



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Cristian de Biasi Gislon

**Projeto e implementação de um sistema de controle para o aumento da
segurança e da produção em máquinas extrusoras recuperadoras de plásticos**

Florianópolis - SC
2023

Cristian de Biasi Gislon

Projeto e implementação de um sistema de controle para o aumento da segurança e da produção em máquinas extrusoras recuperadoras de plásticos

Relatório final da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) como Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Santa Catarina em Florianópolis.

Orientador: Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gislon, Cristian de Biasi

Projeto e implementação de um sistema de controle para o aumento da segurança e da produção em máquinas extrusoras recuperadoras de plásticos / Cristian de Biasi Gislon ; orientador, Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, 2023.

63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Controle de pressão. 3. Extrusora de plástico. 4. Indústria de reciclagem. I. de Oliveira, Marcelo De Lellis Costa. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Cristian de Biasi Gislou

Projeto e implementação de um sistema de controle para o aumento da segurança e da produção em máquinas extrusoras recuperadoras de plásticos

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511 (Projeto de Fim de Curso) e aprovada em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Florianópolis, 12 de julho de 2023.

Prof. Hector Bessa Silveira, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr.
Orientador
UFSC/CTC/DAS

Prof. Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, Dr.
Supervisor
UFSC/CTC/DAS

Prof. Feres Azevedo Salem, Me.
Avaliador
UFSC/CTC/DAS

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.
Presidente da Banca
UFSC/CTC/DAS

Este trabalho é dedicado à sociedade e aos meus
queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela sabedoria, pela resiliência e por me permitir realizar bons trabalhos ao longo desta caminhada.

Aos meus pais, Pedro e Rosalir, por trabalharem para proporcionar o melhor para minha educação. Por serem meus exemplos de vida, honestidade e caráter.

À minha irmã, Kellem, por estar sempre ao meu lado, aconselhando e acolhendo em todos os momentos, principalmente os difíceis. Muito obrigado.

À minha namorada, Giulia, por compreender as abdicções dos momentos de lazer durante minha caminhada na graduação. Obrigado por estar ao meu lado.

Aos meus amigos da graduação, Valdecir, Guilherme e Juliano, que me acompanharam no desafio de residir e estudar em uma nova cidade. Todos os trabalhos foram mais tranquilos com vocês.

Ao meu orientador Marcelo De Lellis Costa de Oliveira, por dispor do seu tempo me guiando neste trabalho desde o início, com paciência, conhecimento e profissionalismo. Lembrarei com muito carinho de toda sua ajuda.

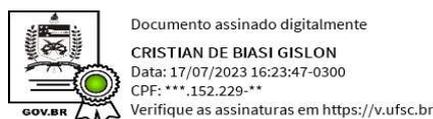
À empresa que disponibilizou a máquina para utilização e desenvolvimento deste trabalho. Além dos operadores e manutentores, por compartilharem grandes conhecimentos e experiências acumulados ao longo de anos de trabalho.

DECLARAÇÃO DE PUBLICIDADE

Florianópolis, 30 de junho de 2023.

Na condição de representante da PRK Automação e Controle LTDA na qual o presente trabalho foi realizado, declaro não haver ressalvas quanto ao aspecto de sigilo ou propriedade intelectual sobre as informações contidas neste documento, que impeçam a sua publicação por parte da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para acesso pelo público em geral, incluindo a sua disponibilização *online* no Repositório Institucional da Biblioteca Universitária da UFSC. Além disso, declaro ciência de que o autor, na condição de estudante da UFSC, é obrigado a depositar este documento, por se tratar de um Trabalho de Conclusão de Curso, no referido Repositório Institucional, em atendimento à Resolução Normativa n° 126/2019/CUn.

Por estar de acordo com esses termos, subscrevo-me abaixo.



Cristian de Biasi Gislon
PRK Automação e Controle LTDA

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de controle de pressão com o objetivo de aumentar a segurança e a produção em máquinas extrusoras recuperadoras de plásticos. Observações empíricas da indústria da reciclagem indicam que o rompimento dos parafusos do cabeçote de máquinas extrusoras recuperadoras ocorrem com certa frequência, gerando horas de máquina parada e riscos à segurança dos operadores. O aumento de pressão se dá pelo acúmulo de sujidades no filtro de impurezas e pela falta de variação na velocidade do motor principal, aumentando a pressão do material em processamento. Frente a isso, o presente trabalho apresenta um sistema de aquisição de dados, utilizado para obter dados de operação de uma máquina extrusora recuperadora de uma empresa de reciclagem localizada em Cocal do Sul - SC durante aproximadamente 660 minutos. Os dados foram utilizados para modelagem da planta e, posteriormente, é proposto pelo autor a instrumentação e um esquema de controle capazes de garantir a operação da máquina dentro de níveis de pressão aceitáveis. O controle foi implementado em um controlador lógico programável e supervisionado por meio de uma interface gráfica, sendo avaliado e parametrizado inicialmente em simulação. A solução também foi aplicada em campo, na máquina extrusora disponibilizada. Os resultados encontrados sugerem que a solução proposta é capaz de cumprir os objetivos, aumentando a segurança dos operadores e aumentando a produção de material processado pela máquina.

Palavras-chave: Controle de pressão. Extrusora de plástico. Indústria de reciclagem.

ABSTRACT

This study describes the development of a pressure control system with the aim of increasing safety and production in extruder machines for plastic recovery. Empirical observations of the recycling industry indicate that breakage of screws in the die of extruder recovery machines often occurs, generating hours of machine downtime and risks to the safety of operators. The increase in pressure is due to the accumulation of dirt in the impurity filter and the lack of variation in the speed of the main motor, increasing the pressure of the material being processed. In view of this, the present study presents a data acquisition system, used to obtain operating data from an extruder recovery machine of a recycling company located in Cocal do Sul - SC for approximately 660 minutes. The data were used to model the plant and, subsequently, the instrumentation and a control scheme are proposed by the author. The proposed solution guarantees the operation of the machine within acceptable pressure levels. The control was implemented in a programmable logic controller and supervised through a graphic interface, being initially evaluated and parameterized in simulation. The solution was also applied in the field, in the extruder machine provided. The results found suggest that the proposed solution is able to meet the objectives, increasing operator safety and increasing the throughput of material processed by the machine.

Keywords: Pressure control. Plastic extruder. Recycling industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da linha de separação e lavagem de plástico.	17
Figura 2 – Representação da linha de extrusão e corte de plástico.	17
Figura 3 – Representação de uma máquina extrusora.	21
Figura 4 – Representação de um trocador de tela hidráulico.	23
Figura 5 – Inversor de frequência modelo CFW11, fabricante WEG.	24
Figura 6 – CLP modelo Nexto Express, fabricante Altus.	26
Figura 7 – IHM modelo Cmt 2166x, fabricante Weintek.	27
Figura 8 – Sistema de aquisição de sinais.	29
Figura 9 – Aquisição completa dos dados.	31
Figura 10 – Ampliação da Figura 9 em período de operação com alto grau de impurezas.	32
Figura 11 – Diagrama de malha aberta.	33
Figura 12 – Comparação dados reais e modelo de simulação ($\omega = 54,4\text{Hz}$). . .	34
Figura 13 – Diagrama de malha fechada.	35
Figura 14 – Simulação inicial.	38
Figura 15 – Comparação entre o sistema proposto pelo autor e a solução implementada de velocidade fixa.	39
Figura 16 – Diagrama do sistema de controle.	41
Figura 17 – Registro da vista interna do painel de controle.	42
Figura 18 – Registro da vista externa do painel de controle.	43
Figura 19 – Registros do motor principal e do trocador de tela da máquina extrusora utilizada em testes.	44
Figura 20 – Diagrama do sistema de controle proposto em operação paralela ao sistema atual.	45
Figura 21 – Registro do painel de controle em operação ao lado do painel de acionamento existente na empresa.	46
Figura 22 – Registros das telas de operação e <i>setup</i> desenvolvidas para testes iniciais.	47
Figura 23 – Registros das telas de gráficos e <i>login</i> desenvolvidas para testes iniciais.	48
Figura 24 – Registro completo de dados do Teste 1.	50
Figura 25 – Comportamento ruidoso do sinal de controle e da pressão durante o Teste 1.	51
Figura 26 – Registro completo de dados do Teste 2.	52
Figura 27 – Detalhe de operação do sistema com trocas feitas por indicação externa ao CLP.	53

Figura 28 – Período de operação do sistema com a troca de tela realizada com atraso.	54
Figura 29 – Detalhe de operação do sistema com variações na frequência máxima de saída.	56
Figura 30 – Diagrama de malha fechada reformulado após verificações de características variáveis da planta.	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais interfaces de controle de um inversor de frequência. . .	24
Quadro 2 – Variáveis utilizadas na modelagem.	28
Quadro 3 – Principais componentes utilizados para a aquisição dos sinais. . .	30
Quadro 4 – Variáveis armazenadas pelo CLP.	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador lógico programável
FBD	<i>Function block diagram</i>
GND	<i>Ground</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IHM	Interface homem-máquina
IL	<i>Instruction list</i>
LD	<i>Ladder logic</i>
PEBD	Polietileno de baixa densidade
ST	<i>Structured text</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

c	Ganho entre a velocidade do motor principal e a pressão no cabeçote
b	Magnitude da variação da pressão quando ocorre a troca de tela
c_a	Ganho estimado entre a velocidade do motor principal e a pressão no cabeçote no processamento de material com alto grau de impurezas
c_b	Ganho estimado entre a velocidade do motor principal e a pressão no cabeçote no processamento de material com baixo grau de impurezas
G_p	Planta real da pressão no cabeçote em função da velocidade do motor principal
C_p	Controlador proporcional desenvolvido para o controle de pressão
k_p	Ganho proporcional do controlador
$H_r(s)$	Função de transferência que relaciona o sinal de pressão com a referência
$H_t(s)$	Função de transferência que relaciona o sinal de pressão com a troca de tela
$H_u(s)$	Função de transferência que relaciona o sinal de controle com a referência
C_c	Controlador não linear referente à parcela de controle relacionada à corrente elétrica do motor principal
C_t	Controlador não linear referente à parcela de controle relacionada ao tempo desejado entre troca de tela
G_p	Planta real da pressão no cabeçote em função da troca de tela
ω	Sinal de controle referente à referência de velocidade
ω_{sat}	Sinal de controle saturado referente à referência de velocidade
ω_c	Parcela do sinal de controle relacionada à corrente elétrica do motor principal
ω_p	Parcela do sinal de controle relacionada ap <i>setpoint de pressão</i>
ΔP_{tt}	Amplitude da variação da pressão na ocorrência de troca da tela
F	Sinal do tipo degrau que representa a ocorrência de troca da tela
r_p	Referência de pressão do sistema de controle proposto
P_t	Parcela da pressão referente à troca de tela
P_p	Parcela da pressão referente à velocidade aplicada ao motor principal
P	Pressão a montante do filtro de impurezas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS GERAIS	19
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2	MATERIAIS E MÉTODOS	21
2.1	EXTRUSORA RECUPERADORA DE PLÁSTICOS	21
2.2	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	23
2.3	CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL	24
2.4	INTERFACE HOMEM-MÁQUINA	26
3	DESENVOLVIMENTO	28
3.1	IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM	28
3.2	PROPOSTA DE CONTROLE	33
3.3	SIMULAÇÃO	37
3.4	INSTRUMENTAÇÃO	39
3.5	IMPLEMENTAÇÃO	43
3.5.1	<i>Softwares</i>	45
4	RESULTADOS	49
4.1	TESTE EXPERIMENTAL 1	49
4.2	TESTE EXPERIMENTAL 2	49
4.3	OBSERVAÇÕES GERAIS	55
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A reciclagem de plásticos tem por objetivo o reaproveitamento do resíduo sólido em matéria-prima para produção de um novo produto. Esse processo é classificado em três tipos (ALVARO, 2022):

- Reciclagem mecânica: trata-se da reciclagem mais utilizada e é composta por 4 etapas: moagem, lavagem, secagem e extrusão.
- Reciclagem química: consiste na transformação dos produtos plásticos em materiais petroquímicos básicos, sendo normalmente associada a processos de despolimerização.
- Reciclagem energética: consiste na geração de energia elétrica ou térmica através da incineração do resíduo plástico.

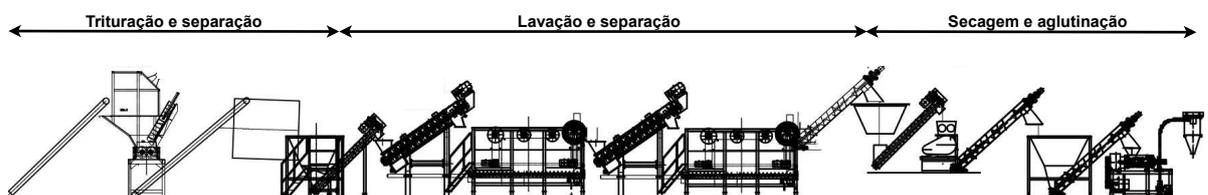
O foco deste trabalho está inserido no contexto do processo de reciclagem mecânica. Nessa reciclagem, os produtos são transformados em itens granulados (*pellets*) para a produção de outros produtos plásticos, como pisos, embalagens, mangueiras, entre outros.

Existem diversos tipos de plástico, sendo a abordagem deste estudo validada no processamento de polietileno de baixa densidade (PEBD).

O processo de reciclagem mecânica inicia-se com a empresa recebendo o plástico a ser reaproveitado. Após o recebimento, o material passa por inspeção visual e separação para a remoção de metais e outros itens indesejáveis ao processo. Feito isso, o material segue para a trituração, visando a redução do tamanho de filmes plásticos com tamanhos grandes. Após triturado, o plástico é submetido à lavagem e a outro processo de separação por decantação. O material desejado e já separado segue para a secagem e moagem. Esse último processo pode ser feito de diversas formas, sendo mais comum a utilização de aglutinadores, que moem, aquecem e retiram a umidade do material simultaneamente. A representação de uma linha de separação e lavagem muito comum na indústria brasileira pode ser vista na Figura 1.

Com o material já seco, o processo tem sequência com o direcionamento do material para a extrusão. Na extrusão o plástico é fundido e homogeneizado e segue para a co-extrusão, processo que faz com que sejam liberados gases indesejados do material. Nessa etapa, o plástico está submetido a alta temperatura, amolecido e em formato de tiras contínuas que, antes de avançarem para a etapa de corte em pequenos grânulos, passam pelo resfriamento através da imersão em reservatório de água. O processo é contínuo, e o material já resfriado é puxado pela máquina de corte que transforma as tiras contínuas em grânulos. Os grânulos são considerados matéria-prima e são armazenados para venda e/ou transformação em produtos finais

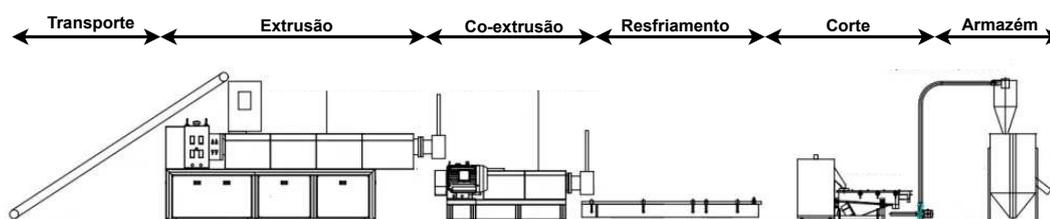
Figura 1 – Representação da linha de separação e lavagem de plástico.



Fonte: adaptado de Palet (2023).

plásticos. A representação de uma linha de extrusão e corte de plástico pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 – Representação da linha de extrusão e corte de plástico.



Fonte: adaptado de Palet (2023).

O processo de fusão e homogeneização do material pode ser feito de diferentes formas, no entanto Schyns e Shaver (2021) afirmam que a extrusão é o principal método usado nas indústrias de reciclagem mecânica para produzir material granulado a partir dos resíduos plásticos comuns.

1.1 MOTIVAÇÃO

Quando ocorre o aumento excessivo da pressão do material em processamento em extrusoras recuperadoras de plásticos os parafusos de fixação do cabeçote são danificados, haja vista que a força exercida pelo material sobre as paredes construtivas da máquina é maior do que a suportada pelos parafusos. Segundo Ferreira (2019), altas pressões geradas durante o processamento devem ser evitadas e são extremamente perigosas, pois podem provocar uma explosão, em que o cilindro pode se romper ou a matriz pode ser empurrada para longe da extrusora. Além de gerar insegurança aos operadores, pelo risco de expelir partes da máquina, a alta pressão ocasiona danos que são reparados apenas com manutenção corretiva, gerando horas de máquina parada e consequente queda na produtividade.

Não existem normativas que regem a construção de máquinas extrusoras. Assim, cada fabricante toma liberdade para construí-las com diferentes dimensões e características distintas. Sendo assim, cada extrusora suporta um determinado nível de pressão em seu interior, que depende da sua característica construtiva.

Em geral, as condições de segurança em usinas de reciclagem de plásticos no Brasil são escassas, e a falta de controle da rotação do motor principal das extrusoras recuperadoras é um item que contribui com o cenário desfavorável (HOFFMANN, 2018). Na literatura, é possível encontrar trabalhos que apresentam soluções para controle de pressão após o filtro de impurezas, variando a rotação do motor, em máquinas extrusoras que produzem produto final, com o objetivo de uniformizar a vazão de material (COMENALE; WILTGEN; ALMEIDA, 2022). Nesses casos, as máquinas processam materiais virgens, ou materiais que já passaram por vários processos de recuperação, estão prontos para compor o produto final e que não contenham alto grau de impurezas. Contudo, trabalhos com foco no controle de pressão em extrusoras recuperadoras que processam materiais de reciclagem são escassos e, após uma exaustiva pesquisa de mercado e observações feitas em campo pelo autor, conclui-se que as soluções difundidas atualmente são ineficientes sendo incapazes de resolver completamente o problema.

Uma solução simples e observada em campo pelo autor, é a medição de corrente elétrica do motor principal, atrelada a uma sirene de sinalização aos operadores. Nesse cenário, a corrente elétrica é monitorada por um equipamento indicador de processos com uma saída digital configurável. Assim, quando o motor principal atinge um nível de corrente elétrica parametrizado pelos mantenedores, o equipamento, através da sirene, indica aos operadores que o motor está entregando elevada potência, sendo um indicativo de alta pressão no interior da máquina. Após a sinalização, os operadores fazem a troca da tela que está com área de passagem de material reduzida, por conta das impurezas acumuladas e, por consequência, a pressão tende a baixar até que a nova tela acumule impurezas novamente. Essa solução é ineficiente, pois não mensura diretamente a pressão do material e, em caso do operador não trocar a tela em tempo hábil, a pressão irá extrapolar o limite suportado pela máquina.

Outro exemplo de solução bastante difundida e observada em campo pelo autor, é a medição da pressão do material por meio de um transdutor acoplado na região a montante do filtro de impurezas. Essa solução utiliza um indicador de processos com duas saídas digitais configuráveis, sendo a primeira configurada para um nível mais baixo de pressão e atrelada a uma sirene de sinalização. A segunda saída digital é configurada para o nível crítico de pressão, sendo assim, quando esse nível é atingido, a saída sinaliza para que automaticamente o motor principal pare de operar. Nessa solução, caso o operador não faça a troca de tela na sinalização da sirene e a pressão continue a aumentar, o nível crítico é atingido e a máquina para a operação, até que o

operador troque a tela e acione novamente o motor. Apesar de melhor, essa alternativa também é ineficiente, pois a velocidade do motor principal permanece fixa durante todo o processo seguro da máquina, sendo que, no cenário com baixa pressão, a velocidade poderia ser mais elevada, aumentando a produção. Além disso, o nível mais baixo de pressão deve ser constantemente ajustado, de acordo com o grau de impurezas do material, pois para materiais com alto grau de impurezas a taxa de aumento de pressão é maior, portanto a sinalização da sirene deve acontecer com maior antecedência, ofertando tempo hábil para que o operador realize a troca da tela.

1.2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é projetar, implementar e testar um sistema de controle de pressão de máquinas extrusoras recuperadoras de plásticos que seja robusto e utilize componentes comerciais, capaz de controlar variáveis importantes no processo de extrusão, permitindo o aumento da produção, bem como da segurança operacional da máquina.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- avaliar e selecionar as grandezas envolvidas no processo para utilização no controle;
- projetar, montar e instrumentar um painel de aquisição de dados para medição das grandezas necessárias para modelagem da planta;
- projetar, montar e instrumentar um painel de controle para medição de grandezas e atuação na planta;
- desenvolver uma interface de supervisão e controle do sistema proposto;
- desenvolver o controle de pressão e lógicas de controle do processo em um sistema confiável e robusto;
- aplicar o sistema desenvolvido em uma máquina extrusora e avaliar os resultados.

ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este trabalho está estruturado em 5 capítulos.

O capítulo 2 aborda conceitos e processos utilizados nesta monografia.

O capítulo 3 apresenta o método e a modelagem do sistema, justificando a escolha das variáveis e do equipamento de aquisição de sinais. Além disso, apresenta a proposta de controle, a simulação, e a implementação.

O capítulo 4 apresenta os testes realizados e discute os resultados obtidos no contexto geral.

Por fim, o capítulo 5 traz as considerações finais feitas pelo o autor e sugestões para trabalhos futuros.

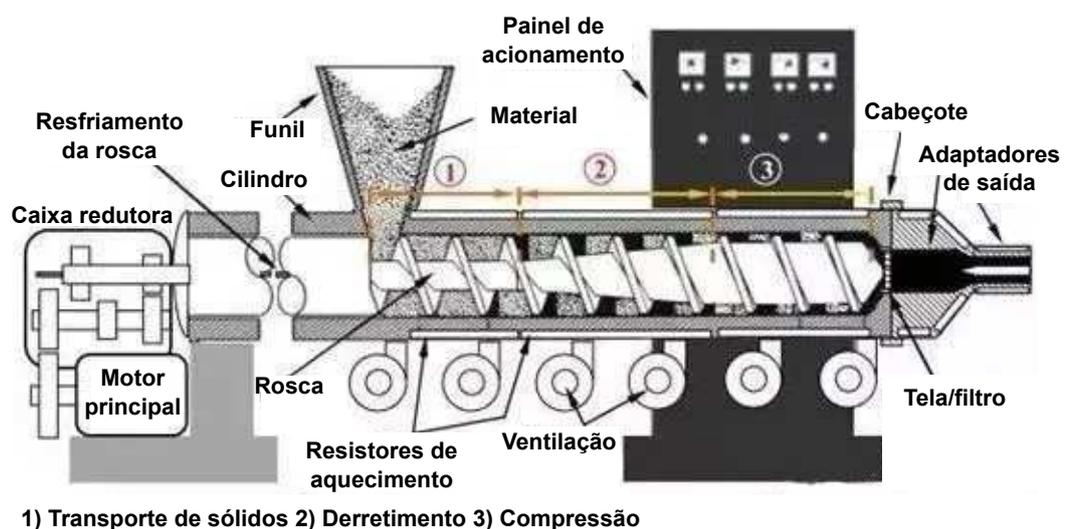
2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta conceitos básicos e informações gerais para o entendimento deste trabalho.

2.1 EXTRUSORA RECUPERADORA DE PLÁSTICOS

As extrusoras recuperadoras de plásticos desempenham importante papel no processo de reciclagem. Além de serem robustas para suportar alta temperatura, devem ser construídas de modo a garantir a segurança dos operadores, a qualidade do material extrudado e o controle do processo. Uma representação dos principais componentes de uma máquina extrusora é apresentada na Figura 3.

Figura 3 – Representação de uma máquina extrusora.



Fonte: adaptado de Jinxin (2020).

O motor principal é um componente fundamental para o funcionamento da máquina. Sendo responsável pelo movimento da rosca, os motores tipicamente utilizados em extrusoras são na faixa de 5 cv a 800 cv (FERREIRA, 2019), sendo na indústria catarinense comumente observado motores na faixa de 75 cv a 350 cv, dependendo do porte da máquina. Além de a potência fornecida pelo motor ser responsável por transportar o material para fora do cilindro, passando pela tela, grande parte dessa potência é utilizada para plastificar o material no interior do cilindro. Em aplicações de extrusoras recuperadoras, comumente utiliza-se motores assíncronos, alimentados por corrente alternada, provida por um inversor de frequência, responsável pela frequência aplicada ao motor e conseqüente controle de velocidade. Outros motores podem ser encontrados em uma extrusora, como os motores responsáveis pela ventilação das

zonas de aquecimento e o motor da bomba hidráulica para acionamento de atuadores hidráulicos na máquina.

A transferência de potência mecânica do motor para a rosca é feita por um sistema de redução de velocidade, conhecido também como caixa redutora. Esse sistema é capaz de diminuir a velocidade de rotação relativa entre o eixo do motor principal e a rosca, aumentando o torque.

A alimentação do material é feita pelo funil. Desempenhando também o papel de pequeno reservatório, o funil possui a finalidade de direcionar o material ainda sólido para a rosca da máquina por meio da gravidade.

Segundo Chung (2019), a rosca realiza a função de transporte do material ainda sólido, a fusão e o bombeamento do plástico para a saída. As três funções ocorrem simultaneamente na maior parte da extensão da rosca e são interdependentes. Além disso, com o movimento da rosca obtém-se a mistura distributiva, a mistura dispersiva, e a homogeneização. A mistura distributiva refere-se ao rearranjo de espaço entre os diferentes componentes do material, e a mistura dispersiva refere-se à redução de tamanhos das moléculas do polímero por cisalhamento. Alguns fabricantes incluem um sistema de resfriamento da rosca com líquido refrigerante que circula dentro do eixo da rosca, auxiliando no controle de sobretemperatura em caso de atrito excessivo.

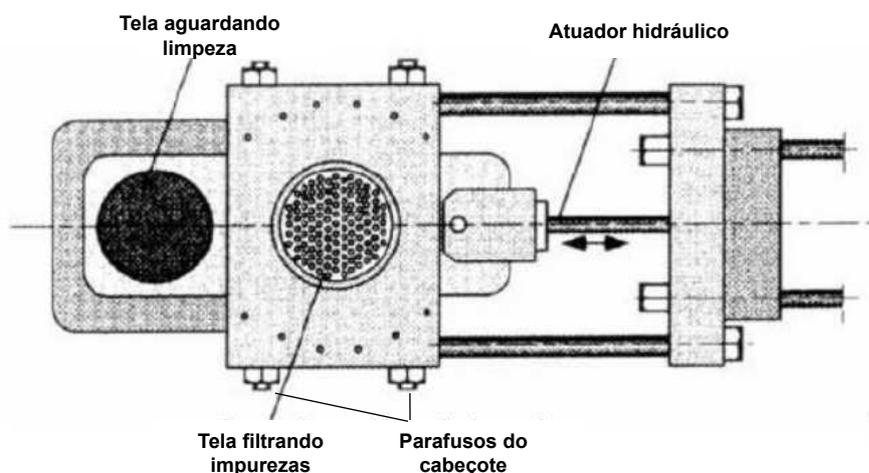
Para auxiliar no processo de fusão do material, a extrusora conta com zonas de aquecimento. Cada zona possui resistores de aquecimento, termopar e ventilador para resfriamento em caso de sobretemperatura causada por erro no controle ou atrito do material no cilindro.

O material transportado pela rosca é direcionado à saída da máquina e submetido à passagem pelo filtro de impurezas. A tela/filtro é posicionada anteriormente à saída da máquina e tem a função de filtrar as sujidades do material (HOFFMANN, 2018). Neste trabalho, as menções ‘tela’ e ‘filtro’ referem-se ambas à estrutura de filtragem de impurezas.

Como a tela precisa passar por processo de limpeza constantemente, caso contrário a passagem do material é restrita, as máquinas atuais contam com atuadores hidráulicos com duas telas em sua construção. Enquanto uma tela está inserida no interior da máquina filtrando impurezas, a outra está externamente à máquina para receber a limpeza. A atuação do atuador de troca de telas é feita com a máquina em funcionamento, sem a necessidade de parar o motor principal. Isso ocorre devido à construção física do trocador, pois, durante a troca, a área de saída não é completamente obstruída. A Figura 4 representa um trocador de tela hidráulico.

É importante destacar que, com o trocador de tela hidráulico, o comando de acionamento para a troca não deve ser automático, mas sim realizado por um operador. Isso é necessário para garantir que o operador esteja ciente da troca da tela e realize a limpeza do filtro sujo com o material ainda quente, facilitando a remoção das sujidades.

Figura 4 – Representação de um trocador de tela hidráulico.



Fonte: adaptado de Ferreira (2019).

Caso o material preso à tela se solidifique, sua remoção é extremamente difícil, com grande possibilidade de danos no filtro no momento da limpeza.

Os componentes necessários para fazer todo o acionamento elétrico da máquina ficam acomodados no painel de acionamento. Nesse equipamento, estão presentes controladores de temperatura, proteções elétricas, botões de comando, e inversores de frequência.

2.2 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Como menciona Blemo (2023), um inversor de frequência é um tipo de componente de controle de motor que aciona um motor elétrico variando a frequência e a tensão de sua fonte de alimentação. Além disso, é capaz de controlar a partida e a parada do motor com rampas de aceleração e desaceleração configuráveis. Como o inversor controla a frequência e a tensão elétrica, isso resulta em um ajuste da velocidade do motor. Além disso, os inversores de frequência atuais integram recursos de rede e diagnóstico para controlar melhor o desempenho e aumentar a produtividade. Economia de energia, controle inteligente do motor e redução do consumo de corrente de pico são, portanto, vantagens claras no uso desse equipamento.

Embora cada fabricante tenha sua própria característica de interface em seus equipamentos, no geral seguem a mesma metodologia: podem ser operados localmente em uma interface acoplada, ou receber comandos remotos via bornes de controle. No mercado, há modelos com mais funcionalidades, outros com menos, dependendo do objetivo da aplicação. No entanto, praticamente todos os modelos possuem as interfaces apresentadas no Quadro 1, que realizam funções básicas, como partir e parar motor, ajuste de velocidade e sinalização via relé de sinais configuráveis, como

falhas, limite de corrente atingido, entre outros. Um exemplo de inversor de frequência pode ser observado na Figura 5.

Quadro 1 – Principais interfaces de controle de um inversor de frequência.

Interface	Característica	Tipo	Descrição
Comando partir	Entrada	Digital GND	Comando para partir motor.
Comando parar	Entrada	Digital GND	Comando para parar motor.
Referência de velocidade	Entrada	Analógico 0-10V	<i>Setpoint</i> de velocidade desejado.
Saída a relé	Saída	Digital 0/24/220V	Saída digital configurável.

Fonte: autor.

Figura 5 – Inversor de frequência modelo CFW11, fabricante WEG.



Fonte: WEG (2023).

2.3 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

O controlador lógico programável (CLP) é um equipamento amplamente utilizado no controle de processos industriais. Os primeiros controladores lógicos programáveis foram desenvolvidos como uma solução para substituir grandes bancos de relés e temporizadores com fio. Na época (anos 60), o uso de relés e temporizadores para aplicações que agora são controladas por CLPs representava inúmeros desafios. A maioria desses desafios surgiu da necessidade de usar vários relés para controlar apenas uma máquina, que ocupava muito espaço. Além disso, os relés precisavam ser conectados em uma ordem específica para que a máquina funcionasse corretamente.

Se apenas um relé falhasse, todo o sistema pararia de funcionar e a solução de problemas poderia, às vezes, levar horas para ser concluída. Também, a implementação de mudanças representava outro conjunto de desafios, pois muitas vezes exigia a reconfiguração de todo o sistema (PROCESS SOLUTIONS, 2020). Frente a isso, os CLPs foram criados e se consolidaram devido à versatilidade, ao tamanho reduzido, e à fácil alteração de lógicas, quando comparada à lógica executada por relés.

Tradicionalmente, os CLPs são dispositivos que são implantados para gerenciar a operação de máquinas e processos, principalmente no contexto industrial (INTEL, 2020). Esses dispositivos são projetados de modo a suportar ambientes hostis, e são programados de acordo com a necessidade da máquina ou processo no qual estão inseridos e objetivam controlar.

A interface do equipamento com sensores e atuadores se dá com entradas e saídas analógicas e digitais e também por protocolos de comunicação. Essas interfaces podem ser integradas ou modulares e expandidas de acordo com o projeto.

Geralmente, os CLPs são fabricados para que sejam posteriormente programados através de um *software* de programação. A lógica de programação é desenvolvida e alterada conforme a necessidade. O programa desenvolvido é baixado para a memória do controlador, e em execução, o equipamento faz a varredura de entradas de sinais, executa as lógicas e altera as saídas desejadas.

De acordo com a norma IEC 61131(IEC, 2003), as linguagens de programação padrão dos controladores programáveis são:

- Diagrama *Ladder* (LD): linguagem que se assemelha aos funcionais elétricos da lógica de relés;
- Diagramas de Blocos Funcionais (FBD): forma gráfica de representação de instruções ou comandos que devem ser executados;
- Texto Estruturado (ST): linguagem de alto nível, baseada em Pascal e "C";
- Gráfico de Funções Sequenciais (SFC): descreve graficamente o comportamento do programa;
- Lista de Instruções (IL): descrita por comandos padronizados que definem as funções que o equipamento irá realizar, semelhante à linguagem *assembly* de microcontroladores.

Após programado e com as interfaces conectadas ao processo, o CLP está apto a operar conforme as lógicas inseridas. Sua operação é cíclica, e pode ser realizada sem uma interface com o operador, em caso de aplicações mais simples. No entanto, na maioria dos processos e máquinas, se faz necessário uma interface homem-máquina para que os operadores, manutentores e demais envolvidos possam

acompanhar as variáveis de processo, realizar interações e modificar parâmetros. Um exemplo de CLP pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – CLP modelo Nexto Express, fabricante Altus.



Fonte: Altus (2020).

2.4 INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

Uma interface homem-máquina (IHM) é uma interface de usuário que conecta uma pessoa a uma máquina, um sistema ou um dispositivo. A IHM é comumente usada no contexto de um processo industrial, embora o termo possa tecnicamente ser aplicado a qualquer tela que permita que um usuário interaja com um dispositivo (AUTOMATION, 2018).

Os requisitos para esse tipo de sistema variam de acordo com a aplicação, mas geralmente são dotadas de *display* que na maioria das vezes implementa algum tipo de funcionalidade de toque, tornando a experiência do operador simples e amigável (GONZALEZ, 2015). Um exemplo de IHM pode ser observado na Figura 7.

Além da minimização do espaço necessário por botões físicos para interação com o operador, a IHM proporciona uma visão geral e facilitada das variáveis da planta ou máquina. Da mesma forma que o CLP, a IHM pode ser programada de acordo com a necessidade, sendo possível a inclusão de botões, gráficos, telas de parâmetros, alarmes e telas de supervisão de acordo com cada particularidade do processo em que está inserida.

Figura 7 – IHM modelo Cmt 2166x, fabricante Weintek.



Fonte: Weintek (2023).

3 DESENVOLVIMENTO

Para tornar possível a proposta de uma solução que cumpra os objetivos, foi necessário o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados empregado em uma extrusora real em campo. Posteriormente, os dados adquiridos foram analisados e utilizados na modelagem do sistema, sendo proposto um esquema de controle para o processo em estudo.

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados, a modelagem do sistema, o sistema de controle proposto, a implementação em um painel de controle, bem como o sistema de supervisão e a instrumentação.

3.1 IDENTIFICAÇÃO E MODELAGEM

Para que seja possível propor um esquema de controle que cumpra os objetivos impostos, é importante a representação da planta através de um modelo matemático. Diante disso, para este trabalho foram escolhidas variáveis presentes no processo a serem medidas e desenvolvido um sistema para aquisição dos dados temporais na máquina extrusora disponível para estudo. As variáveis escolhidas para aquisição podem ser vistas no Quadro 2.

Quadro 2 – Variáveis utilizadas na modelagem.

Variável	Ponto de medição	Tipo	Descrição
Pressão	A montante do filtro de impurezas	Analógica 4-20mA	Pressão do plástico no interior da máquina.
Frequência	Inversor de frequência	Analógica 0-5V	Frequência aplicada ao motor principal.
Ordem de marcha	Inversor de frequência	Digital 24V	Comando partir.

Fonte: autor.

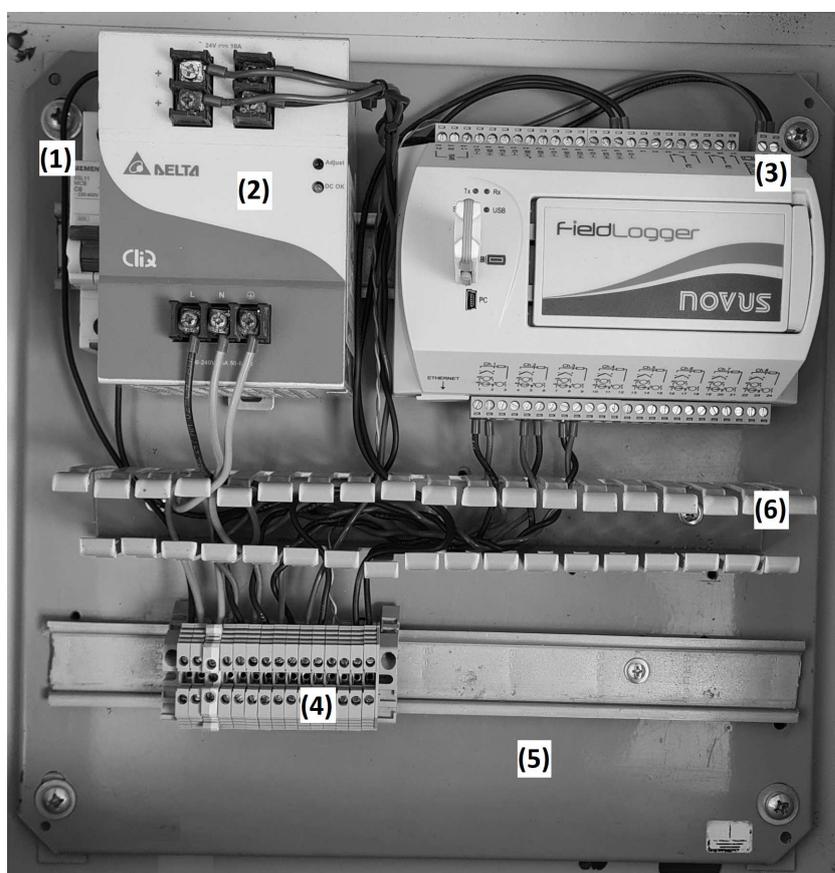
O equipamento utilizado para a aquisição dos dados foi escolhido utilizando os seguintes critérios: equipamento robusto e próprio para ambiente fabril, tolerante à interferências eletromagnéticas e à exposição a ambientes com poeira; adequado para a leitura das variáveis escolhidas, com taxa de amostragem, memória e capacidade de leitura suficientes; e *interface* simples e intuitiva, para fácil operação e diagnóstico em campo. Frente a isso, o registrador de dados da marca Novus, modelo Fieldlogger mostrou-se uma excelente opção, dadas as seguintes características (NOVUS, 2023):

- 8 canais de entrada analógica universais;
- resolução de conversão analógica/digital de 24 bits;

- 8 entradas e saídas digitais configuráveis;
- interface USB para configuração, monitoração e coleta;
- taxas de leitura e registro dos canais de até 1000 μ Hz;
- desenvolvido para operar em ambientes fabris.

O registrador de sinais foi então acoplado pelo autor a uma placa de montagem, juntamente com demais componentes para compor o sistema, como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Sistema de aquisição de sinais.



Fonte: autor.

Os componentes observados na imagem do sistema de aquisição são apresentados no Quadro 3.

Para a obtenção dos dados necessários, o sistema de aquisição foi conectado ao painel de acionamento de uma extrusora já presente em fábrica, e disponibilizada pela empresa para alguns testes. O transdutor de pressão utilizado já estava instalado na máquina, e possui uma faixa de medição de 0 a 700 bar, com o sinal de saída de

Quadro 3 – Principais componentes utilizados para a aquisição dos sinais.

Num.	Componente	Fabricante/Modelo	Função
(1)	Disjuntor de proteção	Siemens/MCB 6A	Proteção do circuito elétrico.
(2)	Fonte de alimentação	Delta/10A 24V	Alimentação do registrador de dados.
(3)	Registrador de dados	Novus/Fieldlogger	Aquisição e armazenamento dos dados.
(4)	Bornes de passagem	Weg/BTWP 2,5 mm	Interface de conexão dos cabos com a planta.
(5)	Placa de montagem	-	Acomodação dos componentes.
(6)	Canaleta com recorte aberto	-	Acomodação dos cabos.

Fonte: autor.

4 - 20 mA. O inversor de frequência também já estava instalado, então utilizou-se os sinais de entrada *setpoint* de frequência e comando partir para compor o registro.

Ao todo, a aquisição dos dados compreendeu aproximadamente 660 minutos, dos quais, aproximadamente, 600 minutos compreendem a máquina em operação. A configuração do registrador de sinais permitiu que os dados só fossem armazenados em caso de comando partir ao inversor, portanto, em toda a aquisição, esse sinal tem valor verdadeiro. A aquisição completa dos dados pode ser observada na Figura 9.

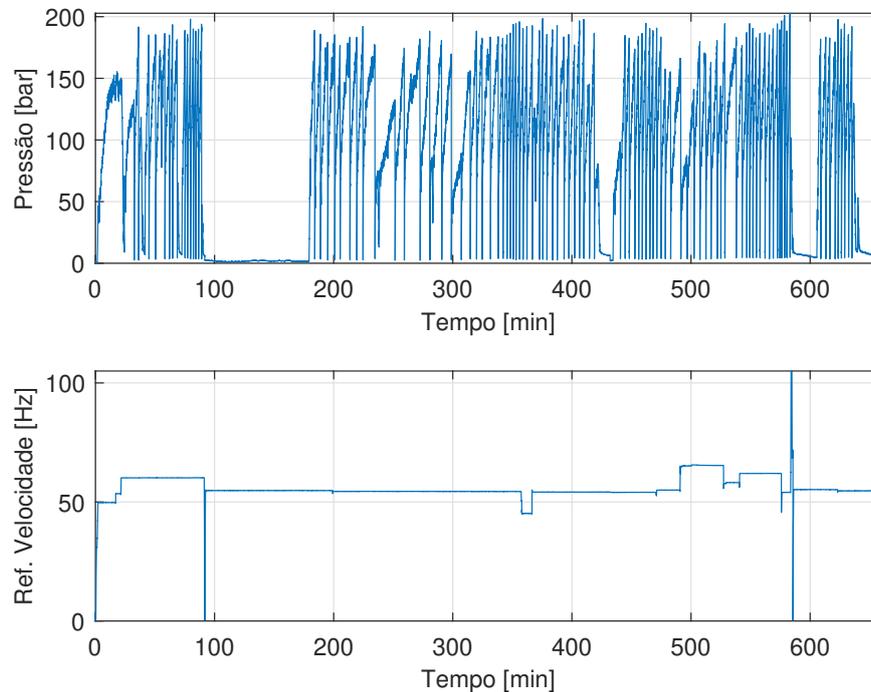
No período em que foram coletados os dados, pode-se considerar que a máquina extrusora processou na maior parte do tempo material com alto grau de impurezas. Isso é evidenciado com a alta frequência na troca de telas (queda abrupta da pressão), em que, pela Figura 10 é possível observar o intervalo entre trocas próximo a 5 minutos.

Não existem normas que definem a nomenclatura do grau de impurezas dos materiais. No entanto, neste estudo, define-se material com alto grau de impurezas quando a troca de telas é necessária em intervalos de tempo menores de 5 minutos, utilizando frequência de saída do inversor em aproximadamente 55 Hz. Para trocas de tela realizadas em períodos de tempo maiores, com as mesmas condições de operação, define-se que o material processado possui baixo grau de impurezas.

É importante destacar que a extrusora utilizada nos estudos atualmente opera com velocidade fixa em praticamente todo o período de trabalho. Seu limite crítico de pressão é estabelecido em aproximadamente 200 bar, sendo o indicador de processos presente na máquina utilizado para sinalizar a necessidade de troca de tela configurado para sinalização em 185 bar.

Com a exposição dos dados obtidos, é possível verificar que a frequência aplicada ao motor possui uma relação integradora com pressão do material no cabeçote

Figura 9 – Aquisição completa dos dados.



Fonte: autor.

da extrusora na faixa de operação segura da máquina. Assim, essa relação pode ser modelada como

$$G_p(s) = \frac{c}{s}, \quad (1)$$

na qual c representa o ganho de pressão em função da velocidade do motor principal.

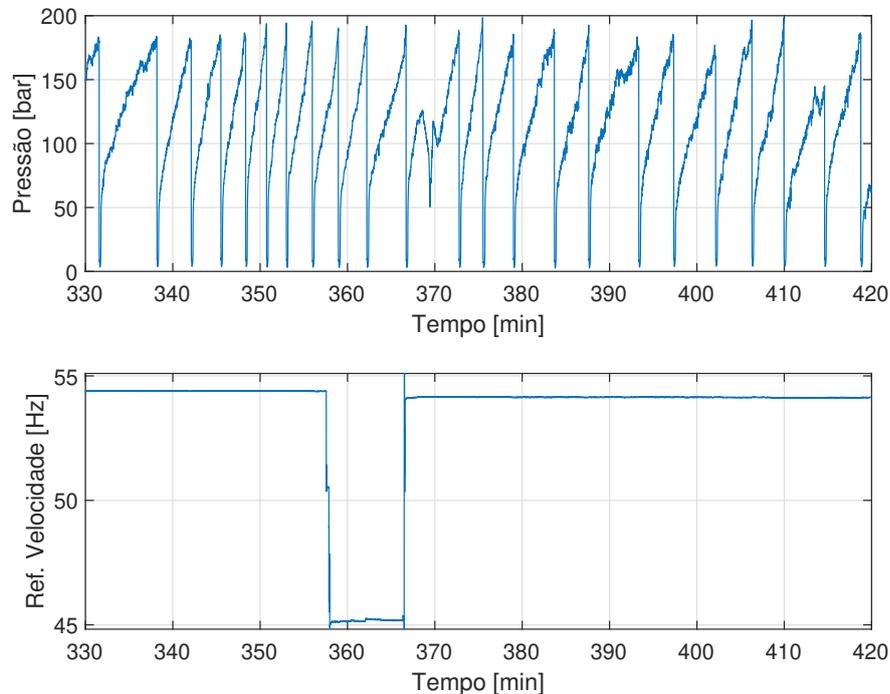
A troca de tela tem efeito praticamente instantâneo na pressão do material. Portanto, a relação entre a pressão e a troca de tela foi modelada como

$$G_t = -b, \quad (2)$$

na qual b representa a magnitude da variação da pressão com a troca da tela. Assim, definiu-se F como um sinal do tipo degrau, que multiplica G_t , representando uma troca de tela. Em malha aberta, a modelagem da planta é representada pelo diagrama da Figura 11.

Como o material a ser processado pela extrusora possui diferentes graus de impureza, c também pode assumir diferentes valores, já que quanto mais impureza no material, mais rapidamente ocorre o aumento da pressão e vice-versa. Para fins de modelagem, proposta de controle e simulações, foram definidos c_a e c_b , que correspondem ao ganho da pressão no processo de material com alto grau de impurezas e

Figura 10 – Ampliação da Figura 9 em período de operação com alto grau de impurezas.



Fonte: autor.

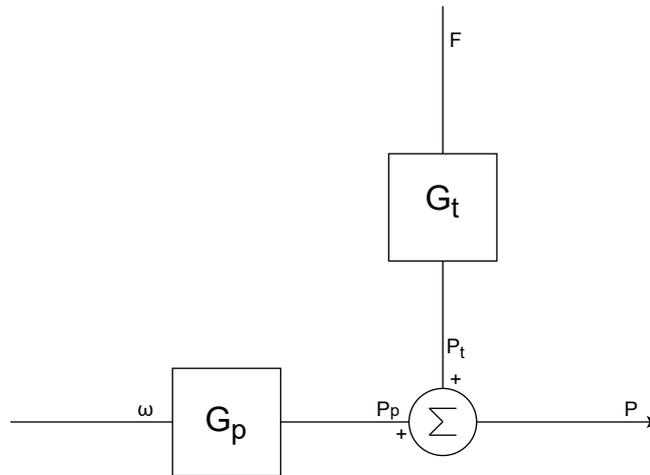
ao ganho da pressão no processo de material com baixo grau de impurezas, respectivamente. Para a modelagem da planta, inicialmente, foi considerado o material com alto grau de impurezas.

Os valores de c foram definidos com base nos dados adquiridos. Inicialmente, c é dado por

$$c = \frac{\Delta P}{\Delta t} \frac{1}{\omega}, \quad (3)$$

em que ΔP é diferença de pressão no intervalo de tempo escolhido, Δt é a duração do intervalo de tempo e ω é a referência de frequência aplicada ao motor principal durante o intervalo. Tomando o caso com o material com maior grau de impurezas, apresentado na Figura 10, c_a foi definido numericamente com os dados da aquisição por volta de 350 minutos. Nessas condições, $\Delta P = 180 - 75$ bar, $\Delta t = 300$ segundos e $\omega = 54$ Hz, logo, $c_a = 0,0065$ bar. Para o caso com baixo grau de impurezas, com a experiência dos operadores da máquina e observações feitas pelo autor anteriormente ao desenvolvimento deste trabalho, tem-se que o tempo entre trocas de tela é comumente de 15 minutos. Portanto, para c_b permanecem $\Delta P = 180 - 75$ bar e $\omega = 54$ Hz, mas o intervalo de tempo aumenta para $\Delta t = 900$ segundos. Assim, numericamente,

Figura 11 – Diagrama de malha aberta.



Fonte: autor.

$c_b = 0,0021$ bar.

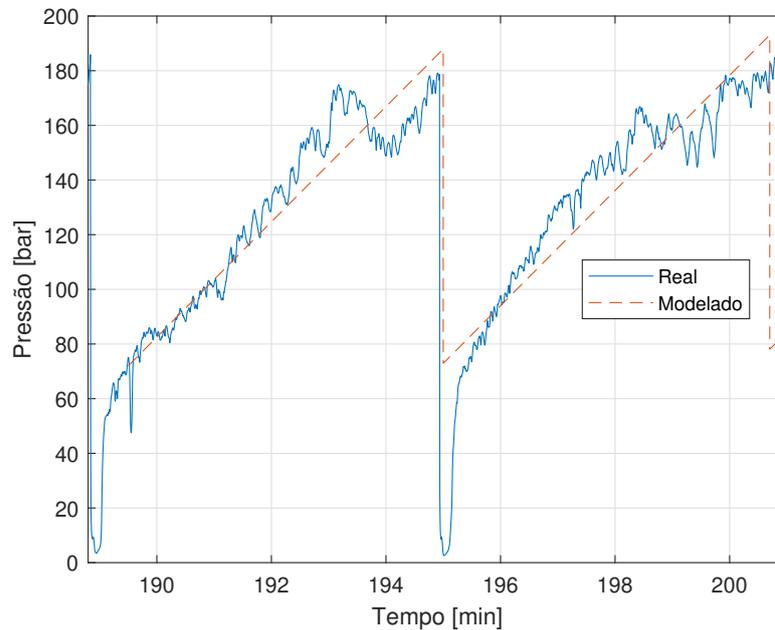
Quando ocorre a troca de tela, observa-se que a pressão cai abruptamente até cerca de 5 bar, e também rapidamente aumenta até 75 bar, quando assume o comportamento integrador modelado pela Equação (1). Sendo assim, b é definido como

$$b = \Delta P_{tt} = 185 - 75 = 110 \text{ bar.} \quad (4)$$

O modelo do sistema, com valores numéricos, foi simulado e comparado com os dados do modelo real. A troca de tela foi simulada com aproximadamente o mesmo tempo entre trocas visto nos dados reais. A simulação se mostrou satisfatória e suficiente para este trabalho, podendo ser observada na Figura 12.

3.2 PROPOSTA DE CONTROLE

Ferreira (2019) afirma que o motor principal deve operar com uma velocidade constante de rotação ao longo do processo, pois variações na velocidade resultam em flutuações no fluxo do polímero, provocando variações na qualidade do produto extrusado. A afirmação é correta para aplicações em que o processo de extrusão é o final, ou seja, em que as extrusoras são utilizadas com um molde após o cabeçote para produção de produto final, como tubos, telhas plásticas, filmes e chapas. No caso em que a extrusora opera na extrusão de reparação, a variação do fluxo de saída não é um problema, pois o material ainda passará por outras etapas de processamento, como co-extrusão e corte, por exemplo. Portanto, para o projeto do controlador, pode-se considerar plausível a variação da velocidade do motor principal sem degradação

Figura 12 – Comparação dados reais e modelo de simulação ($\omega = 54,4\text{Hz}$).

Fonte: autor.

da qualidade do produto processado.

Como a relação G_p possui ação integradora, é possível garantir seguimento de referência constante, rejeição da perturbação causada pela troca de tela e garantir a estabilização da planta com um controlador proporcional, denominado C_p no diagrama apresentado na Figura 13 e escrito na forma

$$C_p = k_p, \quad (5)$$

em que k_p é o ganho proporcional do controlador.

A função de transferência de malha fechada que relaciona a pressão com o sinal de referência é dada por

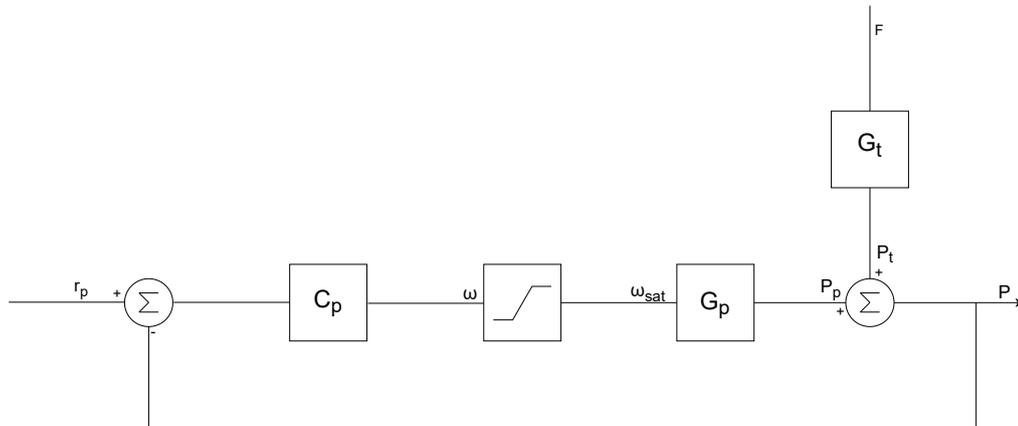
$$H_r(s) = \frac{C_p G_p}{1 + C_p G_p}. \quad (6)$$

Substituindo as equações (1) e (5) em (6):

$$H_r(s) = \frac{k_p \frac{c}{s}}{1 + k_p \frac{c}{s}} = \frac{ck_p}{s + ck_p} = \frac{1}{\frac{1}{ck_p} s + 1}. \quad (7)$$

Para a função de transferência de malha fechada que relaciona a pressão com a troca de tela tem-se:

Figura 13 – Diagrama de malha fechada.



Fonte: autor.

$$H_t(s) = \frac{G_t}{1 + C_p G_p}. \quad (8)$$

Substituindo as equações (2), (1) e (5) em (8):

$$H_t(s) = \frac{-b}{1 + k_p \frac{c}{s}} = \frac{-bs}{s + ck_p}. \quad (9)$$

Considerando uma região de operação em que não ocorra a saturação, a estabilidade do sistema proposto pode ser verificada quando os polos das equações (7) e (9) assumem valores negativos. Para isto, é necessário

$$ck_p > 0, \quad (10)$$

e como c é sempre maior que zero, pois a pressão tende a aumentar ao longo do tempo, então o requisito do controlador é que tenha ganho $k_p > 0$.

Pelo teorema do valor final,

$$H_r(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s H_r R_p = s \frac{1}{\frac{1}{ck_p} s + 1} \frac{1}{s} = 1. \quad (11)$$

Logo, o sistema proposto é capaz de seguir referência do tipo degrau com erro nulo em regime permanente. Para a relação entre a pressão e a troca tela,

$$H_t(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s H_t F = s \frac{-bs}{s + ck_p} \frac{1}{s} = 0, \quad (12)$$

confirmando, portanto, a rejeição do efeito da troca de tela na pressão em regime permanente.

Neste contexto, se r_p for parametrizado como o limite crítico de pressão da máquina, o controle irá diminuir a velocidade do motor principal à medida que a pressão

se aproxima do limite máximo. Isso é evidenciado pela função de transferência que relaciona o sinal de controle com a referência, dada por

$$H_U(s) = \frac{C_p}{1 + C_p G_p}, \quad (13)$$

que pode ser reescrita como

$$H_U(s) = \frac{k_p}{1 + k_p \frac{c}{s}} = \frac{k_p s}{s + ck_p}. \quad (14)$$

Se aplicado o teorema do valor final na equação (14) tem-se que

$$H_U(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s H_U R_p = s \frac{k_p s}{s + ck_p} \frac{1}{s} = 0, \quad (15)$$

ou seja, o sinal de controle tende a zero à medida que a pressão se aproxima da referência. Por questões de segurança, esse comportamento é bastante satisfatório.

Para que não haja perda de produção por velocidade de operação muito baixa, propõe-se que o sinal da sirene seja ativado a partir de um nível de velocidade parametrizável. Assim, se a pressão estiver alta e a velocidade do motor principal abaixo de um certo nível, é sinalizada a necessidade da troca da tela.

A saturação do sinal de controle é definida pela parametrização do inversor de frequência da planta. Normalmente, a máquina extrusora possui limites mecânicos para operação, ou seja, o inversor é parametrizado para respeitar a velocidade máxima da rosca. Esse limite pode ser definido pelo fabricante da máquina, ou por condições específicas. Em simulações, foi considerado limite superior de velocidade de 100 Hz e inferior de 0 Hz.

O ganho do controlador proporcional é inicialmente definido e analisado por meio de simulações. Contudo, é necessário considerar os seguintes critérios do controlador:

- a pressão não deve apresentar sobressinal, para evitar que o nível crítico seja ultrapassado;
- o tempo entre troca de telas não deve ser inferior a 3 minutos, pois é o tempo mínimo para o operador realizar completamente a limpeza;
- para materiais com baixo grau de impureza o tempo de tela pode ser significativamente reduzido do que em malha aberta, pois a velocidade da máquina aumentaria, o que faria com que a pressão aumentasse a uma taxa de variação maior.

3.3 SIMULAÇÃO

O sistema proposto foi implementado em ambiente de simulação para análise, ajustes e parametrizações. A Figura 14 apresenta uma simulação inicial do sistema, utilizando $c = c_a = 0,0065$ bar. Nesse cenário, a sinalização para troca de tela é ativada quando ocorrem simultaneamente as condições $\omega_{sat} < 40$ Hz e $P > 150$ bar. A condição da velocidade é necessária para que a máquina não permaneça operando com velocidade reduzida, cenário em que a produção é afetada. Já a condição de pressão é considerada para evitar uma sinalização indesejada em momentos em que a máquina está iniciando sua operação, por exemplo, em que a velocidade e a pressão são baixas. É possível observar que a simulação inicial contempla duas situações importantes:

- aos 5,5 minutos da simulação, ocorre a sinalização ao operador que é necessária a troca da tela, porém a troca foi realizada efetivamente aos 10 minutos. O sistema proposto foi capaz de diminuir a velocidade evitando exceder a pressão crítica até que a troca fosse efetivada, quando volta a acelerar o motor principal. Essa característica não é observada nas soluções atuais das indústrias;
- o ganho k_p foi ajustado via simulação para que a sinalização da troca de tela ocorra em intervalos de no mínimo 3 minutos, já que sinalizações mais rápidas são indesejadas.

Quanto ao aspecto de produção, Innova (2019) mostra que a equação simplificada do fluxo volumétrico [cm^3/s] de saída é dada por

$$Q = Q_a - Q_p, \quad (16)$$

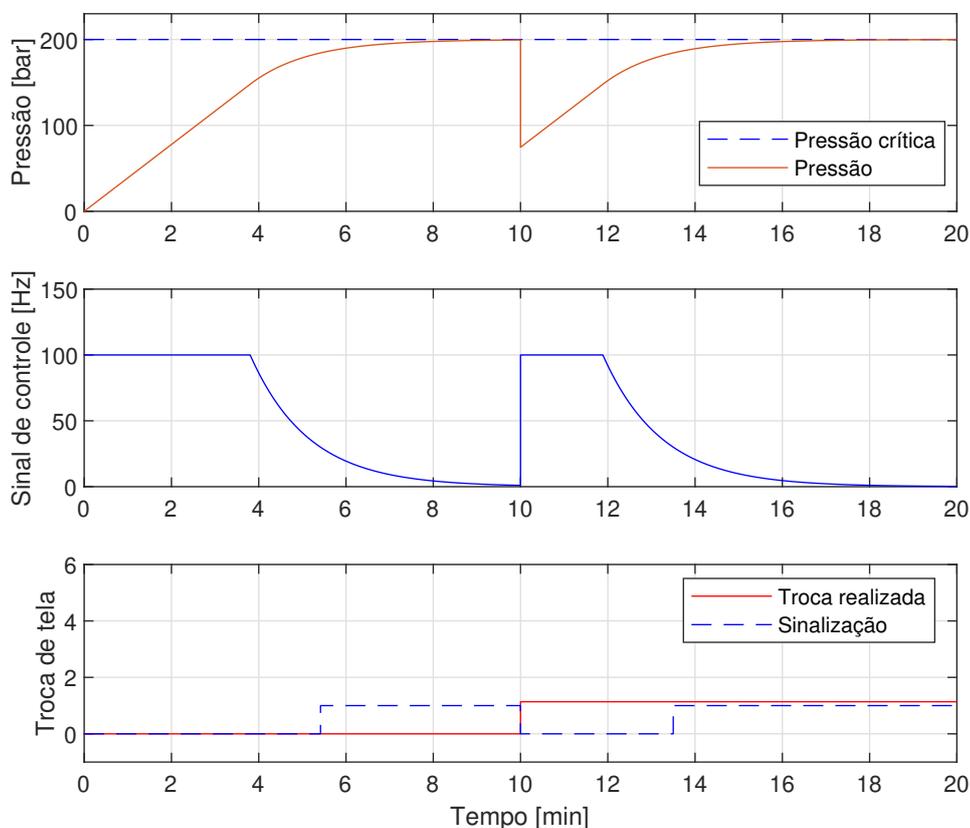
em que Q é a produção em unidades volumétricas, Q_a é o fluxo de avanço e Q_p é o fluxo de pressão. O fluxo de avanço é equivalente ao volume de material que a máquina pode processar com o cabeçote sem filtro de impurezas. Já o fluxo de pressão é modelado como parte do material que flui em sentido contrário ao fluxo de avanço, dada a restrição imposta pelo filtro de impurezas. Portanto, com variáveis conhecidas, o mesmo autor traz a equação (16) reescrita na forma

$$Q = \frac{AN - B\Delta P_p}{\mu}, \quad (17)$$

em que A e B são constantes que dependem exclusivamente da geometria da rosca, N é a velocidade da rosca, ΔP_p é a diferença de pressão do material em dois pontos da zona de plastificação, e μ é a viscosidade do polímero.

Considerando ΔP_p e μ constantes, pode-se estimar a variação da produção entre o novo sistema proposto e a solução atual da indústria que mantém a velocidade

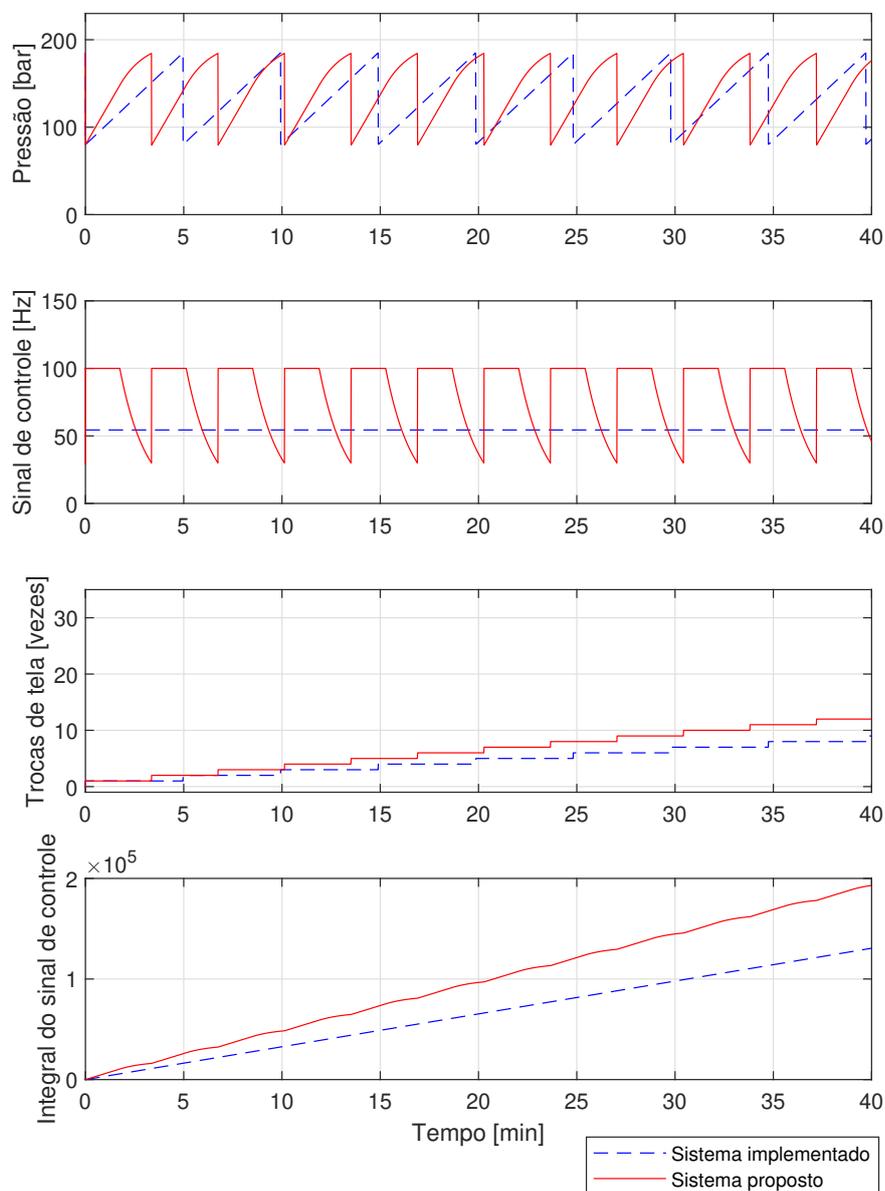
Figura 14 – Simulação inicial.



Fonte: autor.

do motor principal fixa. Essa estimativa foi levantada utilizando a integral do sinal de controle aplicado ao motor principal. Assim, quanto maior o tempo em que a máquina opera com velocidade elevada, maior é o resultado da integral, indicando aumento do fluxo de avanço. A Figura 15 mostra a simulação com os mesmos parâmetros utilizados na simulação da Figura 14, porém com a troca de tela sendo efetivada no momento da sinalização e incluída a comparação com o sistema de controle com velocidade fixa. O comportamento do sistema mostrou-se satisfatório, houve um aumento da frequência de trocas de tela, o que não é um problema, desde que o intervalo entre trocas não seja inferior a 3 minutos. A integral do sinal de controle na estratégia de controle de pressão proposta é maior durante toda a simulação e a magnitude da diferença desse sinal entre os dois modelos tende a aumentar ao longo do tempo, indicando um aumento expressivo da produção, principalmente durante longos períodos de operação. Outro ponto a destacar é que a variação no sinal de controle também não é um problema mecanicamente, pois o acionamento é via inversor de frequência, capaz de controlar a frequência sem danos ao motor.

Figura 15 – Comparação entre o sistema proposto pelo autor e a solução implementada de velocidade fixa.



Fonte: autor.

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

Diante dos promissores cenários observados em simulação, foi desenvolvido um painel elétrico de controle a ser acoplado no painel elétrico já em operação na extrusora disponibilizada. A definição dos componentes foi baseada não somente nas necessidades específicas da empresa parceira, mas também na possibilidade de fácil

expansão para suprir mais demandas em caso de necessidade, ou até mesmo agregar todo o gerenciamento da máquina, como controle de temperatura e intertravamentos, por exemplo.

Definiu-se que o sistema de controle proposto fosse implementado em um controlador lógico programável, já que é um equipamento próprio para aplicações industriais e dadas suas inúmeras vantagens frente a outras soluções, e ao cenário deste trabalho. Após a análise de diversas alternativas de mercado, o autor optou pela implementação das lógicas e do sistema de controle em um CLP modelo Nexto Express XP325, da fabricante brasileira Altus. São várias as razões que justificam a escolha, sendo as principais:

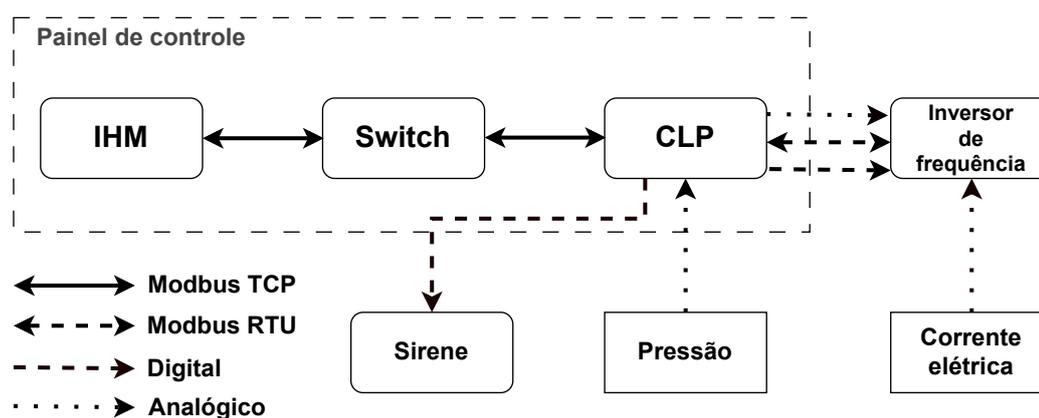
- seu ambiente de desenvolvimento é baseado em CODESYS, bastante sólido no mercado, com diversas bibliotecas e recursos disponíveis;
- possui porta ethernet, canal serial padrão RS-485, porta CAN e interface USB, ofertando diversas possibilidades de comunicação e expansão futura;
- possui suporte a diversos protocolos de comunicação, como Modbus TCP e RTU, PROFINET, CANopen, IEC 60870-5-104, EtherNet/IP, OPC DA, OPC UA e MQTT;
- possui entrada analógica, utilizada para leitura do sinal de pressão;
- possui saída analógica, utilizada para envio do sinal de controle ao inversor de frequência;
- conta com entradas e saídas digitais suficientes para o controle do processo;
- familiaridade do autor com equipamentos da fabricante.

Para a interface entre o CLP e o operador, definiu-se que fosse realizada por uma IHM, própria para ambientes industriais, com tamanho adequado para exibição de gráficos e, novamente, com possibilidade de expansão para suportar novas demandas. Entre várias opções de mercado, o autor optou pelo modelo cMT2166x, da fabricante Weintek. As principais razões que justificam a escolha são:

- possui tela *touch-screen* de 15,6 polegadas, ofertando interface amigável e ótimo tamanho de visualização;
- possui porta *ethernet*, com suporte a diversos protocolos, entre eles Modbus TCP utilizado para a comunicação com o CLP;
- preço competitivo frente aos demais modelos semelhantes no mercado.

Para que seja possível a conexão de um computador para depuração das lógicas e atualizações no CLP e IHM, optou-se por utilizar um *switch ethernet* não gerenciável, permitindo a conexão entre o computador, o CLP e a IHM simultaneamente. O equipamento utilizado foi um modelo Stratix 2000, da fabricante Allen-Bradley, sendo a opção por esse modelo feita em virtude de o autor já possuir uma unidade disponível para uso. Assim, a instrumentação proposta é representada pelo diagrama da Figura 16.

Figura 16 – Diagrama do sistema de controle.



Fonte: autor.

A opção por estabelecer a comunicação via protocolo de comunicação entre o CLP e o inversor de frequência é interessante pois permite a leitura e escrita de diversos parâmetros do inversor, além da monitoração da corrente elétrica, da tensão e da frequência aplicada e de falhas ativas. A representação do diagrama foi feita utilizando Modbus RTU, por ser o protocolo de comunicação incorporado de fábrica na maioria dos inversores de frequência. No entanto, a comunicação pode ser feita via outros protocolos.

Através de observações feitas em campo pelo autor, foi constatado que grande parte dos painéis/quadros elétricos do tipo armário utilizados atualmente nas empresas do ramo possuem medidas de 1900 mm de altura, 800 mm de largura e 600 mm de profundidade. Por esse motivo, as medidas utilizadas no painel de controle deste trabalho seguem o observado em campo, permitindo o acoplamento lateral, caso necessário, entre painéis existentes e a solução proposta. O painel utilizado para acomodar os componentes é próprio para essa finalidade, possui uma placa onde são fixados os componentes internos e geralmente os componentes que fazem interface com o operador são fixados na porta.

Após a definição dos componentes, o autor montou o painel de controle com a inclusão e instalação dos componentes, sendo observada a disposição dos equipamentos na Figura 17. É importante destacar que alguns cuidados foram tomados:

- utilização de relés acopladores nas saídas e entradas digitais;
- utilização de disjuntor de proteção do circuito elétrico;
- utilização de fonte de alimentação adequada;
- utilização de bornes de passagem para sinais externos;
- utilização de canaletas para acomodação dos cabos.

Figura 17 – Registro da vista interna do painel de controle.



Fonte: autor.

A IHM foi acoplada na porta do painel de controle para a interação com o operador quando instalada em campo. A vista externa do painel foi registrada e pode ser observada na Figura 18.

Figura 18 – Registro da vista externa do painel de controle.



Fonte: autor.

Junto ao CLP, foi acoplada uma memória USB Flash Drive para armazenamento de dados do processo. Essa armazenagem é feita através da programação desenvolvida no equipamento, sendo as variáveis escolhidas pelo programador. O Quadro 4 apresenta as variáveis armazenadas, o tipo de cada uma e uma breve descrição.

3.5 IMPLEMENTAÇÃO

A empresa de reciclagem de plásticos parceira disponibilizou uma máquina extrusora para testes e verificação do sistema proposto. A extrusora disponibilizada possui como principais características o motor principal com potência de 125 cv, e o trocador de tela hidráulico, que podem ser observados pela Figura 19. Quanto à sinalização para a troca da tela, ocorre através de dois métodos via sirene que operam simultaneamente:

Quadro 4 – Variáveis armazenadas pelo CLP.

Variável	Tipo	Descrição
Data	<i>Date</i>	Data do registro.
Hora	<i>Hour</i>	Hora do registro. .
Pressão	Analógico	Pressão medida.
Limite Crítico	Analógico	Limite crítico (<i>setpoint</i>).
Frequência	Analógico	Sinal de controle.
Máxima frequência	Analógico	máxima frequência de saída.
k_p	Analógico	ganho proporcional de controle.
Velocidade de sinalização	Analógico	Velocidade para sinalização da necessidade da troca de tela.
Comando	Digital	Comando partir ao inversor.
Sinalização	Digital	Sinalização para troca de tela.

Fonte: autor.

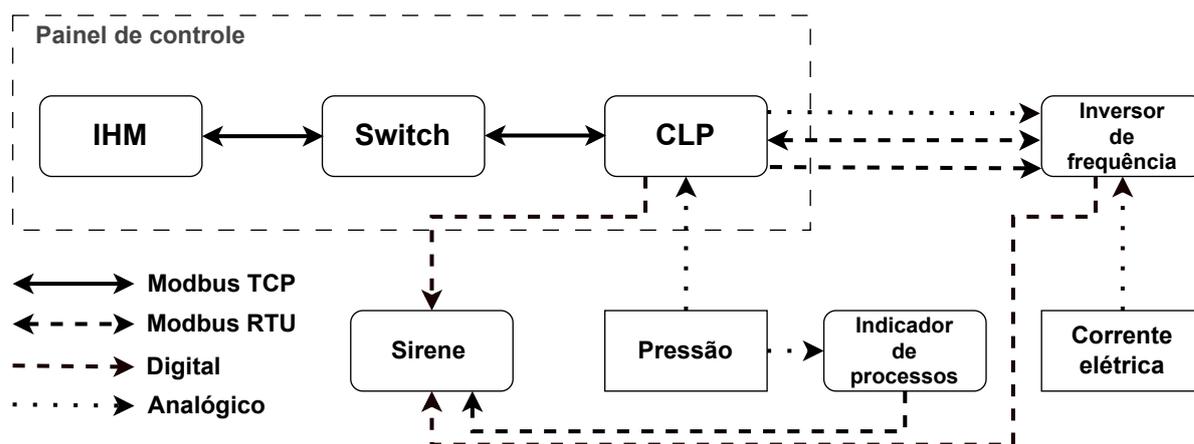
- relacionado a corrente elétrica do motor principal: o inversor de frequência possui uma saída digital programada para nível de corrente atingido, assim, quando o motor principal entrega uma potência acima do nível estabelecido a sirene é acionada;
- relacionado a alta pressão: um indicador de processos com duas saídas a relé executa a sinalização e/ou desarme do inversor de frequência, de acordo com o nível da pressão, medido através de um transdutor de pressão.



Figura 19 – Registros do motor principal e do trocador de tela da máquina extrusora utilizada em testes.

A máquina disponibilizada é a única extrusora recuperadora da empresa, por tanto foi necessário realizar testes conservadores e rápido acoplamento de sinais entre painéis, para que a produção não fosse significativamente afetada. Por segurança, durante os testes do novo sistema proposto, todos os métodos de sinalização foram mantidos, resultando no esquema de sinalização e controle presente na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama do sistema de controle proposto em operação paralela ao sistema atual.



Fonte: autor.

O painel montado com o sistema proposto foi então instalado ao atual painel de acionamento da extrusora, conforme registro apresentado pela Figura 21. Para a instalação do painel proposto foi necessária a parada da máquina por alguns minutos, tornando possível a interligação de sinais de ordem de marcha, referência de velocidade, sinalização da sirene, sinal da pressão, entre outros.

3.5.1 Softwares

Para a implementação das lógicas de controle no CLP foi utilizado o *software* MasterTool IEC XE. As linguagens de programação utilizadas foram Texto Estruturado, para definição e atribuição de variáveis de comunicação com a IHM; Diagrama *Ladder*, para lógicas de eventos discretos; e Diagramas de Blocos Funcionais no restante da implementação.

Além do esquema de controle proposto, outras lógicas de operação foram implementadas, entre elas destacam-se as principais:

- modo manual: a frequência de saída é constante e definida pelo operador através da IHM;
- modo automático: o controle é feito de acordo com o esquema de controle proposto;

Figura 21 – Registro do painel de controle em operação ao lado do painel de acionamento existente na empresa.



Fonte: autor.

- falha na leitura do sensor: em caso de falha na leitura do sensor de pressão, o sistema assume modo manual automaticamente;
- assumir: através da IHM, é possível selecionar se a referência enviada ao inversor de frequência é advinda do CLP ou do potenciômetro do painel de acionamento da extrusora.
- simulação: a modelagem da planta foi implementada para testes iniciais diretamente no CLP, sendo possível algumas depurações anteriormente à instalação na planta real.

Para a implementação da interface utilizou-se o *software* EasyBuilder Pro. Foram desenvolvidas telas que permitem uma interface em tempo real com o sistema. A

Figura 22 mostra as telas de operação e *setup*, que permite monitoração e execução de comandos, e ajustes nos parâmetros de controle, respectivamente.

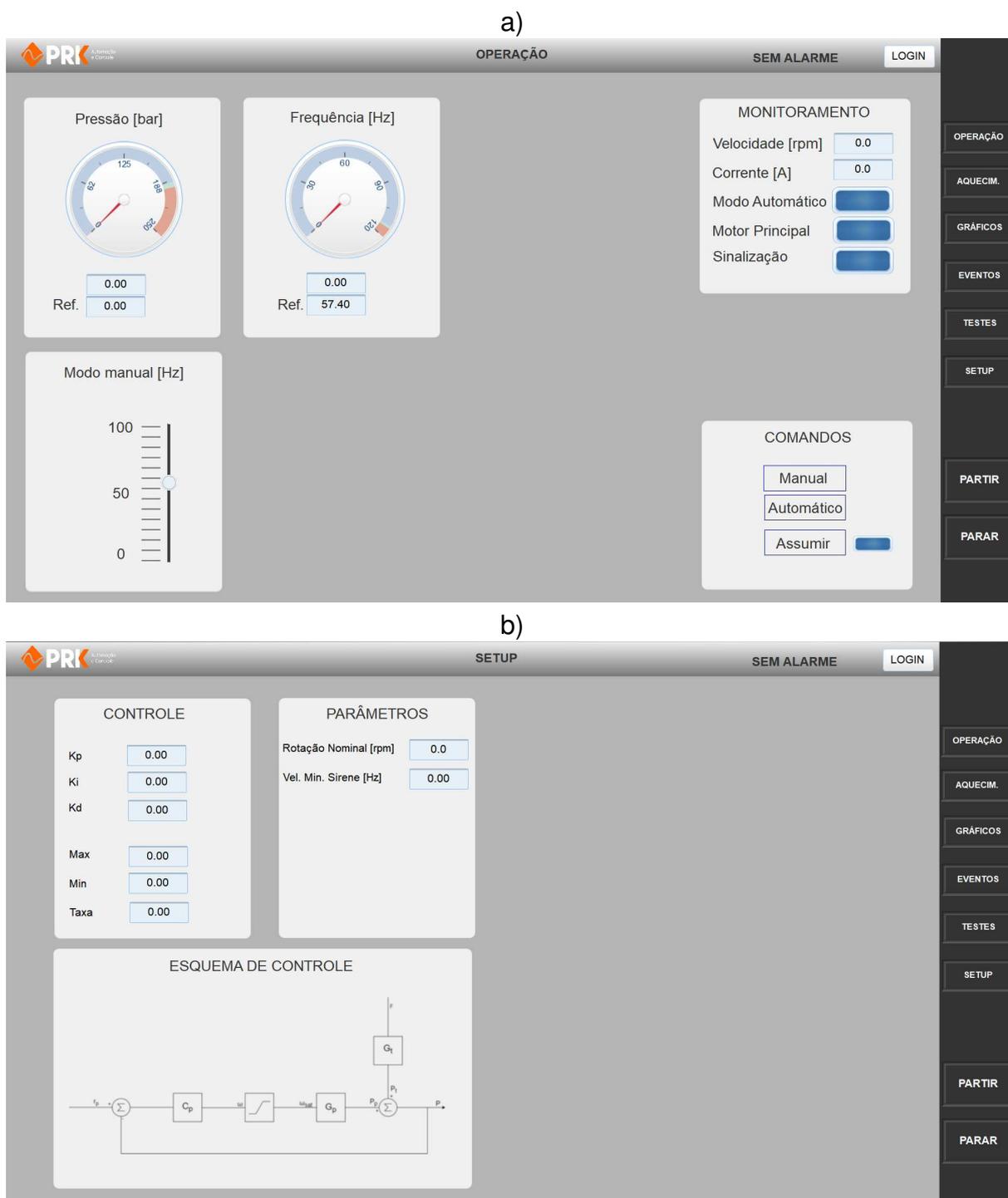


Figura 22 – Registros das telas de operação e *setup* desenvolvidas para testes iniciais.

Para o acompanhamento gráfico dos dados em tempo real foi desenvolvida uma tela de gráficos, que plota simultaneamente as variáveis de pressão, sinal de controle e *setpoint* (pressão crítica). Cada comando e ajuste de parâmetro é liberado para um determinado tipo de usuário. Para isso, foi criada a funcionalidade de *login* na IHM,

com a opção por operador, manutentor ou parametrizador, cada uma com um nível de acesso específico. A Figura 23 mostra as telas de gráficos e *login*.

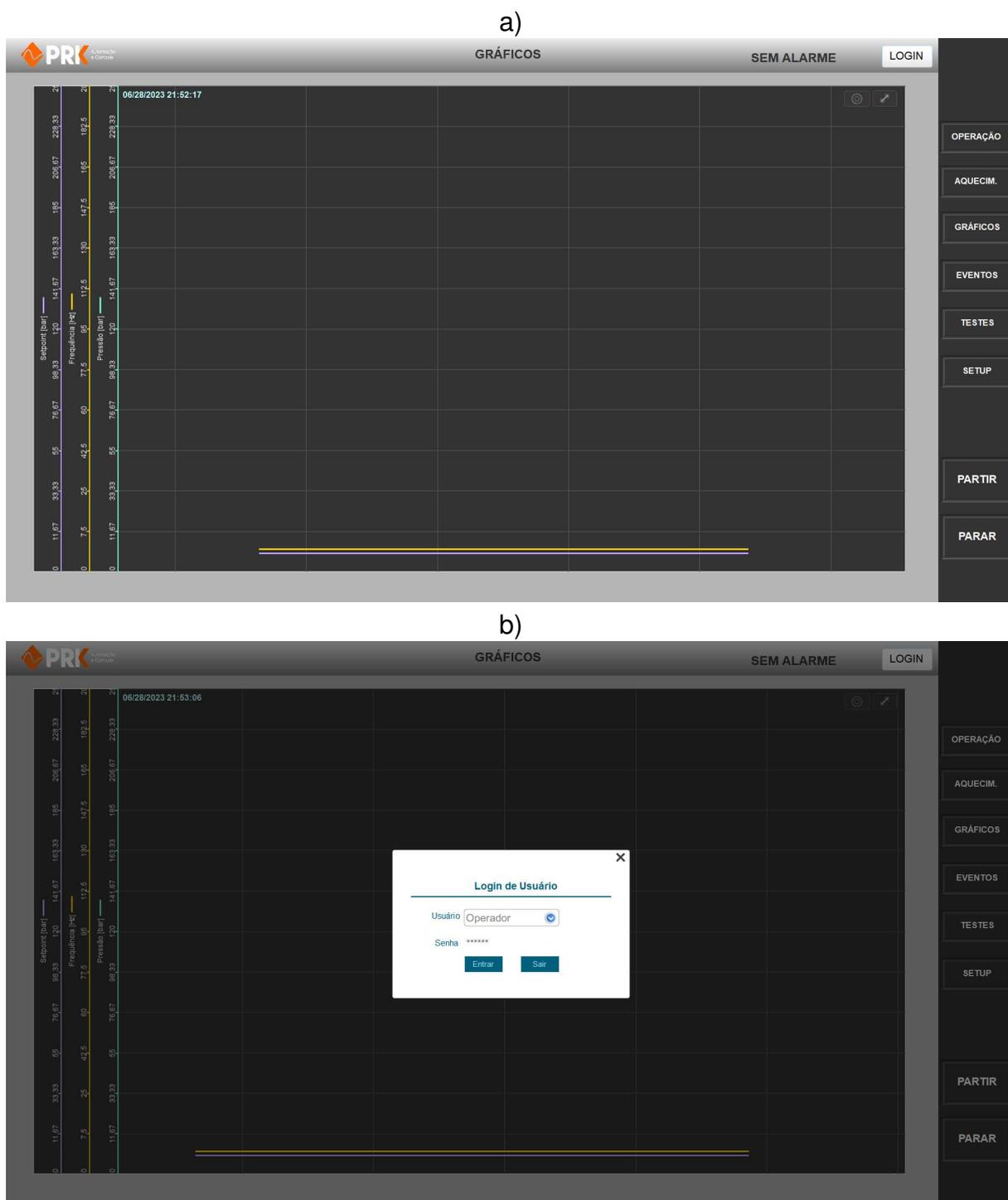


Figura 23 – Registros das telas de gráficos e *login* desenvolvidas para testes iniciais.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os testes realizados na extrusora disponibilizada, empregando o sistema de controle e toda a instrumentação proposta. Também é apresentada uma análise dos dados, os resultados obtidos e necessidades encontradas frente às características variáveis do material processado.

A inicialização dos testes foi feita com a máquina operando completamente pelo painel de acionamento já presente na extrusora. Após a máquina atingir níveis de temperatura aceitáveis e velocidade de processamento comumente utilizada, o painel de controle proposto assume o controle do processo.

4.1 TESTE EXPERIMENTAL 1

O primeiro teste realizado teve duração de aproximadamente 170 minutos, operando com material com baixo grau de impurezas. Durante todo o processo, não houve problemas relacionados à atuação e aos *softwares* de controle e supervisão desenvolvidos. Nesse teste, foram realizadas variações em parâmetros, como o ganho do controlador, a frequência máxima de saída, o nível de operação da sirene e demais configurações, com o objetivo de verificar o funcionamento do sistema em diferentes pontos de operação. Os dados do teste completo podem ser observados na Figura 24.

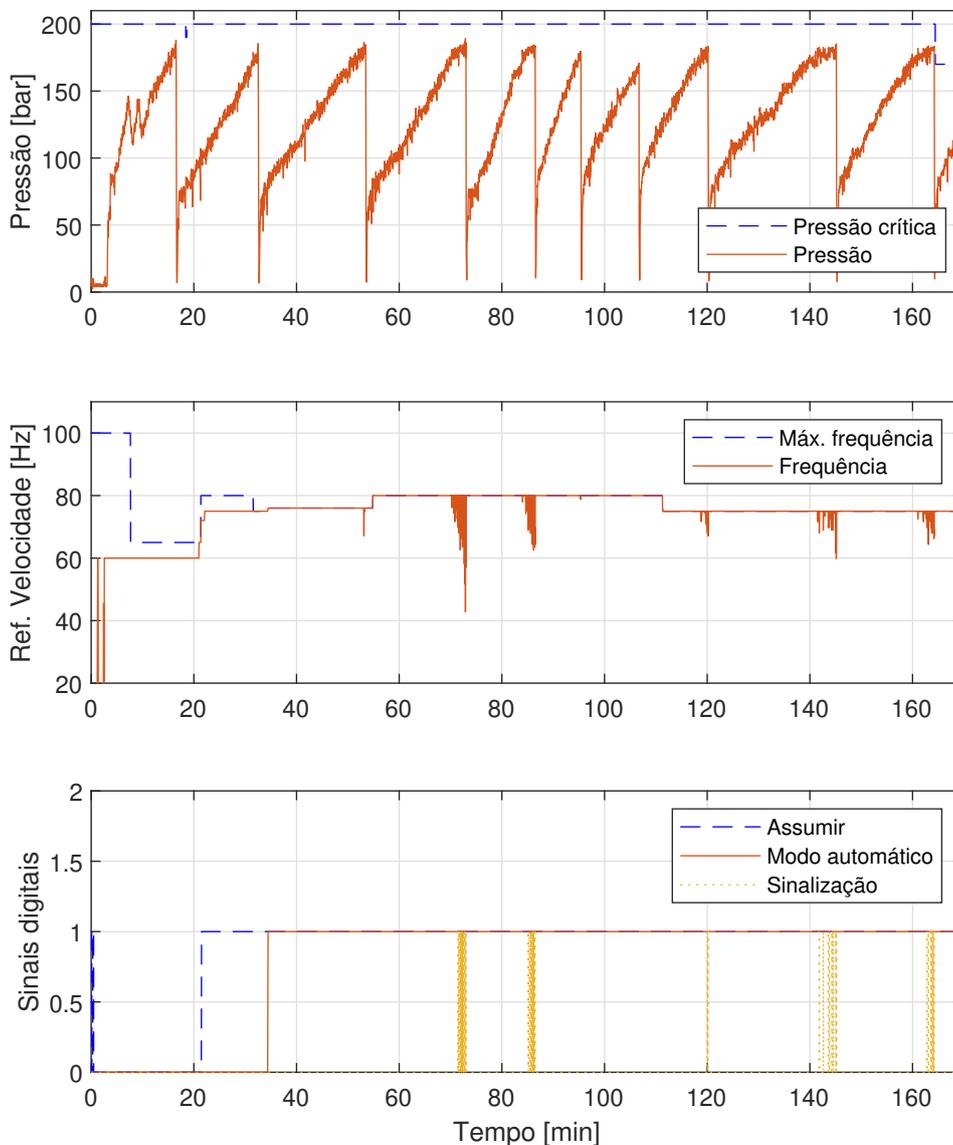
Durante todo o teste com o modo de controle automático ativo, ou seja, com o controle proposto atuando sobre a máquina, o sistema foi capaz de manter a máquina operando em regime seguro, diminuindo a velocidade nos casos em que a pressão se aproxima demasiadamente do nível crítico estabelecido. No entanto, foi identificado que o sinal da pressão apresentou variações de alta frequência durante todo o teste, caracterizando ruídos de medição. Essa característica bastante ruidosa não é desejável, pois, como pode ser observado na Figura 25, o ruído é acentuado pelo ganho k_p e é imposto na ação de controle, fazendo com que a frequência de saída oscile em altas frequências desnecessariamente.

Como a sinalização da sirene pelo CLP foi definida para atuar a partir de um nível mínimo de velocidade, a ação de controle ruidosa faz com que o sinal de sinalização também oscile demasiadamente, comportamento não desejado, pois além de comutar em alta frequência os componentes atuadores da sirene, a sinalização pode ser em virtude de um ruído e não necessariamente indicar a necessidade da troca da tela.

4.2 TESTE EXPERIMENTAL 2

O segundo teste foi realizado um dia após o primeiro, e teve duração de aproximadamente 140 minutos, operando com material com grau de impurezas variante.

Figura 24 – Registro completo de dados do Teste 1.

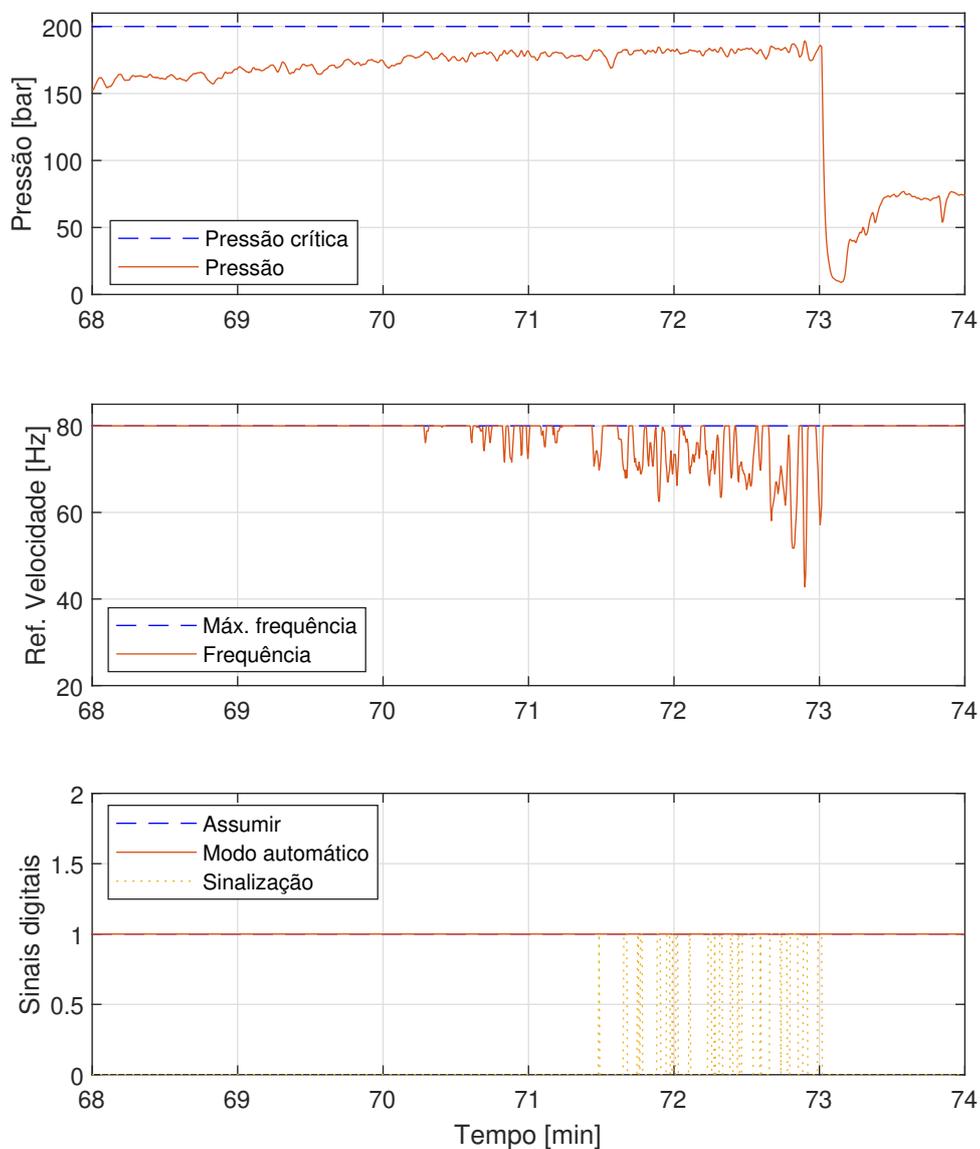


Fonte: autor.

Novamente, durante todo o processo, não houve problemas relacionados à atuação e aos *softwares* de controle e supervisão desenvolvidos. Como no primeiro teste, nesse foram realizadas variações em parâmetros com o objetivo de verificar o funcionamento do sistema em diferentes pontos de operação. Os dados completos do segundo teste podem ser observados na Figura 26.

O sistema proposto começou a operar em modo automático aproximadamente aos 8 minutos do teste. Entre os 30 e 90 minutos de operação, a máquina processou

Figura 25 – Comportamento ruidoso do sinal de controle e da pressão durante o Teste 1.

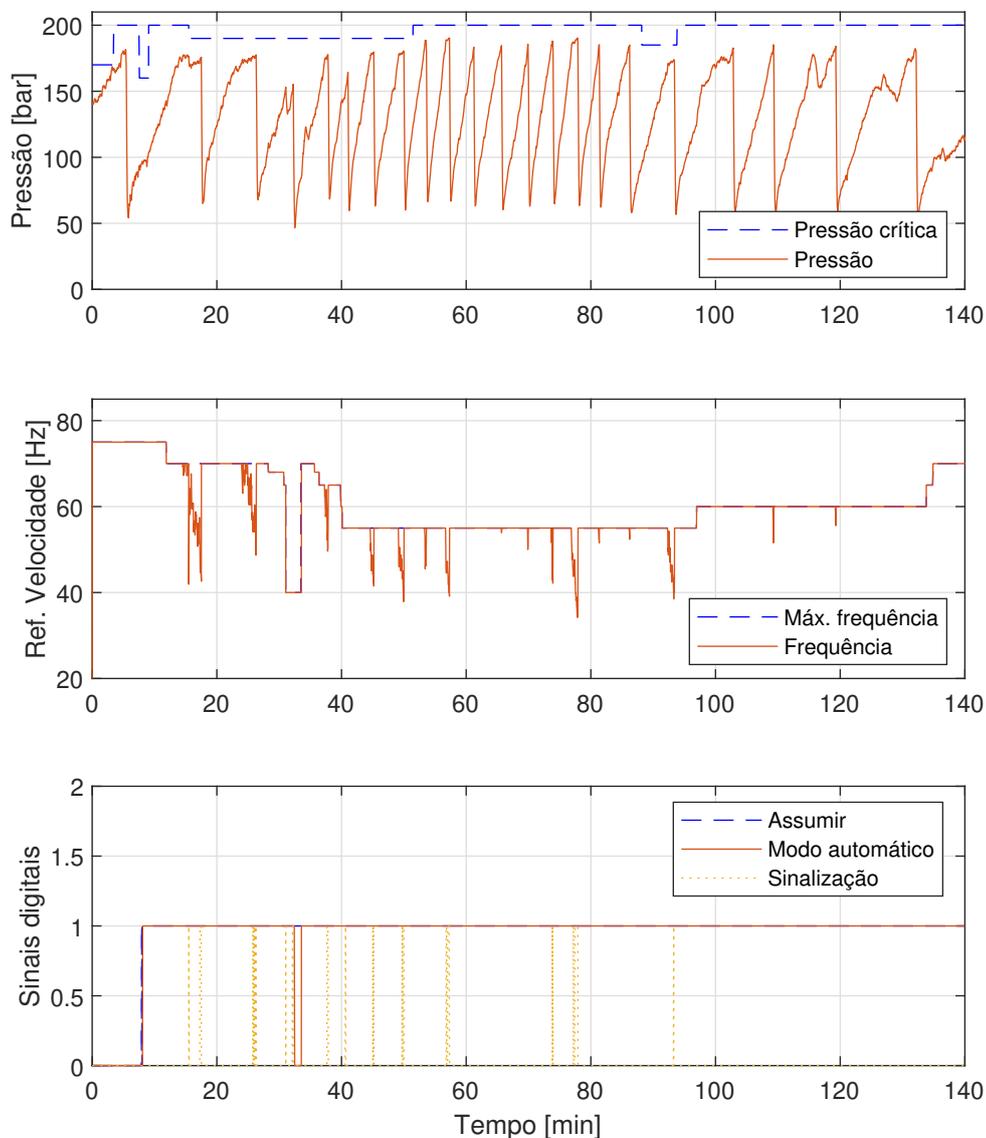


Fonte: autor.

materiais com grau de impurezas mais elevado, se comparado ao restante do teste e ao primeiro teste. Isso ocorreu devido aos operadores incluírem material com alto grau de impurezas no funil da máquina, fazendo com que a tela acumulasse sujidades mais rapidamente.

Nesse teste, a redução do ruído na medição de pressão fica evidente. Isso se deve ao fato de que todas as conexões do cabo entre o transdutor de pressão e o

Figura 26 – Registro completo de dados do Teste 2.



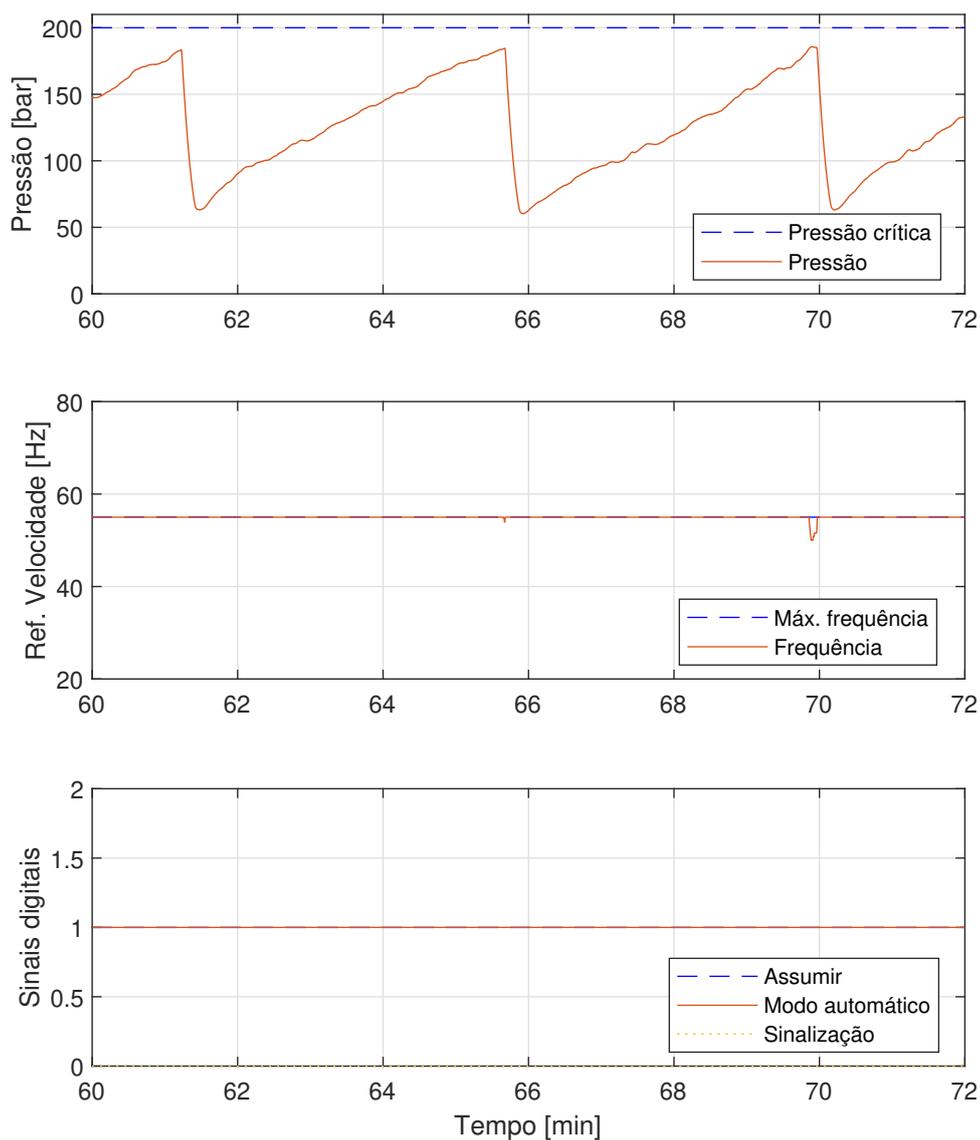
Fonte: autor.

CLP foram reapertadas e verificadas, além da melhoria no aterramento da blindagem do cabo. Também foi implementado um filtro digital na medição analógica através da programação do CLP, recurso disponível na própria ferramenta de ajustes das entradas analógicas.

Como o primeiro teste, esse também foi realizado com as sinalizações da sirene advindas do painel de acionamento, paralelamente à sinalização advindas do CLP. Portanto algumas trocas de tela foram realizadas sem a sinalização do CLP, mas sim

pela sinalização feita pelo painel de acionamento da máquina, como representado pela Figura 27.

Figura 27 – Detalhe de operação do sistema com trocas feitas por indicação externa ao CLP.

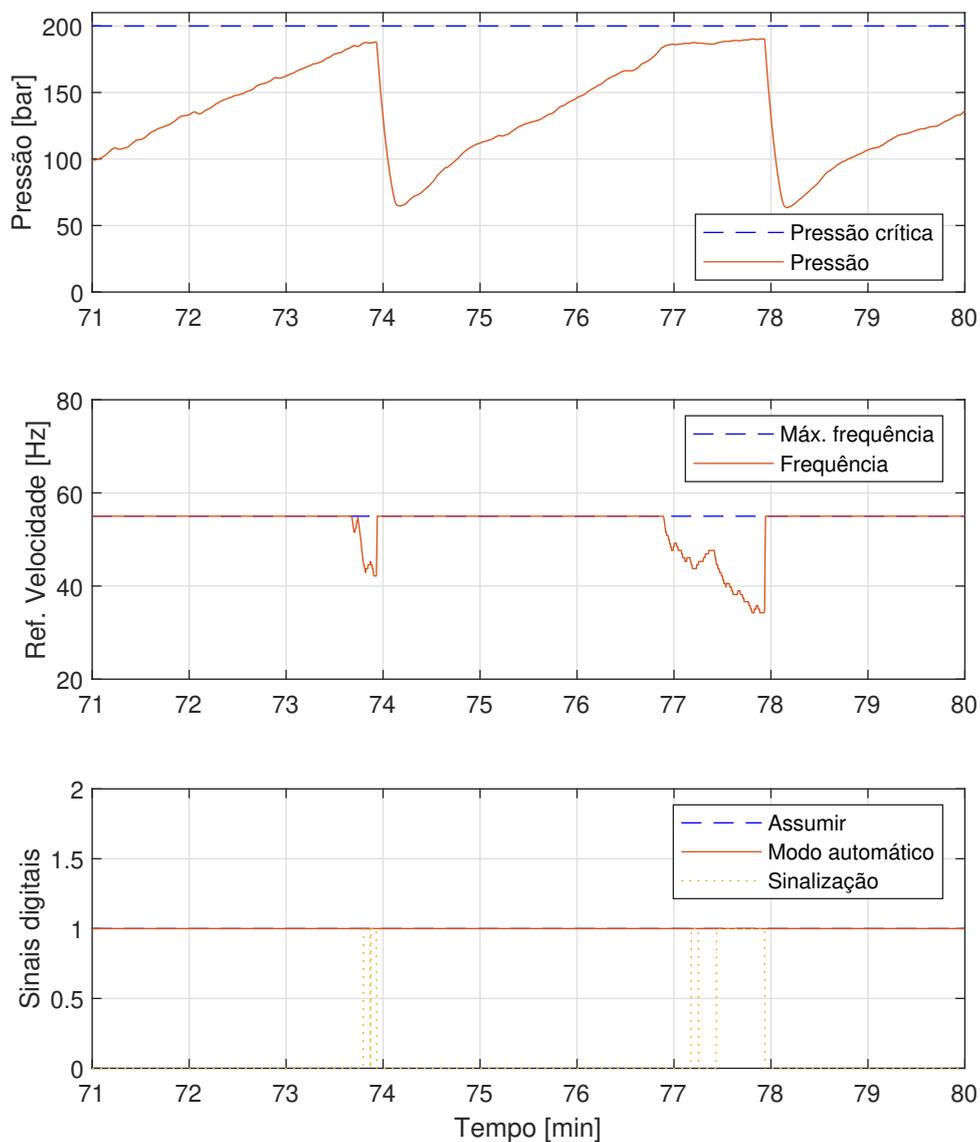


Fonte: autor.

Em situações em que a troca de tela não ocorreu imediatamente após a sinalização, o sistema proposto foi capaz de diminuir a frequência aplicada ao motor de forma bastante satisfatória, sem oscilações prejudiciais, mantendo a operação dentro dos limites seguros de estabelecidos. Esse comportamento ocorreu em vários momentos

do teste, e é evidenciado no período representado pela Figura 28.

Figura 28 – Período de operação do sistema com a troca de tela realizada com atraso.



Fonte: autor.

Nesse teste foi identificado uma característica bastante interessante da planta, não identificada anteriormente. O material, anteriormente ao processo de extrusão, como descrito no Capítulo 1, passa pelo processo de remoção de umidade, elevando sua temperatura. Algumas vezes o material é transportado diretamente ao funil da extrusora, outras vezes, por algum motivo, é armazenado por um certo tempo até a extrusão. Consequentemente, a temperatura do material que entra pela extrusora é

variável, já que o material armazenado por mais tempo tende a ter temperatura menor, requisitando maior potência do motor principal para o processo de plastificação e homogeneização no interior da máquina. Como a demanda por potência do motor é maior, conseqüentemente a corrente elétrica requisitada também é superior. Os dados de corrente elétrica não foram armazenados ao longo dos testes, porém foi possível acompanhar pela IHM do inversor de frequência que, dependendo da temperatura do material, a corrente elétrica aumentava significativamente, ao ponto de que a frequência máxima de saída durante o teste precisou ser reduzida, como aos 25 minutos. Um outro momento em que a frequência máxima de saída precisou ser reduzida, foi por volta dos 36 minutos de teste, em que a pressão do material estava relativamente distante no nível crítico, porém a corrente elétrica estava extrapolando o limite suportado pelo motor, necessitando a redução da frequência máxima, situação representada pela Figura 29.

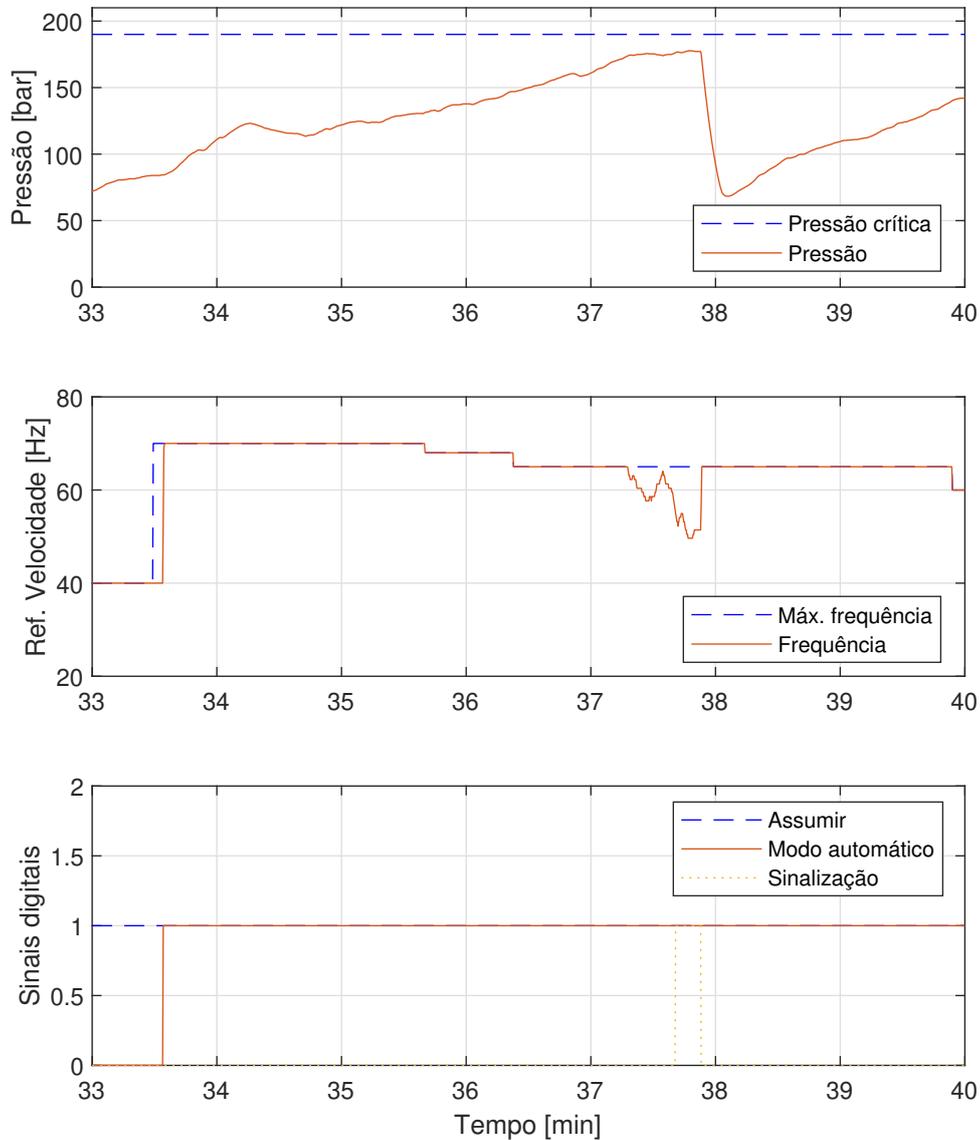
O aumento demasiado da corrente elétrica do motor principal indica dois aspectos importantes da planta. O primeiro é que o motor da máquina está subdimensionado, pois ocorreram situações em que a pressão do material estava relativamente baixa, porém a corrente elétrica do motor estava elevada. O segundo aspecto que deve ser levado em conta é que, para que o sistema proposto continue sendo eficiente em diferentes cenários de operação, com diferentes temperaturas do material inserido na máquina, é interessante que o sinal de controle possua uma parcela relativa à corrente elétrica do motor, já que uma pequena diminuição na velocidade do motor principal reflete em uma significativa redução da corrente elétrica requisitada. Além disso, essa característica mostra que a solução de mercado em que sinaliza a necessidade da troca de tela baseada somente na corrente elétrica do motor é ineficiente, pois não reflete necessariamente em alta pressão do material.

4.3 OBSERVAÇÕES GERAIS

Como observado nos dois testes realizados em campo, o controle proposto é capaz de garantir o nível seguro de operação da máquina, mantendo a pressão em níveis aceitáveis, mesmo com atrasos na troca da tela. Após ajustes na leitura do sinal de pressão, o sistema de controle apresentou o comportamento esperado.

É interessante que o ganho do controlador e a máxima frequência de saída sejam variáveis, de acordo com as variações de operação do sistema. O autor propõe que a frequência máxima pode ser baseada na duração de tempo desejada entre trocas de tela. Já o ganho k_p pode ser definido de acordo com a frequência máxima de saída e com um nível de sinalização de troca de tela. O sinal de controle também deve ter uma parcela relativa à corrente elétrica do motor principal, evitando sobrecorrente. Um esboço da inclusão das novas parcelas do sistema de controle é apresentada na Figura 30.

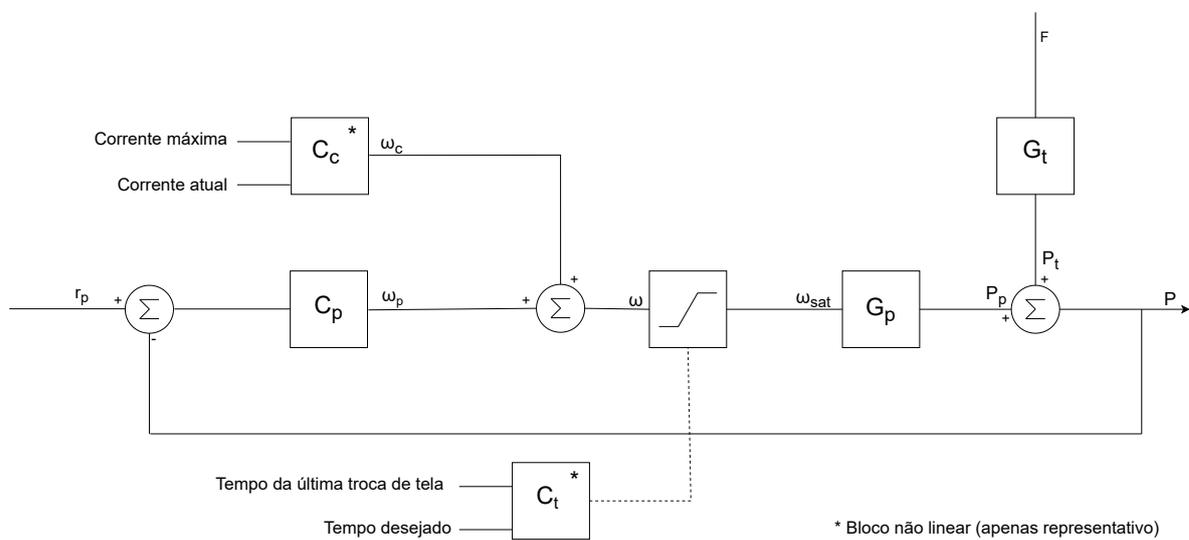
Figura 29 – Detalhe de operação do sistema com variações na frequência máxima de saída.



Fonte: autor.

Com esse sistema parametrizado corretamente, a velocidade da máquina é reduzida quando ocorre aumento expressivo da pressão ou da corrente elétrica do motor. O tempo entre trocas de tela desejado pode ser usado como base para a frequência máxima de saída, pois se o tempo entre trocas está muito elevado, a frequência máxima pode ser elevada. Analogamente, se o tempo entre trocas está inferior ao desejado, a frequência máxima deve ser reduzida.

Figura 30 – Diagrama de malha fechada reformulado após verificações de características variáveis da planta.



Fonte: autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho alcançou os objetivos definidos inicialmente em projetar, implementar e testar um sistema de pressão de máquinas extrusoras recuperadoras de plásticos. A solução proposta mostrou-se robusta e capaz de controlar variáveis importantes no processo de extrusão, embora identificadas características da planta que sugeriram uma adequação do sistema de controle previamente proposto.

A seleção das grandezas envolvidas no controle foi baseada nos métodos já existentes no mercado, bem como nos dados de processo adquiridos, sendo as principais a pressão do plástico a montante do filtro de impurezas da extrusora e a velocidade aplicada ao motor principal. Posteriormente, identificou-se a necessidade da inclusão da corrente elétrica do motor e do tempo desejado entre trocas de tela para que o controlador se torne mais eficiente.

O sistema de aquisição de sinais desenvolvido mostrou-se suficiente e capaz de fazer a aquisição dos dados estabelecidos por aproximadamente 660 minutos, que foram suficientes para a modelagem da planta, utilizada para simulações e análise em malha fechada.

O painel de controle desenvolvido foi capaz de medir as variáveis da planta e controlar a sirene e o inversor de frequência de forma bastante satisfatória, sem erros. Todos os componentes utilizados são comerciais, próprios para ambientes fabris e mostraram-se suficientes para o sistema proposto. Além disso, os equipamentos utilizados foram dimensionados para comportar todo o gerenciamento da máquina, com algumas poucas expansões necessárias.

Todo o sistema desenvolvido foi testado em uma extrusora recuperadora de plásticos em campo. O material utilizado para testes foi do tipo PEBD, sendo que possível expandir o desenvolvimento para outros tipos de materiais. Os testes sugerem que o sistema inicialmente proposto já é capaz de cumprir com os objetivos estabelecidos. Porém, para que o sistema se torne ainda mais eficiente, foi proposta a inclusão de parcelas de controle referentes à corrente elétrica do motor principal e ao tempo desejado entre trocas de tela.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- migração de todo o gerenciamento da máquina extrusora para o painel de controle, de modo a inserir as lógicas de todo o processo na programação do CLP;
- validação através de testes do esquema de controle reformulado;
- aquisição e armazenagem dos dados de corrente elétrica do motor principal, permitindo análises e proposta de controle concisa;
- comparação da produção volumétrica da máquina durante longos períodos entre as atuais soluções do mercado e a solução proposta pelo autor;

- análise do ganho econômico com o ganho de produção do sistema proposto;
- análise do ganho econômico com a inexistência da quebra dos parafusos do cabeçote.

REFERÊNCIAS

ALTUS. **Nexto Express**. [S.l.: s.n.], 2020.

<https://www.altus.com.br/produto/44/clp-nexto-xpress>. Acesso em: 10 jun. 2023.

ALVARO, Julie. **Reciclagem do plástico**. [S.l.: s.n.], 2022.

<https://www.plastico.com.br/reciclagem-do-plastico/>. Acesso em: 8 jun. 2023.

AUTOMATION, Inductive. **What is HMI?** [S.l.: s.n.], 2018.

<https://www.inductiveautomation.com/resources/article/what-is-hmi>. Acesso em: 21 fev. 2023.

BLEMO. **What is a frequency inverter?** [S.l.: s.n.], 2023.

<https://www.blemo.com/en/what-is-a-frequency-inverter/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

CHUNG, Chan I. 2 - Physical Description of Single-Screw Extrusion. *In:*

CHUNG, Chan I. (Ed.). **Extrusion of Polymers (Third Edition)**. Third Edition. [S.l.]: Hanser, 2019. P. 17–61. ISBN 978-1-56990-609-5.

COMENALE, Wagner; WILTGEN, Filipe; ALMEIDA, Luis. LÓGICA NEBULOSA PARA O CONTROLE DE EXTRUSORAS DE PARAFUSO SIMPLES APLICADA AO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PNEUS. **Revista Mundi Engenharia Tecnologia e Gestão (ISSN 2525-4782)**, v. 7, p. 401–423, set. 2022.

FERREIRA, Roberto. **Processo de extrusão**. [S.l.], 2019.

GONZALEZ, Carlos. **What are Human Machine Interfaces and Why Are They Becoming More Important?** [S.l.: s.n.], 2015.

<https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21834387/what-are-human-machine-interfaces-and-why-are-they-becoming-more-important>. Acesso em: 5 jun. 2023.

HOFFMANN, J. C. **Análise de riscos na operação de extrusão em uma usina de reciclagem de plástico**. 2018. F. 49. Monografia (Especialização) – Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão.

INNOVA PETROQUÍMICA. **Manual de extrusão**. Manaus, jun. 2019.

INTEL. **Programmable Logic Controller Overview**. [S.l.: s.n.], 2020.

<https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/robotics/programmable-logic-controllers.html>. Acesso em: 20 fev. 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61131**: Estrutura do software do CLP, linguagens e execução de programas. [S.l.], 2003.

JINXIN. **What is Plastic Extrusion Machine Line - Single Screw Type**. [S.l.: s.n.], 2020. <https://www.jfextruder.com/plastic-extrusion-machine/>. Acesso em: 11 jun. 2023.

NOVUS. **Data Logger Industrial Multicanais FieldLogger**. [S.l.: s.n.], 2023.

Disponível em: <https://https://www.novus.com.br/pt/fieldlogger>.

PALET. **Film recycling production line introduction**. [S.l.: s.n.], 2023. <https://paletrecycling.com/500kg-per-hour-film-recycling-line-in-new-zealand/>. Acesso em: 14 jun. 2023.

PROCESS SOLUTIONS, Inc. **A Brief History of Programmable Logic Controllers (PLCs)**. [S.l.: s.n.], 2020. <https://processsolutions.com/a-brief-history-of-programmable-logic-controllers-plcs/>. Acesso em: 13 jun. 2023.

SCHYNS, Zoé O. G.; SHAVER, Michael P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. **Macromolecular Rapid Communications**, v. 42, n. 3, p. 2000415, 2021.

WEG. **Inversor de Frequência CFW11**. [S.l.: s.n.], 2023.

https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/c/BR_WDC_IA_DRV_IVT. Acesso em: 14 jun. 2023.

WEINTEK. **HMI Cmtx Series**. [S.l.: s.n.], 2023.

https://www.weintek.com/globalw/Product/Product_speccMTX_s.aspx. Acesso em: 11 jun. 2023.