na expulsão de produto não conforme em vista superior



Fonte: Autoria própria (2020)

Na figura 9 nos mostra a importância do sensor S3, quando o detector (Raio X) encontra um lata com não conformidades e o sistema de expulsão por alguma falha (Travamento mecânico, falta de ar comprimido, falta de tensão elétrica) não realiza a expulsão, o sistema não recebe o sinal do sensor S2 (confirmação de Rejeição), a lata continua na esteira indo de encontro ao sensor S3, quando o sinal do mesmo é enviado ao PLC, é acionado uma saída para intertravar a esteira acionando um alarme para a intervenção do operador, retirando a lata com contaminante e restabelecendo o processo.

O sistema criado, enxerga falhas que possam acontecer na esteira durante o processo, fazendo com que essa falha seja resolvida na fábrica, não deixando que produtos avariados cheguem até seus consumidores.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse artigo demonstrou-se a partir de observações a necessidade da construção de um protótipo, com intuito de minimizar falhas no sistema de rejeito. Indústrias alimentícias encontram-se em um campo onde não há espaços para falhas, devido a um elevado padrão de segurança alimentar, que busca incessantemente a maneira mais confiável e dinâmica de se produzir alimentos, buscando assim mitigar erros nos processos de produção como a contaminação do produto ou até mesmo a variação de quantidade de um produto em uma embalagem. Por esses motivos impõe-se investimento em tecnologias que tragam a segurança e confiabilidade desejada sem perder a produtividade em um processo..

O sistema elaborado é composto por uma esteira controlada por CLP, interligado e codificado com sensores capacitivos, onde o enlatamento é acompanhado através da esteira desde quando a lata adentra no sistema de inspeção (um comando digital Alto ou Baixo, que vem do sinal do raio X para CLP confirmando a entrada) até a saída da lata. Fez-se necessário então: a criação da lógica em Ladder para automação com CLP que efetuou o controle e interligação de todos os sensores e atuadores no processo de detecção e descarte; instalação de sensores em etapa anterior à lata adentrar no sistema de Raio X a fim de verificar o fluxo antes e após a lata ser inspecionada pelo sistema de detecção; instalação de sensores após o sistema de detecção (Raio X) e no sistema de rejeito na esteira da linha de produção a fim de garantir e inspecionar o fluxo do enlatamento, observado que caso houver lata contaminada esta será retirada da esteira a partir do sistema de rejeito (pistão e calha), e em caso de falhas no pistão (mecânica ou elétrica) a haverá detecção rapidamente interrompendo o fluxo e permitindo a retirada do contaminante.

Verifica-se, portanto que a otimização garante que produtos não serão entregues ao consumidor com não conformidade. Através de comunicação digital entre os periféricos (controlador, atuador e sensores) instalados no processo, que vistoriam em tempo real o produto, consegue-se assim identificar facilmente o momento em que acontece uma falha de descarte de produto contaminado parando assim todo o processo e evitando que esse produto consiga chegar até o empacotamento e conseqüentemente o consumidor final.

**REFERÊNCIAS**

ALLEN-BRADLEY. Logix5000 Controllers IEC 61131-3 Compliance. Istambul, Turquia: Rockwell Automation, 2016. Disponível em: [http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pm/1756-pm018\\_en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pm/1756-pm018_en-p.pdf). Acesso em: 14/09/ 2019.

BATCHELOR, B. G., DAVIES, E. R., GRAVES, M., 2004. P. 226-264. Using X-rays to detect foreign bodies. In EDWARDS M. (Ed.), *Detecting foreign bodies in food England*: Woodhead Publishing Ltd. 2004

FESTO. *Análise e montagem de sistemas pneumáticos*, São Paulo: Festo Didactic, 1995.

FIALHO, Arivelto Bustamante. *Automação Pneumática: projetos, dimensionamento e análise de circuitos*. -7. ed. -São Paulo: Érica, 2011.

FONSECA, M.O., SEIXAS FILHO, BOTTURA FILHO, J.A., *Aplicando a norma IEC 61131 na automação de processos*, ISA América do Sul. 2008

FRANCHI, Claiton Moro; CAMARGO, Valter Luis Arlindo. *Controladores lógicos programáveis: Sistemas Discretos*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

GEORGINI, M. *Automação Aplicada: Descrição e Implementação de Sistemas Sequenciais com PLC's*. 1. Ed. São Paulo: Érica: 2000. 216 p.

GRIGG, N.; McALINDEN, C. A new role for ISO 9000 in the food industry? Indicative data from the UK and mainland Europe. *British Food Journal*, v. 103, n. 9, p. 644-656, 2001.

IEC, International Electrotechnical Commission, *Programmable Controllers Part 3, Programming Languages, IEC1131-3*. Geneva: IEC, 1993. 207p.

IMMEL, R. L. *Programmable Logic Controller Evolution*. Madison: Manufacturing Business Technology, 2012. Disponível em: Acesso em: 24 set. 2014.

LEWOTSKY, K. *IEC61131 Standardizes PLC Programming*. 2010.

MALUF, R.S., MENEZES, F. , MARQUES, S.B. *Caderno Segurança Alimentar*. 2000. Disponível em: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/seguranca+alimentar\\_000gvxlxe0q02wx7ha0g934vgwlj72d2.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/seguranca+alimentar_000gvxlxe0q02wx7ha0g934vgwlj72d2.pdf) Acesso em 02/05/2019.

*Manual de Controlador Lógico Programável Modelo SLC-500®*, catalogo número 1747-RM001E-EN-P, 2006

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. *Engenharia de Automação Industrial*. 2ª ed. Rio

de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2007.

ROCKWELL AUTOMATION, Hardware/Software Reference Manual, 1996. Disponível em: <http://ab.rockwellautomation.com/pt/Power-Supplies/Standard-Switched-Mode-Power-Supplies#documentation>. Acesso em 16 de novembro de 2016 às 23:56 h.

ROSÁRIO, J. M. Automação Industrial. São Paulo: Baraúna, 2009.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação. 4ª ed. rev. e atual. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: [http://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc/comum/metodologia\\_da\\_pesquisa.pdf](http://nupet.daelt.ct.utfpr.edu.br/tcc/engenharia/doc/comum/metodologia_da_pesquisa.pdf). Acesso em: 08 de outubro de 2014.

YOUNG, T. Learn Ladder Logic with a Free Version of RSLogix 500 and RSEmulator 500, 2019. Disponível em <http://www.plcdev.com/book/export/html/622>>. Acesso em: 02/05/2019

## **AUTORES**

**Luciano Heliodoro Silva.** Graduado em Engenharia Elétrica, UEMG – Unidade Ituiutaba. E-mail: [silvaheliodoro@gmail.com](mailto:silvaheliodoro@gmail.com)

**Danilo Camargo Medeiros.** Graduado em Engenharia Elétrica, UEMG – Unidade Ituiutaba. E-mail: [danilocamargos.eng@gmail.com](mailto:danilocamargos.eng@gmail.com)

**Hélio Oliveira Ferrari.** Graduado em Engenharia Elétrica (UNIFEB), Doutor em Engenharia Elétrica (UFU), Professor da UEMG – Unidade Ituiutaba, pesquisador do GPETEX - Grupo de Pesquisa em Engenharia, Tecnologia e Ciências Exatas (UEMG). E-mail: [helio.ferrari@uemg.br](mailto:helio.ferrari@uemg.br)