

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DIEGO BALSANTE LOPES**

**AUDITORIA DE MALHAS DE CONTROLE APLICADA A PLANTA DIDÁTICA**  
**SMAR UTILIZANDO A PLATAFORMA EPM**

**SÃO LEOPOLDO**

**2017**

Diego Balsante Lopes

AUDITORIA DE MALHAS DE CONTROLE APLICADA A PLANTA DIDÁTICA SMAR  
UTILIZANDO A PLATAFORMA EPM

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica, pelo Curso de  
Engenharia Elétrica da Universidade do  
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Iván Goytia Mejía

São Leopoldo

2017

À minha querida família, pelo apoio, compreensão e incentivo durante esses  
anos de minha formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter me guiado e me dado forças para concluir esta jornada.

Aos meus queridos pais Mauro e Maria por terem me incentivado a continuar os estudos, me apoiado sempre que necessitei e serem a base para que tudo isso se tornasse possível.

A minha irmã Camila por estar sempre torcendo para meu sucesso.

A minha noiva Fernanda, pelos ótimos momentos que passamos juntos durante esses anos, pela compreensão nos meus momentos de ausência para focar nos estudos e por me incentivar a concluir esta etapa importante de minha vida.

A meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Iván Goytia Mejía por ter me aceitado como orientando, por toda a paciência, alegria, entusiasmo que sempre teve durante as orientações, aulas ministradas e por todos os ensinamentos que levarei sempre comigo.

A minha querida colega e amiga Jenifer Dal Magro pela amizade, companheirismo durante esta longa jornada, por estar sempre disposta a ajudar e compartilhar o seu conhecimento.

Ao Mauricio Posser da Elipse Software por sempre me esclarecer as dúvidas na plataforma e sempre estar disposto a ajudar.

Aos irmãos Délcio e Délio Damin por todo o apoio no início deste trabalho, esclarecendo as minhas dúvidas na plataforma Elipse.

Ao meu amigo Armando Leopoldo por sempre me auxiliar quando necessitei.

A Liess Máquinas e Equipamentos por ter me liberado sempre que precisei para ir à universidade, durante os períodos de estudos e conclusão deste trabalho.

E por fim a meus familiares que mesmo estando longe sempre estiveram na torcida e ansiosos para a conclusão desta etapa muito importante em minha vida.

*"Não desista na primeira dificuldade ou você nunca será um vencedor".*

*Kauan Pinheiro*

## RESUMO

O presente trabalho apresenta a aplicação de algoritmos para análise de desempenho de malhas de controle, são apresentados o fundamento teórico e os resultados da implementação dos indicadores para detecção de oscilações, análise de desempenho por variância mínima, análise de desempenho pela integral dos sinais, para avaliação de desempenho de malhas de controle de uma planta didática SMAR, utilizando o sistema de gerenciamento de plantas industriais EPM para este propósito. Os indicadores foram desenvolvidos em linguagem Python para posteriormente serem adicionados como bibliotecas no EPM de modo a possibilitar a análise dos dados. São estudados uma série de comportamentos de series temporais provenientes de cenários de sintonia de malhas de controle de modo a poder simular as principais situações presentes na indústria. Os resultados revelaram as vantagens e desvantagens de cada um dos métodos estudados.

**Palavras-chave:** Auditoria de malhas de controle, Sistema de gestão de ativos, Elipse EPM, avaliação da sintonia de controladores PID, indicadores de desempenho.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelagem Verbal Processos Industriais .....	16
Figura 2 – a) Grafo e b) Matriz Adjacência do referido Grafo.....	17
Figura 3 – Curva de Resposta ao Degrau .....	20
Figura 4 – Curva de Resposta ao Degrau do Sistema Integrador.....	21
Figura 5 – Princípio do método proposto por Miao e Seborg .....	31
Figura 6 – Princípio do método proposto por Hägglund (1995).....	32
Figura 7 – Imagem Planta Didática SMAR.....	39
Figura 8 – Fluxograma P&ID da Planta Didática .....	40
Figura 9 – Arquitetura Aplicação Elipse EPM.....	42
Figura 10 – Fluxograma operação .....	44
Figura 11 – Diagrama de Blocos Controle Antecipativo .....	49
Figura 12 – Diagrama de Blocos Controle Realimentação.....	49
Figura 13 – Diagrama de Blocos Controle Cascata .....	50
Figura 14 – Diagrama de Blocos Controle Vazão .....	50
Figura 15 – Diagrama de Blocos Controle Nível .....	51
Figura 16 – Grafo Planta Didática Smar.....	51
Figura 17 – Diagrama Blocos Preparação base testes .....	52
Figura 18 – Tela principal supervisório.....	53
Figura 19 – Tela reconhecimento licenças .....	54
Figura 20 – Tela principal supervisório com implementações .....	54
Figura 21 – Tela Sintonia FIC-31 .....	55
Figura 22 – Tela Sintonia LIC-31.....	55
Figura 23 – Tags driver OPC Elipse E3 .....	56
Figura 24 – Tags driver OPC Elipse E3 .....	56
Figura 25 – Resposta da LIC-31, comportamento inapropriado.....	57
Figura 26 – Resposta da LIC-31, comportamento conservativo.....	58
Figura 27 – Resposta da LIC-31, comportamento moderado .....	58
Figura 28 – Resposta da LIC-31, comportamento agressivo .....	59
Figura 29 – Resposta da LIC-31, comportamento oscilatório.....	60
Figura 30 – Resposta da FIC-31, comportamento inapropriado.....	61
Figura 31 – Resposta da FIC-31, comportamento moderado .....	61
Figura 32 – Resposta da FIC-31, comportamento conservativo .....	62

Figura 33 – Resposta da FIC-31, comportamento oscilatório .....	62
Figura 34 – Desempenho da LIC-31, comportamento inapropriado.....	63
Figura 35 – Desempenho da LIC-31, comportamento conservativo .....	64
Figura 36 – Desempenho da LIC-31, comportamento moderado .....	65
Figura 37 – Desempenho da LIC-31, comportamento agressivo .....	65
Figura 38 – Desempenho da LIC-31, comportamento oscilatório. ....	66
Figura 39 – Desempenho da FIC-31, comportamento inapropriado .....	67
Figura 40 – Desempenho da FIC-31, comportamento conservativo .....	67
Figura 41 – Desempenho da FIC-31, comportamento moderado .....	68
Figura 42 – Desempenho da FIC-31, comportamento oscilatório .....	68
Figura 43 – Desempenho da LIC-31, comportamento moderado .....	71
Figura 44 – Desempenho da LIC-31, comportamento conservativo .....	71
Figura 45 – Desempenho da LIC-31, comportamento oscilatório .....	72
Figura 46 – Desempenho da LIC-31, comportamento inapropriado.....	72
Figura 47 – Desempenho da LIC-31, comportamento agressivo .....	73
Figura 48 – Desempenho da FIC-31, comportamento moderado .....	74
Figura 49 – Desempenho da FIC31, comportamento conservativo .....	74
Figura 50 – Desempenho da FIC-31, comportamento oscilatório .....	75
Figura 51 – Desempenho da FIC-31, comportamento inapropriado. ....	75
Figura 52 – Desempenho da LIC-31, comportamento moderado. ....	76
Figura 53 – Desempenho da LIC-31, comportamento conservativo. ....	76
Figura 54 – Desempenho da LIC-31, comportamento oscilatorio .....	77
Figura 55 – Desempenho da LIC-31, comportamento inapropriado.....	77
Figura 56 – Desempenho da LIC-31, comportamento agressivo .....	78
Figura 57 – Desempenho da FIC-31, comportamento moderado .....	79
Figura 58 – Desempenho da FIC-31, comportamento conservativo .....	79
Figura 59 – Desempenho da FIC-31, comportamento oscilatório .....	80
Figura 60 – Desempenho da FIC-31, comportamento inapropriado .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros recomendados para malhas de controle em uma refinaria ..	18
Tabela 2 – Método Sintonia Lambda Sistema Primeira Ordem.....	22
Tabela 3 – Método Sintonia Lambda Sistema Integradores.....	22
Tabela 4 – Softwares comerciais avaliação desempenho.....	33
Tabela 5 – Comparativo das Principais técnicas de detecção de oscilações.....	36
Tabela 6 – Evolução técnicas avaliação desempenho.....	38
Tabela 7 – Envio água tanque Abastecimento.....	46
Tabela 8 – Sintonia malhas de nível.....	60
Tabela 9 – Sintonia malhas de vazão.....	63
Tabela 10 – Indicadores desempenho malha de nível.....	69
Tabela 11 – Indicadores desempenho malha de vazão.....	69
Tabela 12 – Indicadores avaliação sintonia malha de nivel.....	81
Tabela 13 – Indicadores avaliação sintonia malha de vazão.....	81

## LISTA DE SIGLAS

ACF	<i>Autocorrelation Function</i> Função de Auto Correlação
CF	<i>Compression Factor</i> Fator de Compressão
CLP	<i>Programmable Logic Controller</i> Controlador Lógico Programável
CLPA	<i>Control Loop Performance Assessment</i> Análise de Desempenho de Malhas de Controle
DFT	<i>Discrete Fourier transform</i> Transformada Discreta de Fourier
EPM	<i>Ellipse Plant Manager</i> Elipse Plant Manager
IAC	<i>Control Action Index</i> Indicador de Ação de Controle
IAE	<i>Integral of Absolute Error Index</i> Integral do erro absoluto
IEXP	<i>Expertune Index</i> Indicador de Expertune
ISE	<i>Integral of the Squared Error Index</i> Indicador de Erro Quadrático
IEP	<i>Permanent Error Index</i> Indicador de Erro Permanente
ISHUNTA	<i>Indicador de Shunta</i> Shunta Index
SDCD	<i>Distributed Control System</i> Sistema Digital de Controle Distribuído
SQL	<i>Structured Query Language</i> Linguagem de Consulta Estruturada
VARY	<i>Variance Input Signal</i> Variância Sinal Entrada
VARU	<i>Variance Output Signal</i> Variância Sinal de Saída

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Definição do Tema	12
1.2	Delimitações do Trabalho	12
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	Justificativa	13
1.5	Estrutura do Trabalho	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1	Modelagem de Processos	16
2.1.1	Modelagem Verbal	16
2.1.2	Análise Estrutural	17
2.2	Pré-processamento dos Dados	18
2.2.1	Teorema de Amostragem	18
2.2.2	Comprimento dos Dados para Análise	19
2.2.3	Considerações sobre a Qualidade dos Dados	19
2.3	Sintonia de Controladores PID	20
2.4	Avaliação Baseada na Integral dos Sinais	23
2.4.1	Indicador de erro permanente (IEP)	23
2.4.2	Indicador de erro absoluto (IAE)	23
2.4.3	Indicador de erro quadrático (ISE)	24
2.4.4	Indicador de Expertune (IEXP)	24
2.4.5	Indicador de ação de controle (IAC)	25
2.5	Avaliação do Potencial para Aumento de Desempenho	25
2.5.1	Índice de Harris	25
2.5.2	Índice Shunta	27
2.6	Avaliação da Sintonia de Controladores PID	29
2.6.1	Índice Idle modificado	29
2.7	Detecção Automática de Oscilações	30
2.7.1	Índice de Miao e Seborg	31
2.7.2	Método de Hangglund	32
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>33</b>

<b>3.1</b>	<b>Sistemas de Suporte a Decisão para a Indústria</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Técnicas de Detecção de Oscilações</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Técnicas de Avaliação de Desempenho</b> .....	<b>36</b>
<b>4</b>	<b>MÉTODOS E PROCEDIMENTOS</b> .....	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Planta Didática SMAR</b> .....	<b>39</b>
<b>4.2</b>	<b>Software MATLAB/Simulink®</b> .....	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>Linguagem de Programação Python</b> .....	<b>41</b>
<b>4.4</b>	<b>Software de Gestão de Plantas Elipse (EPM)</b> .....	<b>42</b>
4.4.1	Instalação dos softwares.....	43
4.4.2	Arquiteturas do Sistema EPM.....	44
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>45</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelagem e Análise do Processo</b> .....	<b>45</b>
5.1.1	Modelagem Verbal.....	45
5.1.2	Análise Estrutural.....	51
<b>5.2</b>	<b>Cenário para implementação das técnicas</b> .....	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>Sintonia das malhas de controle</b> .....	<b>57</b>
5.3.1	Sintonia da malha de nível LIC-31 .....	57
5.3.2	Sintonia da malha de vazão FIC-31 .....	60
<b>5.4</b>	<b>Avaliação dos indicadores desempenho</b> .....	<b>63</b>
5.4.1	Avaliação da malha de nível LIC-31.....	63
5.4.2	Avaliação da malha de vazão FIC-31 .....	66
<b>5.5</b>	<b>Avaliação da sintonia do controlador PID</b> .....	<b>70</b>
5.5.1	Avaliação da malha de nível LIC-31.....	70
5.5.2	Avaliação da malha de vazão FIC-31 .....	73
<b>5.6</b>	<b>Avaliação da detecção de oscilações</b> .....	<b>76</b>
5.6.1	Avaliação da malha de nível LIC-31.....	76
5.6.2	Avaliação da malha de vazão FIC-31 .....	78
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>83</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusões do Trabalho</b> .....	<b>83</b>
<b>6.2</b>	<b>Possibilidades de Trabalhos Futuros</b> .....	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>86</b>

## **1 Introdução**

A indústria está cada vez mais adquirindo equipamentos e plantas totalmente automatizadas com o objetivo de melhorar a qualidade do produto final, diminuir os custos e deixando as indústrias mais competitivas. O elevado nível de automação muitas vezes torna as plantas complexas e de difícil manutenção, sendo necessária a utilização de ferramentas que auxiliem no processo de implantação e manutenção das malhas de controle.

Estudos mostram que grande parte das falhas apresentadas em malhas de controle estão relacionadas com problemas como má sintonia de controladores, anomalias em equipamentos, alterações no processo produtivo e problemas em válvulas de controle, a maioria desses problemas se apresentam em forma de oscilações nas malhas de controle, muitas vezes essas oscilações demoram a ser detectadas, pois exigem um elevado conhecimento do processo ou até mesmo não podem ser identificadas a olho nu.

Neste trabalho serão estudadas as principais técnicas para detecção de oscilações e avaliação de desempenho. Estas serão implementadas em um sistema historiador de dados de modo a auxiliar neste processo de identificação das malhas que demandam de uma intervenção.

### **1.1 Definição do Tema**

Integração de softwares industriais junto com uma planta didática para o estudo e implementação de técnicas de auditoria de malhas de controle de processos.

### **1.2 Delimitações do Trabalho**

Estruturar e implementar um cenário onde sejam integradas as tecnologias, planta SMAR e softwares (Matlab, Python, Elipse EPM) para desenvolvimento dos algoritmos de avaliação do potencial da melhoria de malhas de controle, avaliação da correta sintonia e detecção de oscilações.

### 1.3 Objetivos

Com base na motivação e o contexto apresentado, este trabalho tem os seguintes objetivos definidos.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo estudar algumas das principais técnicas para auditar malhas de controle e implementar as mesmas na plataforma de gestão de processos industriais Elipse EPM, utilizando como caso de estudo uma planta piloto didática da SMAR.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Em termos específicos pretende-se:

- a) Estudar o funcionamento e operacionalizar a planta didática SMAR para o controle de nível, vazão e temperatura;
- b) Desenvolver uma guia de operação da planta didática SMAR;
- c) Estudar o software de gestão de plantas industriais Elipse EPM;
- d) Estruturar e implementar um cenário onde sejam integradas as tecnologias, planta SMAR e softwares (Matlab, Python, Elipse EPM) para desenvolvimento dos algoritmos de auditoria;
- e) Estudar alguns indicadores estatísticos simples para avaliar o desempenho de malhas de controle, ao menos uma técnica para avaliar o potencial de malhas de controle, ao menos uma técnica para a detecção de oscilações em malhas de controle e uma técnica para avaliar a sintonia de controladores PID;
- f) Implementar as técnicas anteriores em Matlab e Python para logo integrar os algoritmos no Elipse EPM;
- g) Validar os indicadores em diferentes cenários.

### 1.4 Justificativa

A maioria dos processos industriais possui ampla quantidade e variedade de malhas de controle, sendo que estas malhas apresentam comportamento oscilatório com o passar do tempo mesmo que bem ajustadas, devido a variações no processo,

desgaste dos atuadores, falta de manutenção ou até mesmo devido a influência de outras malhas existentes no mesmo processo.

A complexidade dos processos industriais vem aumentando conforme o avanço da tecnologia, em muitos casos avaliar o desempenho de um controlador em uma malha de controle se torna uma tarefa difícil sem o auxílio de uma ferramenta específica para análise de malhas de controle.

Atualmente existem no mercado ferramentas de software ou sistemas de suporte a decisão que integram diversas técnicas para auditar malhas de controle, por exemplo algumas destas são PlantTriage da Metso, ou *Control Performance Monitor* da Honeywell. Estes sistemas funcionam muito bem, no entanto apresentam um elevado custo e tempo de implantação.

A Elipse possui uma ferramenta de software chamada EPM Elipse *Plant Manager* que é historiador e possui integração com os mais diversos sistemas de supervisão presentes no mercado. O EPM possui uma integração com a linguagem Python de modo a possibilitar o desenvolvimento de bibliotecas para análise dos dados armazenados, com o objetivo de auxiliar na gestão de plantas industriais.

Hoje o EPM não possui em sua biblioteca indicadores para análise de desempenho de malhas de controle e a inclusão destes indicadores na biblioteca será de grande utilidade pois possibilitariam que seja realizada a análise das malhas de controle existentes na planta de forma rápida e simples, tanto a nível gerencial quanto de manutenção.

A implementação destes algoritmos irá auxiliar na identificação de problemas em malhas de controle de uma forma mais econômica, tornando essa tecnologia mais acessível para as empresas de pequeno e médio porte.

Hoje existem algumas plantas que rodam com sistema supervisor Elipse E3 e que não possuem nenhum sistema de avaliação de desempenho para as malhas de controle, o fato do EPM ser da mesma plataforma Elipse, irá auxiliar na implantação, sendo este um mercado que pode ser muito explorado atualmente.

Finalmente é importante salientar que a plataforma para desenvolvimento de algoritmos EPM atualmente uma das únicas no mercado, que reduz o tempo de implementação e de novas tecnologias (para auditar malhas de controle, identificar processos, estimar valores de variáveis, entre outras) que venham a ser desenvolvidas em nível de pesquisa.

## 1.5 Estrutura do Trabalho

Este trabalho apresenta um estudo em relação à indicadores para auditar malhas de controle, na qual são estudadas técnicas para: avaliar o desempenho e potencial das malhas de controle, detectar automaticamente oscilações e avaliar a sintonia de controladores PID. Para uma melhor compreensão do trabalho, este será dividido em sete capítulos, estruturado na seguinte ordem:

Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo são apresentadas a definição do tema, o alcance do projeto, os objetivos gerais, específicos e a justificativa destacando a motivação e importância desta pesquisa.

Capítulo 2 – Fundamentação teórica: Uma síntese da fundamentação teórica das técnicas para avaliar o desempenho e o potencial de malhas de controle, para detectar automaticamente oscilações e para avaliar a sintonia de controladores PID, é apresentada neste capítulo.

Capítulo 3 – Revisão bibliográfica: A revisão bibliográfica do estado da arte em relação às técnicas para auditar malhas de controle é apresentada neste capítulo.

Capítulo 4 – Métodos e procedimentos: As ferramentas de software e hardware, métodos e procedimentos utilizados para cumprir com os objetivos geral e específicos são apresentadas neste capítulo.

Capítulo 5 – Estudo de caso: Neste capítulo é apresentada a integração dos softwares comerciais, tecnologias e algoritmos desenvolvidos para a avaliação do desempenho das malhas de controle de uma planta piloto SMAR, em diferentes cenários.

Capítulo 6 – Análise dos resultados: As análises dos processos de integração das ferramentas de software industrial com a planta SMAR, de implementação dos algoritmos em EPM, e as análises dos resultados obtidos nos diferentes cenários são apresentadas neste capítulo.

Capítulo 7 – Conclusões e possibilidade de trabalhos futuros: Finalmente, neste capítulo é apresentada uma síntese das atividades realizadas, descritas as principais conclusões e listadas as possibilidades de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho. São apresentadas as sínteses das técnicas para modelar verbal e estruturalmente processos industriais, pré-processamento de dados, sintonia de controladores, indicadores de desempenho para controladores e técnicas para detecção de oscilações.

### 2.1 Modelagem de Processos

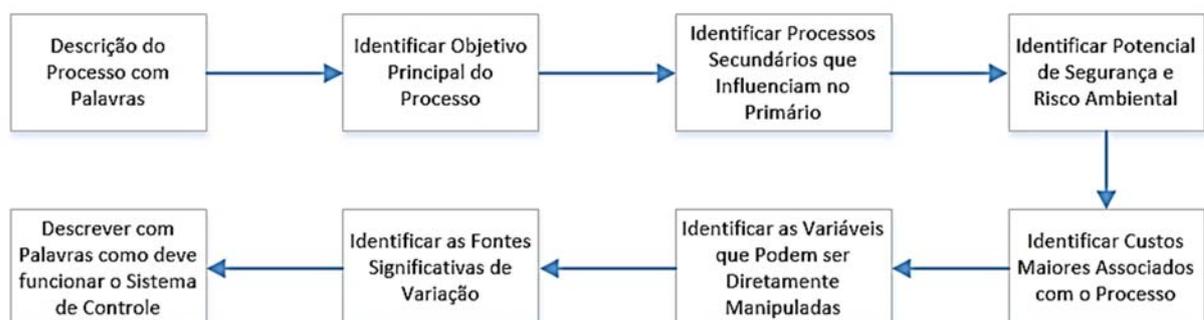
Nesta seção serão apresentadas as técnicas para modelagem verbal e modelagem estrutural. Nesta última serão descritos os métodos da matriz de adjacência e matriz de acessibilidade.

#### 2.1.1 Modelagem Verbal

A modelagem verbal é uma ferramenta necessária para se ter uma melhor compreensão do processo, ela auxilia durante a operação, manutenção e como consequência sua utilização permite manter e/ou aumentar o desempenho do processo (Michigan, 2007).

O fluxograma ilustrado na Figura 1, apresenta uma síntese do método utilizado para a modelagem verbal de processos industriais.

Figura 1 – Modelagem Verbal Processos Industriais



Fonte: Universidade de Michigan, (2007).

## 2.1.2 Análise Estrutural

Nesta seção é apresentada uma técnica de modelagem estrutural baseada em grafos que permite a determinação das matrizes de adjacência e de acessibilidade.

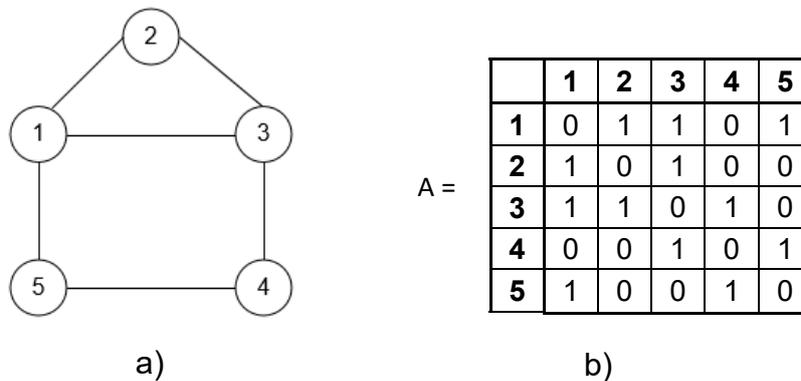
### 2.1.2.1 Matriz de Adjacência

A matriz de Adjacência é uma ferramenta que permite representar as relações existentes entre as variáveis de um processo, de modo a simplificar o entendimento. Esta matriz relaciona os vértices do grafo com as arestas que interligam cada vértice de modo a demonstrar as relações existentes entre as variáveis de processo.

A matriz de adjacência é uma matriz  $A = [a_{ij}]$   $n \times n$  onde  $n$  é o número de nós de um Grafo  $G = (V, E)$  qualquer. Na Figura 2 apresenta-se um exemplo de grafo e matriz de adjacência, que foi construída seguindo o seguinte critério (Carvalho, 2005).

$$A = (i,j) = \begin{cases} 1 & \text{se } i \sim j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Figura 2 – a) Grafo e b) Matriz Adjacência do referido Grafo.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2005).

### 2.1.2.2 Matriz de Acessibilidade

A matriz de acessibilidade é uma matriz binária derivada da matriz de adjacência. Na matriz de acessibilidade  $R$  são relacionados o número de arestas do dígrafo com a quantidade de "1" encontrados na matriz de Adjacência e são descritas as relações diretas e indiretas entre os vértices. (Yang *et al.*, 2014).

A matriz segue a seguinte relação:

$$A^{\#} = (i, j) = \begin{cases} 1, & \text{se } A(i, j) \neq 0 \\ 0, & \text{se } A(i, j) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Sendo definida por:

$$R = (A + A^2 + \dots + A^n)^{\#} \quad (3)$$

## 2.2 Pré-processamento dos Dados

Nesta seção é apresentada uma síntese da teoria de amostragem de dados, considerações para a determinação do comprimento apropriado dos dados para análise e outras considerações necessárias para assegurar a qualidade dos dados.

### 2.2.1 Teorema de Amostragem

Pelo teorema de Nyquist-Shannon demonstra que para se preservar a informação contida em um determinado sinal, este precisa ser amostrado em períodos equi-espaçados no tempo de modo que a frequência de amostragem seja maior ou igual a duas vezes a frequência máxima do sinal.(Puhlmann, 2014).

Caso o critério de Nyquist-Shannon não seja seguido pode surgir o efeito *aliasing* no espectro amostrado, neste caso ocorrerá uma sobreposição dos espectros de sinal o qual irá ocasionar uma distorção nos sinais de conteúdo espectral (Puhlmann, 2014).

A experiência em determinadas aplicações industriais permite que sejam estabelecidos alguns valores em ordens de grandezas de modo a facilitar a seleção da frequência de amostragem para cada tipo de malha.(Duarte-Ramos, 2000).

Tabela 1 – Parâmetros recomendados para malhas de controle em uma refinaria

Tipo de Malha	Intervalo de Amostragem (s)
Pressão	20
Vazão Líquidos	10
Temperatura	60-120
Vazão de vapor e gases	60
Nível	20

Fonte: Thornhill *et al.* (1999)

### 2.2.2 Comprimento dos Dados para Análise

O comprimento do conjunto de dados utilizado para a análise influencia na confiabilidade estatística dos índices de desempenho, quanto maior for o comprimento dos dados, melhor será a confiabilidade dos índices.

Uma vez que os métodos para avaliação de desempenho utilizam o erro do controlador e não a variável de processo, não é necessário que a malha esteja no mesmo *set point* durante todo o período de aquisição dos dados, mas é desejável que as características das malhas permaneçam iguais, por exemplo o conjunto de dados não deverá conter um evento de calibração dos instrumentos ou perturbações já conhecidas da planta como interrupção de alimentação.(Thornhill *et al.*, 1999).

Um bom equilíbrio entre confiança estatística e a estabilidade das características da malha por ser alcançado com 1500 amostras, considerando uma malha de vazão com intervalos de 10 s, esta deverá ser monitorada em um intervalo de 4h e 10min, caso seja uma malha de vapor com intervalos de amostragem de 60s esta vazão precisará ser monitorada por um intervalo de 25 h. É possível que sejam utilizados intervalos mais curtos com 500 ou 1000 amostras, mas neste caso ocorrerá um aumento no intervalo de confiança do índice de avaliação de desempenho (Thornhill *et al.*, 1999).

### 2.2.3 Considerações sobre a Qualidade dos Dados

Os dados a ser utilizados para a avaliação do desempenho, identificação de padrões e modelos, podem vir de historiadores industriais acessados via padrão OPC – HDA, ou podem ser dados capturados em tempo real via padrão OPC - DA. É importante que estes dados sejam pré-processados sempre que necessário, isto é, sejam eliminados os dados outliers, completadas as lacunas dados com dados, entretanto não é aconselhável filtrar os dados nem comprimir os mesmos.

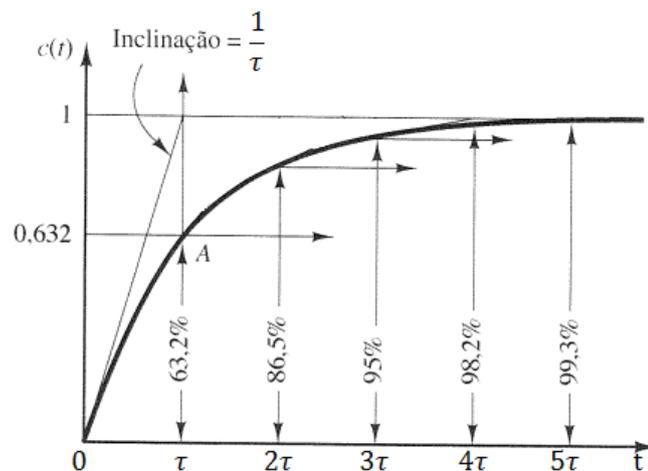
Caso os dados sejam comprimidos, sugere-se avaliar o fator de compressão, devendo só se utilizar aqueles conjuntos de dados que tenham um fator de compressão,  $CF < 3$  como definido por Thornhill *et al.* (2004). A avaliação da quantização também deve ser considerada, para assegurar a qualidade dos dados, devendo só se utilizar aqueles conjuntos de dados que tenham um fator de quantização,  $QF < 0.5$  como definido por Thornhill *et al.* (2004).

Todos os conjuntos de dados capturados neste trabalho não foram filtrados nem foram comprimidos, os testes de compressão e quantização realizados nos dados revelaram uma boa qualidade dos mesmos ao apresentar indicadores dentro da faixa permitida.

### 2.3 Sintonia de Controladores PID

Nesta seção será apresentada a síntese do método de sintonia IMC de controladores PID denominada de *Lambda Tuning*. O método baseia-se modelo do processo, que pode ser determinado por meio de diversas técnicas tais como por exemplo, identificação de processos, ou caracterização dos parâmetros do modelo via análise da resposta da variável de processo frente a uma entrada ao degrau Figura 3.

Figura 3 – Curva de Resposta ao Degrau



Fonte: Adaptado de Ogata (1997)

Como função de transferência de primeira ordem com atraso de transporte representa uma grande parte dos processos industriais, ou ainda podem se considerar muitos processos de ordem superior como processos ditos de primeira ordem dominante, a mesma será considerada para a análise do processo (Coelho, 2004).

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\theta_p s}}{\tau_p s + 1} \quad (4)$$

Onde  $K_p$  o ganho estático do processo,  $\tau_p$  a constante de tempo do processo em malha aberta, definida pelo tempo que a resposta leva para chegar em 63,2% do seu valor final, e  $\theta_p$  o atraso de transporte, que é o tempo que o sistema demora a

apresentar uma alteração na saída após de sofrido uma variação na sua entrada. Analisando o gráfico é possível obter o valor do ganho do sistema, que é adimensional.

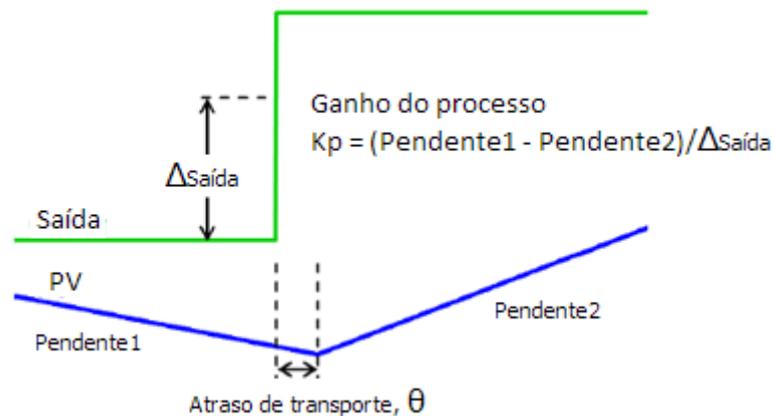
$$K_p = \frac{\Delta y(t)}{\Delta u(t)} \quad (5)$$

Onde  $y(t)$  é a variável de saída do sistema e  $u(t)$  o sinal de controle do sistema.

Esta modelagem não pode ser considerada para processos integradores. Para este tipo de sistema a resposta em malha aberta terá como resultado um formato em rampa, sendo um exemplo deste processo o controle de nível.

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\theta_p s}}{s} \quad (6)$$

Figura 4 – Curva de Resposta ao Degrau do Sistema Integrador



Fonte: Adaptado de (Coughran, 2013).

Onde temos o atraso de transporte  $\theta_p$ , cujo valor pode ser obtido da mesma maneira de um sistema de primeira ordem e  $K_p$  o ganho estático do sistema em malha aberta, descrito pela equação:

$$K_p = \frac{\frac{\Delta y_{descida}}{\Delta t_{descida}} - \frac{\Delta y_{subida}}{\Delta t_{subida}}}{\Delta u} \quad (7)$$

Após realizada a modelagem do sistema, pode-se aplicar a técnica de sintonia Lambda, cujas equações seguem nas tabelas 2 e 3:

Tabela 2 – Método Sintonia Lambda Sistema Primeira Ordem.

Parâmetro	<i>PI</i>	<i>PID</i>
$K_c$	$\frac{1}{K_p} \left( \frac{\tau_p}{\tau_c + \theta_p} \right)$	$\frac{1}{K_p} \left( \frac{\tau_p}{\tau_c + 0,5 \cdot \theta_p} \right)$
$T_i$	$\tau_p$	$\tau_p$
$T_D$	0	$0,5 \cdot \theta_p$

Fonte: Adaptado de (Coughran, 2013)

Onde  $\tau_c$  representa a constante de tempo desejada em malha fechada. Segundo Cooper, (2005) pode considerar-se como sintonia agressiva valores de  $\tau_c > 0,1\tau_p$  ou  $\tau_c > 0,8\theta_p$ , como sintonia moderada valores de  $\tau_c > 1,0\tau_p$  ou  $\tau_c > 8,0\theta_p$ , como sintonia conservativa valores de  $\tau_c > 10\tau_p$  ou  $\tau_c > 80\theta_p$ .

Tabela 3 – Método Sintonia Lambda Sistema Integradores.

Parâmetro	<i>PI</i>
$K_c$	$\frac{2\tau_c + \theta_p}{K_p(\tau_c + \theta_p)^2}$
$T_i$	$2\tau_c + \theta_p$
$T_D$	0

Fonte: Adaptado de (Coughran, 2013)

No caso de controladores para processos integradores segundo Cooper, (2005) pode considerar-se para uma sintonia padrão valores de  $\tau_c = \theta_p\sqrt{10}$  e para uma sintonia conservadora valores de  $\tau_c = 5 \cdot \theta_p\sqrt{10}$ .

## 2.4 Avaliação Baseada na Integral dos Sinais

Nesta seção é apresentada a síntese das técnicas para avaliar o desempenho baseada na análise dos indicadores que fazem uso da integral dos sinais (Jamsa-Jounela *et al.*, 2003; Jeffery, 2005). São apresentados os índices de erro permanente, de erro absoluto, de erro quadrático, de Expertune e o indicador de ação de controle.

### 2.4.1 Indicador de erro permanente (IEP)

Este indicador avalia o desempenho do sistema em regime permanente utilizando para isto o erro entre o valor da referência e o valor da variável de processo, o indicador pondera os valores de erro  $e(k)$  por meio do parâmetro  $p(k)$  de forma que, erros aceitáveis dentro de uma faixa de valores,  $-e_{Lim} < e(k) < e_{Lim}$ , são considerados como zero (0), erros acima do máximo erro permitido são considerados como menos um (-1) e erros por baixo do mínimo erro permitido são considerados como um (1), em resumo a expressão de ponderação utilizada pelo indicador é:

$$p(k) \begin{cases} -1, & e(k) \leq -e_{Lim} \\ 0, & -e_{Lim} < e(k) < e_{Lim} \\ 1, & e(k) \geq e_{Lim} \end{cases} \quad (8)$$

O indicador pode ser calculado de forma recursiva, penalizando as medições anteriores utilizando o parâmetro,  $\lambda_{IEP}$ , denominado “fator de esquecimento”, limitado numa faixa de valores,  $0 \leq \lambda_{IEP} \leq 1$ . Na sequência apresenta-se as expressões matemáticas para o cálculo do indicador:

$$IEP\alpha = \lambda_{IEP}IEP\alpha + (1 - \lambda_{IEP})p(k) \quad (9)$$

$$IEP(k) = IEP\alpha \quad (10)$$

### 2.4.2 Indicador de erro absoluto (IAE)

Este indicador é adequado para avaliar respostas não monotônicas, devido à penalização dos erros persistentes, o indicador não está limitado num intervalo de valores, o que dificulta uma interpretação ou comparação.

O indicador pode ser calculado de forma recursiva penalizando as medições anteriores utilizando o parâmetro,  $\lambda_{IAE}$ , denominado “fator de esquecimento”, limitado numa faixa de valores,  $0 \leq \lambda_{IAE} \leq 1$ . Na sequencia apresenta-se as expressões matemáticas para o cálculo do indicador:

$$IAE_{ac} = \lambda_{IAE} \cdot IAE_{ac} + abs(e(k)) \quad (11)$$

$$IAE(k) = IAE_{ac} \quad (12)$$

#### 2.4.3 Indicador de erro quadrático (ISE)

Este indicador é adequado para avaliar respostas onde grandes desvios causam uma maior degradação do desempenho, quando comparada com pequenos desvios, o indicador proporciona uma alta penalização a erros maiores e uma pequena a erros menores.

De forma similar ao IAE este indicador não está limitado, e a avaliação de desempenho da malha deve ser realizada utilizando em conjunto outros indicadores. O indicador pode ser calculado de forma recursiva penalizando as medições anteriores utilizando o parâmetro,  $\lambda_{ISE}$ , denominado “fator de esquecimento”, limitado numa faixa de valores,  $0 \leq \lambda_{ISE} \leq 1$ . Na sequencia apresenta-se as expressões matemáticas para o cálculo do indicador:

$$ISE_{ac} = \lambda_{ISE} \cdot ISE_{ac} + (1 - \lambda_{ISE}) \cdot abs(e(k)^2) \quad (13)$$

$$ISE(k) = ISE_{ac} \quad (14)$$

#### 2.4.4 Indicador de Expertune (IEXP)

Este indicador mede o desempenho do comportamento regulatório, quão bem responde a malha de controle a perturbações nos processos. O indicador usa o modelo do processo combinando os valores do indicador IAE atuais e ótimos. O valor do indicador está limitado num intervalo de valores  $0 \leq IEXP \leq 1$ , onde valores próximos a 0 (zero) indicam sistema de controle com desempenho ideal, valores maiores indicam o potencial da malha para melhorar o desempenho em porcentagem. Os valores ótimos de IAE devem ser obtidos utilizando conjuntos de dados de

historiadores que mostrem um desempenho próximo do ótimo. O indicador de Expertune é apresentado na sequencia:

$$IEXP_{ac} = 100 \left( \frac{IAE_{ac} - IAE_{Opt}}{IAE_{ac}} \right) \quad (15)$$

$$IEXP(k) = IEXP_{ac} \quad (16)$$

#### 2.4.5 Indicador de ação de controle (IAC)

Este indicador pode ser utilizado para medir quanto mudam as ações de controle, de forma similar ao ISE. O indicador apresentará valores elevados se por exemplo, uma válvula precisa um elevado esforço de controle para movimentar-se, e valores próximos de zero quando o esforço de controle é mínimo. O indicador não está limitado numa faixa de valores, e pode ser calculado de forma recursiva penalizando as medições anteriores utilizando o parâmetro,  $\lambda_{IAC}$ , denominado “fator de esquecimento”, limitado numa faixa de valores,  $0 \leq \lambda_{IAC} \leq 1$ . Na sequência apresenta-se as expressões matemáticas para o cálculo do indicador:

$$IAC_{ac} = \lambda_{IAC} \cdot IAC_{ac} + (1 - \lambda_{IAC}) \cdot \text{abs}((u(k) - u(k - 1))^2) \quad (17)$$

$$IAC(k) = IAC_{ac} \quad (18)$$

## 2.5 Avaliação do Potencial para Aumento de Desempenho

Nesta seção apresenta-se a síntese das técnicas para avaliar o potencial de melhoria de desempenho de malhas de controle baseadas em padrões referenciais de variância mínima da variável de processo. São apresentados o índice de Harris e uma aproximação do mesmo que foi denominada neste trabalho de índice de Shunta.

### 2.5.1 Índice de Harris

O controle de variância mínima é a base para o índice de Harris. Os métodos de avaliação de desempenho de malhas de controle, baseados no controle de variância mínima (CMV) são de grande interesse devido a já possuírem uma sólida fundamentação, necessitarem de pouco conhecimento do processo e serem de fácil implementação (Mejía, 2008).

O desenvolvimento do controle com variância mínima é descrito detalhadamente em (Andrzej W. Ordys, 2007), sendo que este desenvolvimento leva em consideração que o sistema em questão seja linear, invariante no tempo e tipo simples entrada, simples saída (SISO), como representação da equação (19).

$$y(t+k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot \xi(t+k), \quad (19)$$

onde  $y(t)$  representa a variação da saída do sistema em torno do setpoint,  $u(t)$  representa o sinal de controle e  $\xi(t)$  representa a perturbação, os termos  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$  e  $C(z^{-1})$  são polinômios no operador atraso  $z^{-1}$ .

Utilizando a equação Diophantina (20) é possível separar o polinômio C em uma parte relacionada com os valores passados de  $\xi$  e outra que relaciona os valores futuros de  $\xi$ . (Barbosa e Barros, 2011)

$$C = A \cdot F + z^{-k} \cdot G \quad (20)$$

Manipulando as duas equações é possível encontrar a equação (21) que representa o sistema.

$$y(t+k) = \frac{BF}{C} \cdot u(t) + \frac{G}{C} \cdot y(t) + F \cdot \xi(t+k) \quad (21)$$

Definindo a lei de controle conforme a equação (24) abaixo.

$$y(t+k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \cdot \xi(t+k) \quad (22)$$

É possível verificar que o sistema é levado a uma condição de variância mínima na saída, pois o sinal de saída irá depender somente da perturbação  $\xi$  conforme equação. A variância do sinal de saída em sistemas no regime de variância mínima é dada pela equação (23). (Barbosa e Barros, 2011).

$$\sigma_{mvc}^2 = E[(F \cdot \xi(t+k))^2] \quad (23)$$

O método de Harris consiste em comparar a variância teórica que poderia ser obtida se um controlador de variância mínima fosse instalado no sistema, com a variância apresentada pela variável de processo (Mejía, 2008).

$$\eta_{MV} = \frac{\sigma_{y.MV}^2}{\sigma_y^2}, \quad (24)$$

onde  $\sigma_{y.MV}^2$  é a estimativa de variância mínima teoricamente alcançável,  $\sigma_y^2$  é a variância de saída do sistema analisado.

O índice de Harris irá retornar um valor adimensional limitado entre um intervalo de  $0 < \eta_{MV} < 1$ . Os valores próximos de 1 (um) indicam que a variância de saída teoricamente alcançável está com um bom controle, os valores próximos a 0 (zero) indicam que a variância de saída está com um controle ruim, existindo assim um grande potencial para melhoria de desempenho (Harris *et al.*, 1999).

### 2.5.2 Índice Shunta

Este método trata-se de uma aproximação do Índice de Harris. O princípio deste método consiste em comparar o desvio padrão mínimo, que pode ser obtido se um controlador de variância mínima MVC fosse aplicado no sistema, com o desvio padrão total da variável controlada. Uma síntese deste método baseada no trabalho de Shunta (1995) é apresentado na sequência.

O desvio padrão da variável medida do processo é comumente empregado e uma medida da variabilidade do processo fácil de ser compreendida.

$$S_{Tot} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (x(k) - \bar{x})^2}{N-1}}, \quad (25)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k), \quad (26)$$

onde  $N$  é o número de amostras, tipicamente  $N = 1500$  e  $x$  pode ser igual à variável controlada  $y$ , ou igual ao erro de controle  $e$ . Se a variável a ser monitorada não é uma

medida que tem regularidade e é usualmente inferida (p.ex., concentração, via temperatura) a propriedade aditiva da variância pode ser usada. Esta propriedade permite o uso de variáveis independentes para aproximar a variável inferida sendo conhecido suas relações matemáticas.

O controlador de variância mínima  $S_{Fbc}$  pode ser calculado diretamente baseado no conhecimento dos desvios padrão total  $S_{Tot}$  e da capacidade  $S_{Cap}$  da medida do processo através da formula de Fellner na equação (27).

$$S_{Fbc} = S_{Cap} \sqrt{2 - \left( \frac{S_{Cap}}{S_{Tot}} \right)^2} \quad (27)$$

$S_{Cap}$  é calculado das amostras do processo  $y(k)$  conforme equações (28) e (27).

$$S_{Cap} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^N (x(k) - x(k-1))^2}{2(N-1)}} \quad (28)$$

O índice de variabilidade  $\eta_{VI}$ , pode ser definido com base no valor total do desvio padrão e no desvio padrão para o controle de variância mínima. Este indicador irá indicar o quão perto o desempenho de controle esta da variância mínima, conforme equação (29):

$$\eta_{VI} = 100 \left( 1 - \frac{S_{Fbc} + \alpha}{S_{Tot} + \alpha} \right), \quad (29)$$

onde  $\alpha$  é o fator de sensibilidade, que pode ser usado para controlar a sensibilidade dos desvios padrão o indicador. Sendo o indicador de desempenho de Shunta dado pela equação.

$$\eta_{PI} = (100 - \eta_{VI}) = 100 \frac{S_{Fbc} + \alpha}{S_{Tot} + \alpha} \quad (30)$$

## 2.6 Avaliação da Sintonia de Controladores PID

Nesta seção apresenta-se a síntese da técnica de avaliação de sintonia de controladores PID, por meio do denominado índice de *Idle* ou de inatividade.

### 2.6.1 Índice Idle modificado

Este indicador permite avaliar o desempenho da sintonia de controladores PID, identificando diversos tipos de respostas, a saber: conservativas ou lentas, moderadas ou adequadas, oscilatórias e respostas ruins. A versão apresentada neste trabalho deriva de uma modificação da proposta inicial de Hägglund (1999). Diferentemente da proposta inicial, esta proposta consiste na análise do índice de inatividade, que descreve a relação entre o tempo que a correlação, dos incrementos do sinal da variável de processo e do controle se manteve positiva, e o tempo que se manteve negativa, sendo que este indicador automaticamente identifica e avalia os períodos nos quais existem perturbações, não avaliando o desempenho em modos transitórios devidos a mudanças de referência ou em regime permanente quando o valor se encontra numa faixa de valores aceitável.

Para a implementação do indicador, o usuário inicialmente precisa indicar o modo do controlador (direto ou reverso), o período de amostragem, o valor de erro máximo permitido em regime permanente limite,  $e_{MAX}$ , o tempo de estabilização máximo após uma mudança ao degrau permitido,  $t_{EST}$ , definir uma janela de dados para supervisão.

O algoritmo regulariza o sinal de forma a calcular os incrementos dos sinais de controle e da variável de processo, para logo realizar a correlação dos mesmos e determinar os tempos de correlação positiva e negativa, conforme a seguinte expressão:

$$t_{pos} = \begin{cases} t_{pos} + T_s (\Delta u \Delta y > 0) \\ t_{pos} & (\Delta u \Delta y \leq 0) \end{cases} \quad (31)$$

$$t_{neg} = \begin{cases} t_{neg} + T_s (\Delta u \Delta y < 0) \\ t_{neg} & (\Delta u \Delta y \geq 0) \end{cases} \quad (32)$$

Com estes valores é determinado de forma recursiva o valor do indicador por meio das seguintes expressões:

$$IDL_{PID}(k) = \frac{t_{pos} - t_{neg}}{t_{pos} + t_{neg}} \quad (33)$$

$$IDL_{PID}(k) = \gamma \cdot IDL_{PID}(k-1) + (1 - \gamma) \cdot s(k) \quad (34)$$

onde

$$s(k) \begin{cases} -1, \Delta u \Delta y < 0 \\ 0, \Delta u \Delta y = 0 \\ 1, \Delta u \Delta y > 0 \end{cases} \quad (35)$$

Valores próximos de um (1) indicam que o controlador tem uma sintonia conservativa e um comportamento lento na rejeição das perturbações de carga, valores próximos de zero (0) indicam que o controlador tem uma boa sintonia e valores próximos de menos um (-1) indicam uma ambiguidade já que a resposta do sistema pode corresponder a uma boa sintonia ou ao comportamento de uma malha oscilatória. É recomendado que este indicador seja sempre utilizado em conjunto com uma técnica de detecção de oscilações e uma técnica para filtragem de ruído para poder determinar adequadamente os valores de  $\Delta u$  e  $\Delta y$ .

## 2.7 Detecção Automática de Oscilações

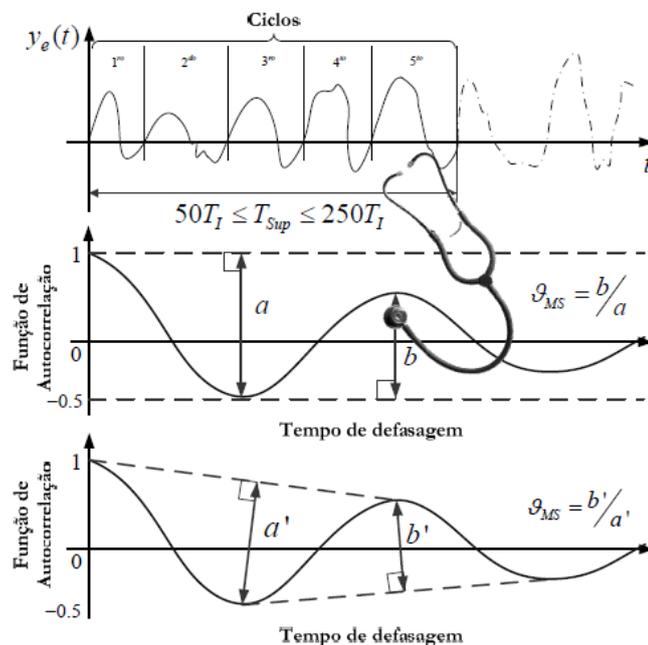
A presença de oscilações em malhas de controles industriais são um problema comum de ocorrer, que acarreta na diminuição da vida útil dos componentes, aumento de irregularidades no produto, além de causar outros problemas que poderiam interromper a produção. (Karra e Karin, 2009).

Métodos para detecção de oscilações foram criados com o objetivo de melhorar a eficiência dos processos e diminuir os custos. Neste capítulo serão apresentados os principais métodos utilizados para detecção de oscilações tanto para aplicações *online* quanto *offline*.

### 2.7.1 Índice de Miao e Seborg

Este é um método patenteado, onde a função de autocorrelação (autocovariância) ACF do sinal é estimada, após calculado um coeficiente de decaimento da função ACF, chamado índice de oscilação  $\varphi_{MS}$ . Se este coeficiente for superior a um dado limiar  $\varphi_{LIM}$ , indica que teremos a presença de oscilação. O coeficiente de oscilação  $\varphi_{MS}$  pode ser calculado de duas formas, conforme mostrado na Figura 5. (Mejia *et al.*, 2008).

Figura 5 – Princípio do método proposto por Miao e Seborg



Fonte: Mejia *et al.* (2008)

Uma vantagem deste método está no fato de utilizar a função de autocorrelação, ela reduz o problema de ruídos no sinal, pois a autocorrelação do ruído branco é igual a zero, tornando mais limpa a visualização gráfica.

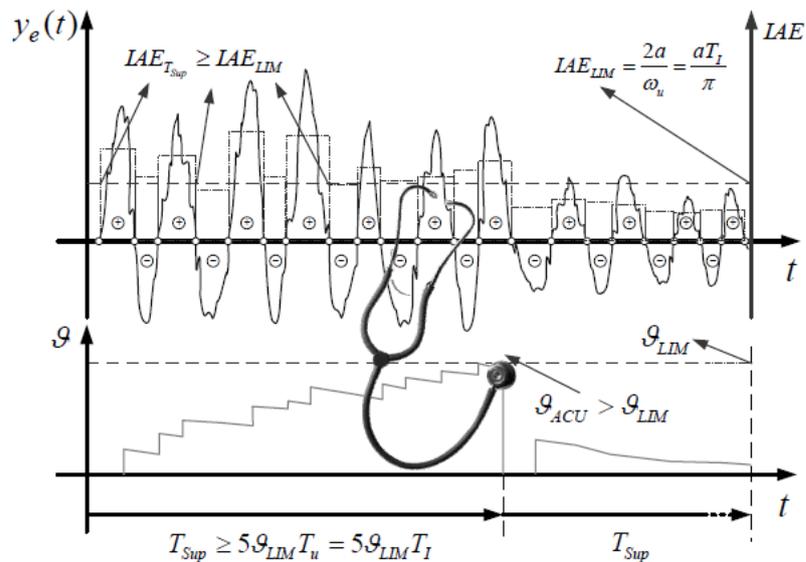
Além desta técnica também ser de fácil aplicação cabe citar que não requer dados de controle da planta, são necessários apenas dados operacionais como o valor atual da variável a ser analisada em relação ao tempo. (Machado, 2013).

Como desvantagem do método é possível citar que o limiar  $\varphi_{LIM}$  é definido de forma empírica, de acordo com a aplicação um valor de 0,5 pode ser aceitável.

### 2.7.2 Método de Hangglund

Este método proposto por Hängglund no domínio do tempo leva em consideração a magnitude da integral do erro absoluto IAE entre as passagens por zero do erro de controle em um determinado período  $T_{Sup}$ . O valor de IAE será baixo nos períodos de controle adequados, quando teremos uma pequena magnitude do erro e poucos cruzamentos por zero. Quando ocorrer uma perturbação na carga o valor médio de cada período do sinal de erro vai exceder o limite  $IAE_{LIM}$  e um contador será incrementado até atingir um limite pré-estabelecido  $\vartheta_{LIM}$  quando poderá ser possível concluir que existe oscilação (Mejia *et al.*, 2008).

Figura 6 – Princípio do método proposto por Hängglund (1995)



Fonte: Mejia *et al.* (2008)

Este método possui algumas desvantagens a primeira o fato de considerar que o circuito está sempre oscilando na sua frequência final sendo que isso nem sempre é verdade. A segunda desvantagem é que a frequência final nem sempre está disponível devido a isso o tempo de integração talvez seja um indicador ruim para o período final.(Andrzej W. Ordys, 2007).

Outra desvantagem importante é o fato que este método exige um grande conhecimento prévio do comportamento da oscilação, sendo que este pode variar de acordo com cada planta, o limite  $IAE_{LIM}$  depende do valor da amplitude da IAE ou do período que define as passagens por zero. Como vantagem deste método podemos citar o fato deste quantificar a dimensão das oscilações.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta etapa será apresentada a evolução das técnicas abordadas, como os sistemas de suporte a decisão, técnicas de detecção de oscilações e indicadores de avaliação de desempenho.

#### 3.1 Sistemas de Suporte a Decisão para a Indústria

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica sobre os principais sistemas de suporte a decisão aplicados atualmente na indústria.

O avanço da tecnologia vem fazendo com que a busca por sistemas de suporte a decisão venha crescendo, as empresas estão buscando cada vez mais a redução nos custos de produção, melhoria na qualidade do produto, diminuição do tempo de parada das máquinas com o objetivo de se adequarem ao mercado competitivo a que estão inseridas, os sistemas de suporte a decisão são essenciais para que as grandes industriais alcancem este objetivo.

Os principais softwares utilizados no mercado são os seguintes:

Tabela 4 – Softwares comerciais avaliação desempenho

<i>Empresa</i>	<i>Nome Produto</i>
Matrikon	ProcessDoctor, LoopBrower
Metso Automation	PlantTriage
ProControl Technology	PCT Loop Optimizer Suite
ABB	Optimize <sup>IT</sup> Loop Performance Manager (LPM)
Honeywell	Loop Scout
Emerson Process Management	Entech Toolkit, Delta V Inspect
TriSolutions	TriCLPM, MedicoPRO
ControlSoft	Intune
KLC	KLC-Control Performance Analysis
OSIsoft	PI ControlMonitor
AspenTech	Aspen Watch
Control Arts Inc.	Control Monitor
Invensys	Loop Analyst
PAS	ControlWizard
PAPRICAN	LoopMD
Shell-Yokogawa	MD <sup>Pro</sup>

Fonte: Adaptado de Jelali (2013)

Uma breve descrição dos seis principais softwares é apresentada na sequência:

Process Doctor é considerado um dos programas mais completos, pois é a única ferramenta que fornece avaliação e monitoração para controles regulatórios (PID) e controladores predictivos baseados em modelo (MPC).

PlantTriage também é uma das ferramentas mais recomendadas pois fornece componentes para modelagem de processos, estatísticas básicas, avaliação de desempenho do controlador, detecção de oscilações, diagnóstico e análise sintonia PID.

PCT Loop Optimizer Suite é uma poderosa ferramenta que inclui componentes para monitoração de desempenho de malha de controle, ajuste de PID e otimização de malhas de controle.

Loop Scout é uma ferramenta que se parece mais com um sistema de auditoria, do que com uma ferramenta de monitoração continua em tempo real. Esta ferramenta coleta os dados e envia pela internet para a Honeywell processar a apresentação dos relatórios.

O Delta V Inspect da Emerson possui ferramentas gráficas para identificação de baixo desempenho nas malhas de controle, quantificação e estatística de diferentes pontos de operação do sistema, também possibilita o ajuste de controladores PID e Fuzzy através da ferramenta Delta V Tune, além do toolkit para condicionamento do sinal, coleta de dados, monitoração e ajuste de controladores.

O TriCLPM é uma ferramenta de tecnologia nacional que foi desenvolvida em parceria com entre a TriSolutions, Petrobras e UFRGS, permite monitorar a eficiência do processo industrial, auxiliar na localização de problemas indicando as malhas com mau desempenho, além de diagnosticar a causa e definir as ações corretivas através de relatórios detalhados.

Neste trabalho a técnica de detecção de oscilações e técnicas para análise de desempenho serão implementadas na plataforma Eclipse EPM utilizando os plugins desenvolvidos em Python.

### **3.2 Técnicas de Detecção de Oscilações**

Nesta seção será apresentada a revisão bibliográfica relacionada com as principais técnicas de detecção de oscilações, sendo esta uma etapa de muito

importante pois as oscilações é um dos principais sintomas que aumentam a variabilidade do produto e reduzem a vida útil dos atuadores.

Pesquisas realizadas por Karra e Karin (2009) comprovaram que os comportamentos oscilatórios causam a diminuição da produção, reduzem a vida útil dos equipamentos e podem ocasionar a interrupção da operação da planta.

A técnica que aplica a magnitude da integral do erro absoluto (IAE), entre os sucessivos cruzamentos por zero do sinal do erro de controle foi desenvolvida e aplicada por Hägglund (1995). Seus estudos foram realizados aplicando o método em um controlador PID, detectando as oscilações em modo on-line.

O método da IEA foi modificado por Forsmann e Stattim (1999), separando a análise dos sinais nos semiciclos positivos e negativos, de modo a possibilitar que a técnica seja utilizada em sinais assimétricos.

A técnica que estima a função de autocorrelação foi introduzida por Miao e Seborg (1999), onde é realizado o cálculo da taxa de decaimento da função ACF, aqui houve um grande avanço nas técnicas de detecção pois além de ser capaz de detectar oscilações de curta duração, o fato de utilizar a função ACF faz com que os ruídos sejam eliminados sem a necessidade de utilização de filtros, a grande desvantagem desta técnica é o fato de ser patenteada.

Passados alguns anos o método que utiliza a função de autocorrelação foi melhorado por Thornhill *et al.* (2003), onde foram analisados os cruzamentos por zero da função de autocovariância e das variáveis de processo (PV) e criado um algoritmo para agrupamento automático das oscilações de períodos semelhantes, além de determinar um percentual da potência espectral que está associada a oscilação.

Nesta etapa foi desenvolvida uma nova técnica que combina a análise no domínio do tempo e da frequência com a utilização das wavelets, sendo esta introduzida por Matsuo *et al.* (2003) com o objetivo de facilitar a identificação das oscilações, principalmente na presença de ruído.

A técnica que faz a estimação dos pólos de um modelo ARMA foi apresentada por Salsbury e Singhal (2005), a mesma é realizada utilizando cruzamentos de alta ordem, sendo que este método foi aplicado apenas em sistema SISO (única entrada única saída), outra importante característica do método é o fato deste não requerer um armazenamento de um lote dados.

A tabela abaixo traz um resumo das técnicas estudadas com as principais características apresentadas em cada uma.

Tabela 5 – Comparativo das Principais técnicas de detecção de oscilações.

<i>Método</i>	<i>Domínio</i>	<i>Modo</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Hägglund (1995)	Tempo	<i>Online</i>	- Simples e intuitivo	- Necessário especificar frequência final - Sensível a ruído
Forsmann (1999)	Tempo	<i>Offline</i>	- Simples e intuitivo - Detecta Oscilações assimétricas	- Uso de filtros - Detecta apenas oscilações periódicas
Miao (1999)	ACF	<i>Offline</i>	- Detecta pequenas oscilações - Filtro automático	- Patentado - Difícil de detectar múltiplas frequências
Thornhill (2003)	ACF	<i>Offline</i>	- Intuitivo - Filtro automático	- Difícil de detectar múltiplas frequências
Matsuo (2003)	Tempo / frequência	<i>Offline</i>	- Detecta múltiplas frequências - Modela o ruído	- Método manual
Salsbury (2005)	ACF	<i>Online</i>	- Não necessita armazenamento de dados	- Difícil de detectar múltiplas frequências

Fonte: Adaptado de Andrzej W. Ordys (2007)

Neste trabalho será implementada a técnica de detecção de oscilações de Miao e Seborg a qual será utilizada em conjunto com o índice de Idle para complementar este indicador de desempenho.

### 3.3 Técnicas de Avaliação de Desempenho

Nesta seção será apresentada a revisão bibliográfica relacionada com as principais técnicas para avaliação de desempenho de malhas de controle.

Existem técnicas clássicas para avaliação de desempenho de malhas de controle que são bem dominadas, como aplicação de degraus para análise da dinâmica do controlador, tempo de subida, sobre sinal, tempo de estabilização as quais possibilitam que se tirem algumas conclusões sobre o controlador. O problema existente nessas técnicas é que estas não podem ser implementadas nos sistemas

para monitoramento *online* do processo. Para que estas técnicas funcionem é necessário aplicar algumas perturbações na planta e isso não é possível com a mesma em operação.

A teoria de variância mínima foi desenvolvida por Åström (1970) onde foram apresentadas as técnicas de predição ótima para processos lineares e discretos.

A próxima pesquisa de grande impacto foi o controle com variância mínima proposto por Harris (1989), com base nas técnicas de predição ótima, se desenvolveu um índice para comparar o desempenho dos controladores em relação a variância mínima teórica possível.

As técnicas de regressão linear simples foram introduzidas por Desborough e Harris (1992) para calcular uma estimativa de variância mínima automaticamente, além de um procedimento recursivo para cálculo on-line do índice de desempenho utilizando apenas dados padrões de processo.

Shunta (1995) fez uma aproximação do índice de Harris, sendo que a grande vantagem deste método é a simplicidade computacional na implementação que é feita com a utilização de simples dados estatísticos com desvio padrão e variância.

A partir destas técnicas apresentadas houve um avanço nas pesquisas, dos indicadores de desempenho baseados em variância mínima, houve a apresentação do método baseado na filtragem e correlação (FCOR) proposto por Huang e Shah (1996) onde o valor da variância mínima é estimado e calculado o índice de avaliação de desempenho.

Técnicas com padrões referenciais baseados em dados históricos foram utilizadas para avaliar o desempenho de modo a compará-los com os valores atuais da malha, sendo apresentado o índice de desempenho relativo (RPI) o qual é calculado com base na velocidade de resposta desejada e atual da malha Huang e Shah (1999).

Outro padrão referencial foi introduzido por (Huang e Shah, 1999) onde foi proposto o controle de regulação linear quadrática gaussiana (LQG), substituindo o controlador de variância mínima. Neste método a variância de controle também é considerada, mas são necessários os modelos do processo e da perturbação.

A tabela abaixo apresenta um resumo com a evolução das técnicas abordadas.

Tabela 6 – Evolução técnicas avaliação desempenho.

<i>Pesquisador</i>	<i>Ano</i>	<i>Descrição</i>
Åström	1970	- Técnicas predição ótima processos lineares e discretos.
Harris	1989	- Controle com variância mínima
Shunta	1995	- Aproximação do controle com variância mínima de Harris.
Huang e Shah	1996	- Filtragem e correlação
Huang e Shah	1999	- Índice de desempenho relativo - Controle LQG

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste trabalho serão implementadas as técnicas de avaliação de desempenho de Shunta e Idle em conjunto com os indicadores IAE e ISE.

## 4 MÉTODOS E PROCEDIMENTOS

Nesta seção serão apresentadas as ferramentas e procedimentos baseados na fundamentação teórica e na revisão bibliográfica que serão utilizados para cumprir com os objetivos deste estudo. Será feita uma descrição dos softwares utilizados no desenvolvimento dos algoritmos, da planta piloto e a topologia para a implementação das estratégias propostas.

### 4.1 Planta Didática SMAR

A planta didática SMAR é um equipamento que tem por objetivo demonstrar a operação de diversas malhas de controle, utilizando equipamentos que foram desenvolvidos para aplicações na indústria, ou seja, é possível trabalhar com situações reais existentes na indústria.(Smar, 2016).

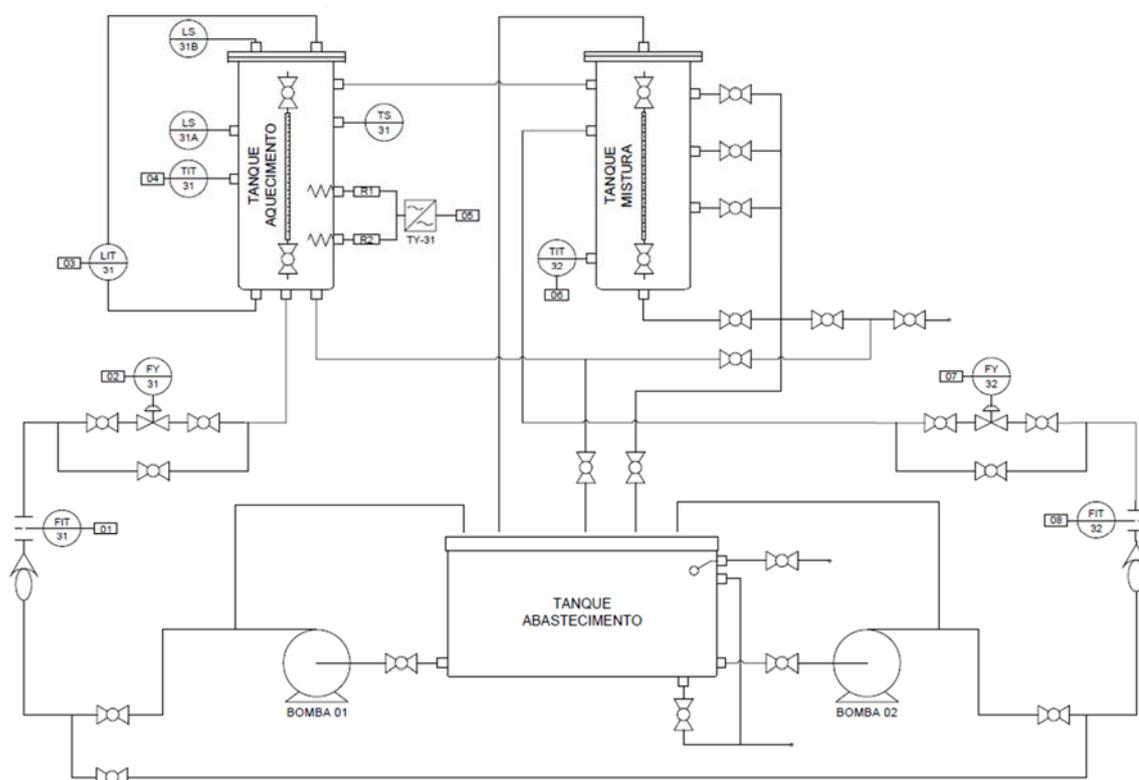
A planta é composta por três tanques denominados reservatório, tanque de aquecimento e tanque de mistura, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – Imagem Planta Didática SMAR



Fonte: Manual de Operação Planta Didática III (2004).

Figura 8 – Fluxograma P&ID da Planta Didática



Fonte: Adaptado Manual de Operação Planta Didática III. (2004).

Para realizar os ensaios das malhas de controle será utilizada a planta didática da SMAR, onde serão desenvolvidas as seguintes atividades:

- a) Descrição do processo;
- b) Estudo do diagrama PI&D;
- c) Estudo da arquitetura de comunicação;
- d) Ensaio no modo de operação automático e manual;
- e) Elaboração de um manual informando os passos a serem seguidos para colocar a planta em operação.

Será elaborado um sistema supervisório em Elipse E3, neste supervisório será possível salvar os dados de processo de cada malha existente na planta, estes dados serão coletados pelo software EPM onde serão desenvolvidos indicadores de avaliação de desempenho das malhas de controle.

Serão realizados ensaios nas malhas de controle de nível e vazão e os parâmetros dos controladores serão alterados de modo a poder visualizar a resposta

de cada malha. Utilizando as válvulas manuais disponíveis na planta serão simuladas variações nos consumidores do sistema, conforme ocorre na indústria.

## **4.2 Software MATLAB/Simulink®**

O MATLAB® é um software utilizado para cálculo numérico, o qual possibilita aplicações em processamento de sinal e imagem, comunicações e sistemas de controle.

O Simulink® é um ambiente incluso no MATLAB® que possibilita que sejam realizadas modelagem e simulação de sistemas dinâmicos utilizando linguagem de diagramas de blocos.

Estes aplicativos serão utilizados para desenvolvimento e testes dos algoritmos de avaliação de desempenho tratados neste trabalho. Estes softwares foram escolhidos devido a serem ferramentas já consagradas no âmbito acadêmico e de pesquisa.

Após concluídos os algoritmos em MATLAB® e Simulink® estes serão implementados na linguagem Python de modo a rodarem na ferramenta Elipse EPM.

## **4.3 Linguagem de Programação Python**

O Python é uma linguagem de programação de alto nível, orientada a objetos que possui uma grande biblioteca padrão. A linguagem possui um interpretador interativo que possibilita rodar o código sem a necessidade de ter que compilar o código toda vez que se deseja executar.

Como principais vantagens desta linguagem cabem citar: É um software livre, é uma linguagem de programação que não é necessário compilar o código para que a máquina entenda e é uma linguagem multiuso, permite a criação desde aplicativo desktop a websites.

Neste trabalho serão desenvolvidas bibliotecas com indicadores e algoritmos para análise de desempenho de malhas de controle. Como o EPM possui uma integração com a linguagem Python, estas bibliotecas serão desenvolvidas em Python e adicionadas ao EPM, desta forma será possível que o usuário final realize a avaliação de desempenho das malhas de controle de forma simples e rápida, bastará selecionar o indicador desejado e aplicar na malha de interesse.

#### 4.4 Software de Gestão de Plantas Elipse (EPM)

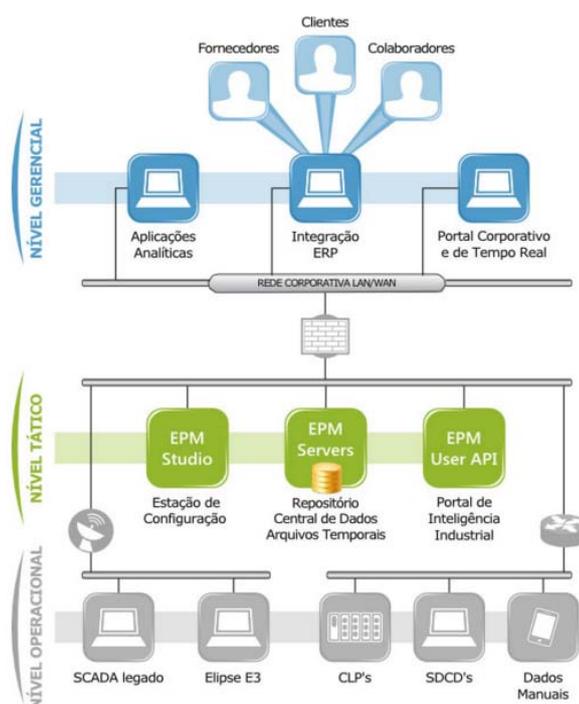
O *EPM Elipse Plant Manager* é um software de gerenciamento de processos que possibilita de forma rápida confiável e simples a coleta de dados de diversos tipos de fontes em tempo real ou séries históricas. É compatível com o padrão OPC UA (*Unified Architecture*), possui uma integração com a linguagem Python, característica essa que facilita no tratamento e manipulação dos dados.(Elipse, 2016).

A integração com a linguagem Python, torna o EPM um software muito flexível, pois possibilita a inclusão de forma fácil e rápida dos algoritmos desenvolvidos no mundo acadêmico para as mais diversas aplicações.

A Elipse é uma empresa que está presente em praticamente todas as áreas da indústria, como por exemplo, alimentos, papel e celulose, siderurgia, no Brasil e também no exterior, os algoritmos desenvolvidos neste TCC irão contribuir pois será possível aplicá-los nas mais diversas áreas da indústria e não somente no mundo acadêmico.

O EPM realiza o gerenciamento das informações e possibilita a integração de diversos níveis na indústria do nível gerencial até o nível operacional além fornecer informações para os sistemas ERP.

Figura 9 – Arquitetura Aplicação Elipse EPM



Fonte: Elipse (2016)

Neste trabalho o pacote EPM será instalado em uma arquitetura *stand alone*, ou seja, o EPM Server, EPM Studio serão instalados no mesmo computador, não será aplicada a topologia cliente servidor apresentada na Figura 9.

Os dados da planta SMAR serão coletados através do protocolo OPC Server disponível no sistema supervisório da planta SMAR, será desenvolvido um novo sistema supervisório em Elipse E3 que irá fornecer os dados das malhas de controle ao EPM Server onde serão desenvolvidos os indicadores de desempenho.

#### 4.4.1 Instalação dos softwares

Os softwares que serão necessários para a arquitetura final em estudo serão instalados em uma máquina virtual.

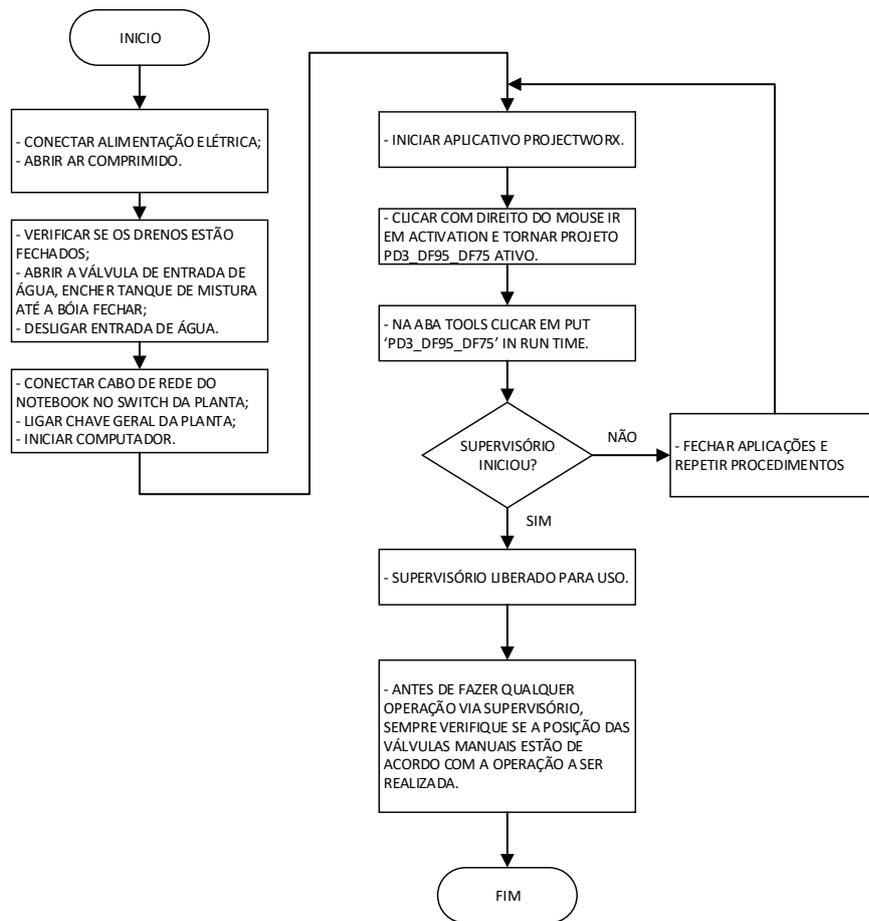
O Elipse E3 Estúdio será utilizado para desenvolvimento das telas de supervisório, este irá se comunicar com a planta SMAR através de protocolo OPC Server, no E3 serão gerados os arquivos de histórico de dados que serão utilizados neste trabalho.

Antes da instalação do EPM é necessário instalar o SQL Express, o EPM utiliza a base do SQL para armazenar os dados em um formato padrão próprio da Elipse, os dados ficam armazenados, mas não disponíveis ao usuário final via SQL.

Inicialmente será instalado o EPM Python Tools que é uma ferramenta que possibilita incluir a linguagem Python no EPM, após isso será instalado o EPM Studio, aplicação onde serão desenvolvidos os indicadores de análise de desempenho das manhas de controle e por fim o EPM Server que é o servidor EPM que faz a coleta dos dados dos equipamentos, CLPs, SDCDs, Scadas, em nosso estudo fará a coleta dos dados do próprio Elipse E3.

Após concluídas estas etapas é necessário preparar a planta didática para realização dos ensaios, para facilitar estes passos foi desenvolvido o fluxograma abaixo.

Figura 10 – Fluxograma operação



Fonte: Elaborado pelo Autor

#### 4.4.2 Arquiteturas do Sistema EPM

Para solução em tempo real o EPM será instalado de modo a comunicar diretamente com o sistema supervisorio Elipse E3, enquanto são simulados os cenários de controle na planta através do supervisorio E3 o EPM estará rodando simultaneamente e realizando a análise das malhas de controle.

Para solução em *offline* os algoritmos serão aplicados com base nos dados salvos no banco de dados do EPM, com base nesta série histórica serão aplicados os algoritmos de detecção de oscilações e análise de desempenho.

## 5 ESTUDO DE CASO

Nesta seção serão mostradas as aplicações da metodologia proposta neste estudo e também como as ferramentas serão aplicadas durante o desenvolvimento das técnicas de análise de desempenho de malhas de controle.

### 5.1 Modelagem e Análise do Processo

O conhecimento do modelo é muito importante tanto para o contexto de controle e projeto quanto para a operação do sistema, a modelagem proporciona uma melhor compreensão do processo, de modo que seja possível operar a planta de uma maneira mais eficiente.

Nesta etapa será realizada a descrição do processo através de modelagem verbal, serão identificados os objetivos do processo, as variáveis a serem manipuladas, fontes de variação e os modos de funcionamento.

Será analisada a influência e acessibilidade que tem uma variável em outra utilizando os grafos de incidência.

#### 5.1.1 Modelagem Verbal

A modelagem verbal da planta didática será realizada nos passos a seguir:

##### 1 -Descrição do Processo com Palavras:

A planta didática possui três reservatórios sendo um o principal, denominado Tanque de Abastecimento, o Tanque de Aquecimento e o Tanque de Mistura.

O tanque de abastecimento está conectado à rede de água, sendo o controle de nível deste reservatório feito a partir de uma chave boia mecânica, de modo a manter o nível do tanque reservatório e evitar que entre ar no sistema. A saída de água deste tanque é realizada a partir de duas bombas centrífugas a Bomba 01 e Bomba 02.

Utilizando as válvulas manuais que estão na saída das bombas é possível configurar o envio de água da planta, conforme tabela abaixo:

Tabela 7 – Envio água tanque Abastecimento.

<i>Bomba</i>	<i>Destino</i>
B001	Enviando somente para o tanque de aquecimento.
B001	Enviando somente para o tanque de mistura.
B001	Enviando para os tanques de mistura e aquecimento simultaneamente.
B002	Enviando somente para o tanque de aquecimento.
B002	Enviando somente para o tanque de mistura.
B002	Enviando para os tanques de mistura e aquecimento simultaneamente.
B001 B002	Ligadas simultaneamente enviando para o tanque de aquecimento.
B001 B002	Ligadas simultaneamente enviando para o tanque de mistura.
B001 B002	Ligadas simultaneamente enviando para ambos os tanques.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O tanque de aquecimento é alimentado por uma válvula de controle de fluxo e um medidor de vazão que opera por pressão diferencial e está configurado para um range de 0-2000 l/h, este tanque também possui um medidor de nível que opera por pressão diferencial e está configurado para medir o nível em um range de 0-100%.

O aquecimento é realizado por duas resistências, instaladas na lateral do tanque, estas resistências por motivos de segurança, só podem ser habilitadas se o tanque estiver totalmente cheio. A temperatura do tanque é medida através de um sensor tipo PT100, instalado na lateral do tanque e configurado para um range de 0-100°C.

O tanque de aquecimento também possui duas chaves de nível, uma para indicação de nível máximo e outra de nível mínimo, além de um termostato, sendo que o aquecimento do tanque será interrompido caso ocorra algum alarme de nível, ou se a temperatura exceder os 75°C e disparar o termostato.

O tanque de mistura possui duas alimentações sendo uma proveniente do tanque de aquecimento e outra do tanque de água fria por uma por válvula de controle de fluxo e um medidor de vazão que opera por pressão diferencial e está configurado para um range de 0-2000 l/h.

## 2 - Perturbações que influenciam no processo

O medidor de vazão utilizado na planta possui uma grande influência com relação as bolhas de ar existentes dentro das tubulações, estas bolhas sempre aparecem quando o nível do tanque de abastecimento fica muito baixo.

As bolhas de ar também podem surgir devido aos drenos presentes na saída de cada bomba, estes drenos servem para possibilitar que a bomba fique ligada mesmo quando as válvulas manuais e válvulas de controle estão totalmente fechadas, funcionando assim como um alívio de pressão do sistema. O surgimento das bolhas ocorre sempre que o nível do tanque de abastecimento está abaixo da saída dos drenos.

## 3 - Identificar potencial de segurança e risco ambiental

Como se trata de uma planta didática que opera apenas com água e não possui nenhum tipo de produto químico, então o principal risco ambiental que podemos identificar é a utilização excessiva de água pela planta, caso a mesma seja operada com a válvula de dreno do tanque de abastecimento aberta o sistema sempre ficará jogando água fora sem necessidade.

Com relação aos aspectos de segurança dos operadores da planta é importante observar o risco de prensar algum dedo ou parte do corpo caso mesmo seja colocado nos atuadores das válvulas de controle enquanto a mesma esta sem movendo, além disso é preciso tomar cuidado quando estiver trabalhando com a malha de aquecimento, pois a água pode chegar a uma temperatura de até 75°C então é importante não colocar as mãos nos tanques e tubulações quando estiver trabalhando com temperatura.

Também é importante ressaltar outro aspecto de segurança com relação a drenagem da planta após o uso da malha de temperatura, é recomendado que seja

misturada água fria no tanque de abastecimento de modo a diminuir a temperatura antes de jogar na rede de esgoto, pois pelos catálogos técnicos dos fabricantes de tubos de PVC, grande parte da tubulação de esgoto predial é projetada para trabalhar a uma temperatura de até 45°C em regime não contínuo.

#### 4 - Identificar os maiores custos associados ao processo

Como no estudo em questão está sendo utilizada uma planta didática que usa como insumo a água e energia elétrica, estes são os maiores custos que estão associados ao processo.

#### 5 - Identificar as variáveis que podem ser diretamente manipuladas

A planta possibilita que sejam controladas as vazões de entrada de cada tanque, a temperatura do tanque de aquecimento e o nível do tanque de aquecimento.

Utilizando as válvulas manuais também é possível controlar a vazão de saída dos tanques de aquecimento e mistura.

#### 6 - Identificar as fontes significativas de variação

Como a planta utiliza apenas água da rede, então não temos problemas com variação de densidade do fluido, mas existe o problema de presença de bolhas na água devido a operação inadequada. A presença de bolhas de ar na água causa oscilações nas leituras de vazão, dificultando o controle da malha de vazão.

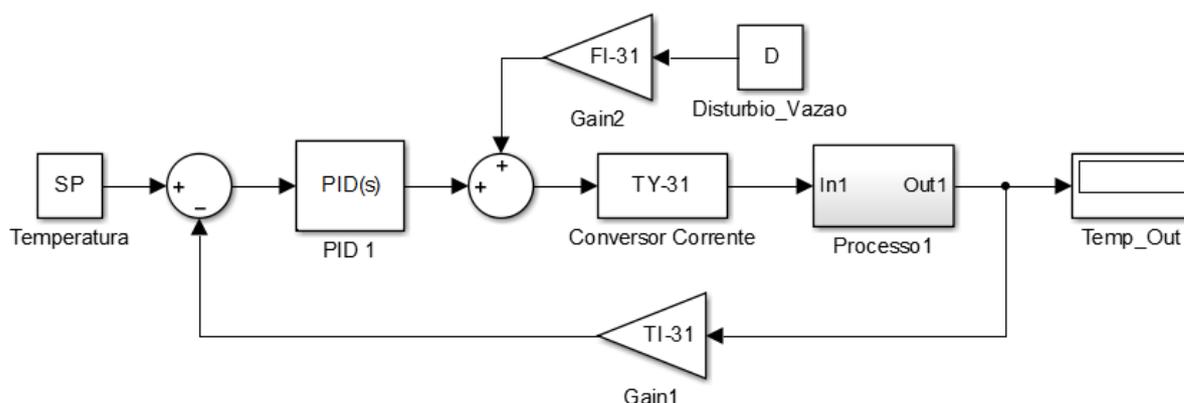
#### 7 - Descrever com palavras como deve funcionar o sistema de controle

A planta possibilita que sejam implementadas diversas estratégias de controle, mas no programa padrão de fábrica é possível realizar três estratégias de controle, que seriam o controle Antecipativo, Realimentação Negativa e em Cascata.

No controle Antecipativo o objetivo é manter a temperatura TI-31 no tanque de aquecimento, esta estratégia é realizada com base nos valores de vazão do medidor FIT-31. Esta vazão será utilizada para antecipar a resposta do conversor de corrente que atua nas resistências de aquecimento, desta forma a perturbação identificada na

vazão é eliminada antes de provocar alteração no processo. A perturbação é feita atuando manualmente no supervisorio na válvula FY-31.

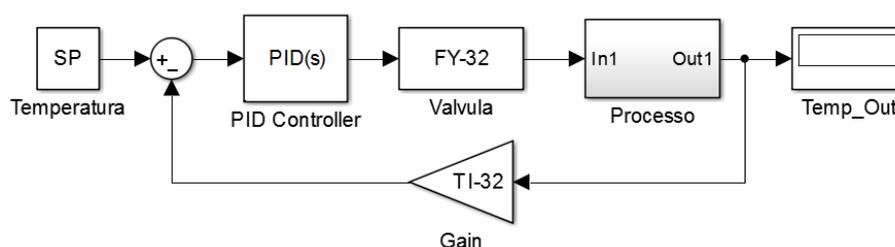
Figura 11 – Diagrama de Blocos Controle Antecipativo



Fonte: Elaborado pelo autor

No Controle por Realimentação Negativa o objetivo é controlar a temperatura no tanque de mistura, esta estratégia é realizada medindo-se o valor de temperatura TI-32 do tanque de mistura, que recebe água quente do tanque de aquecimento a uma temperatura fixa. O valor é comparado com um *set-point* definido pelo operador enviando para o controlador a diferença entre esses valores que seria o erro, com base no erro o controlador atua na válvula FY-32 para ajustar a quantidade de água fria que entra no tanque de modo a manter a temperatura desejada.

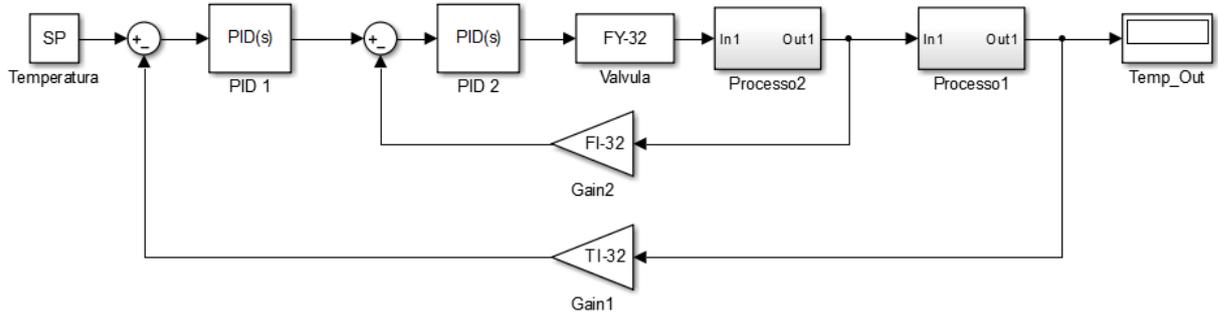
Figura 12 – Diagrama de Blocos Controle Realimentação



Fonte: Elaborado pelo autor

No controle em Cascata o objetivo é manter a temperatura TI-32 da água no tanque de mistura. Nesta estratégia a malha que controla a vazão de água fria FIC-32 vai receber como *set-point* a saída da malha do controle de temperatura do tanque de mistura, caso ocorra alguma variação na temperatura da água quente a malha de vazão irá atuar a válvula para corrigir.

Figura 13 – Diagrama de Blocos Controle Cascata



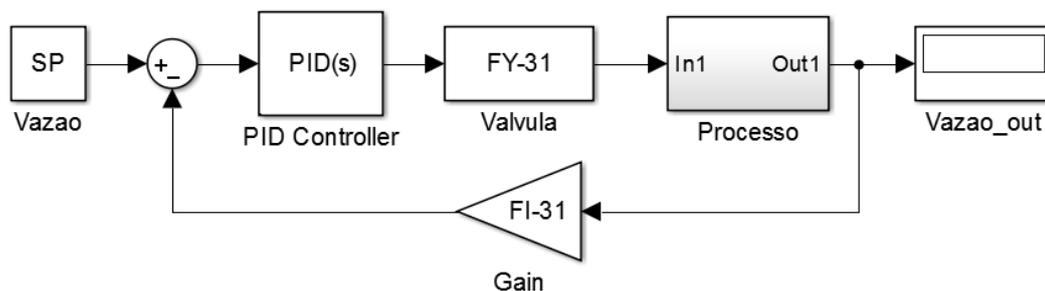
Fonte: Elaborado pelo autor

Além destas estratégias de controle que já vem como padrão na planta, a mesma possibilita que o usuário elabore suas próprias estratégias de controle, utilizando os sensores e válvulas disponíveis na planta.

Para este trabalho foram criadas duas novas malhas de controle, sendo uma malha específica para controle de vazão e outra para controle de nível do tanque de aquecimento.

Na malha de controle de vazão foi utilizada a válvula de controle FY-31 e o medidor de vazão FI-31 para fazer um controle por realimentação de modo a ter como *set-point* uma vazão desejada, conforme Figura 14.

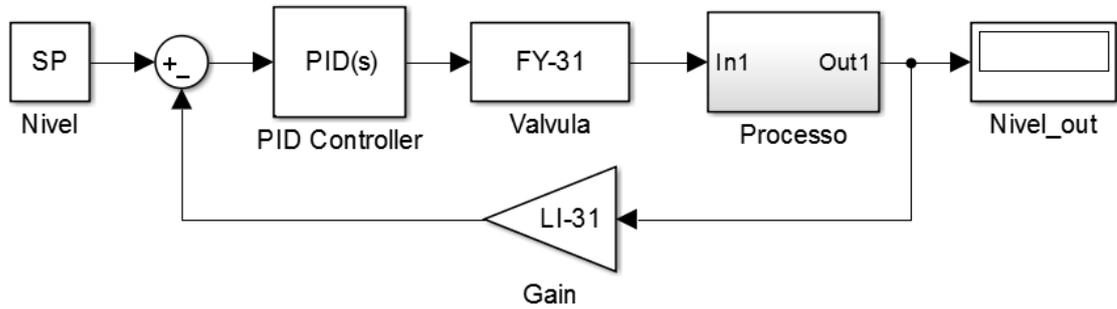
Figura 14 – Diagrama de Blocos Controle Vazão



Fonte: Elaborado pelo autor

Na malha de controle de nível foi utilizada a válvula de controle FY-31 e o medidor de nível LI-31 para fazer um controle por realimentação de modo a ter como *set-point* uma vazão desejada, conforme Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de Blocos Controle Nível

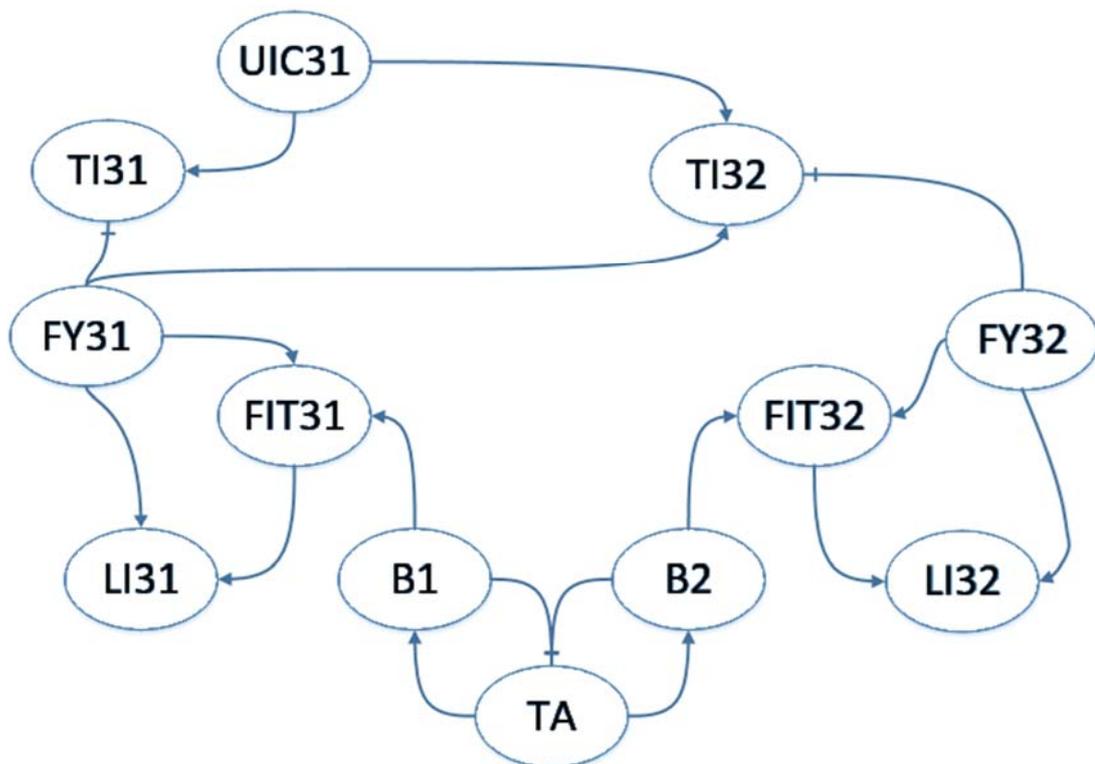


Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.1.2 Análise Estrutural

Para melhor compreensão das influências de uma variável sobre a outra no processo da planta didática Smar foi aplicada a técnica de modelagem estrutural com a teoria dos grafos conforme a Figura 16.

Figura 16 – Grafo Planta Didática Smar

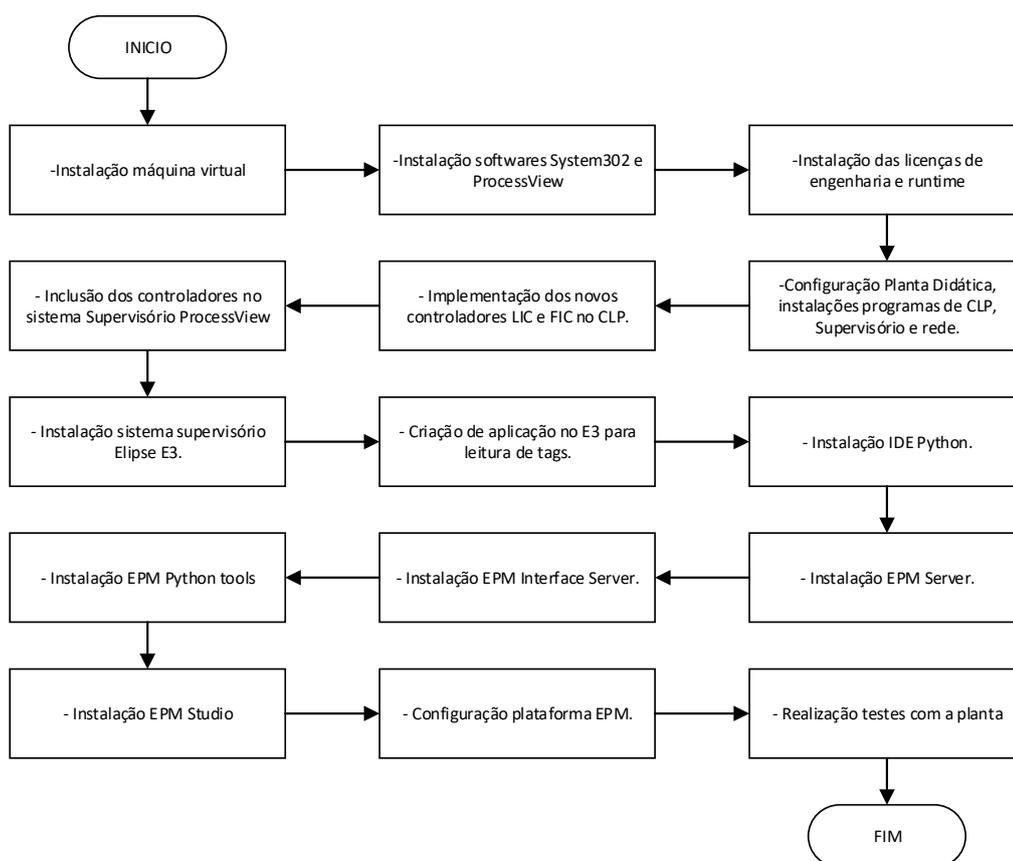


Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.2 Cenário para implementação das técnicas

Para que seja possível a análise das técnicas descritas neste estudo, foi necessário instalar e configurar os *softwares* da Planta Smar e Elipse de modo a possibilitar a troca de informações entre os sistemas, o fluxograma abaixo mostra os passos que foram realizados na preparação do sistema.

Figura 17 – Diagrama Blocos Preparação base testes



Fonte: Elaborado pelo autor

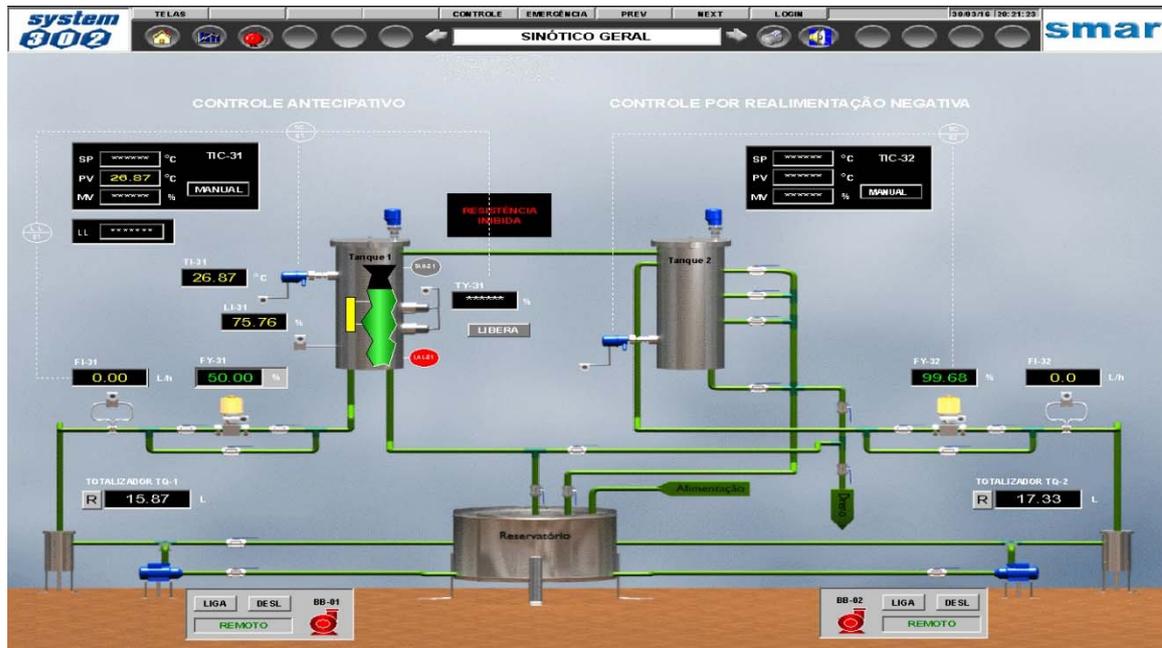
Inicialmente se preparou uma máquina virtual com os *softwares* necessários para este estudo de caso, feito isso foi instalada a plataforma System302 da SMAR, esta plataforma integrada possui além dos *softwares* de edição, configuração dos instrumentos e redes também possui o servidor OPC o qual possibilitou a troca de informações entre os sistemas SMAR e Elipse.

Para sistema de supervisão se utilizou o software ProcessView sendo esta a plataforma de Interface Homem-Maquina SMAR para a planta piloto.

Além da instalação dos *softwares* é preciso instalar as *hard keys* das licenças ProcessView e System302, instalando os drivers do fabricante das *hard keys* Sentinel.

Com a plataforma SMAR instalada e licenças conectadas se configurou o sistema SMAR, para isto foram realizados download das configurações de rede, e programa das CPUs. Ficando o sistema supervisório operando conforme Figura 18.

Figura 18 – Tela principal supervisório

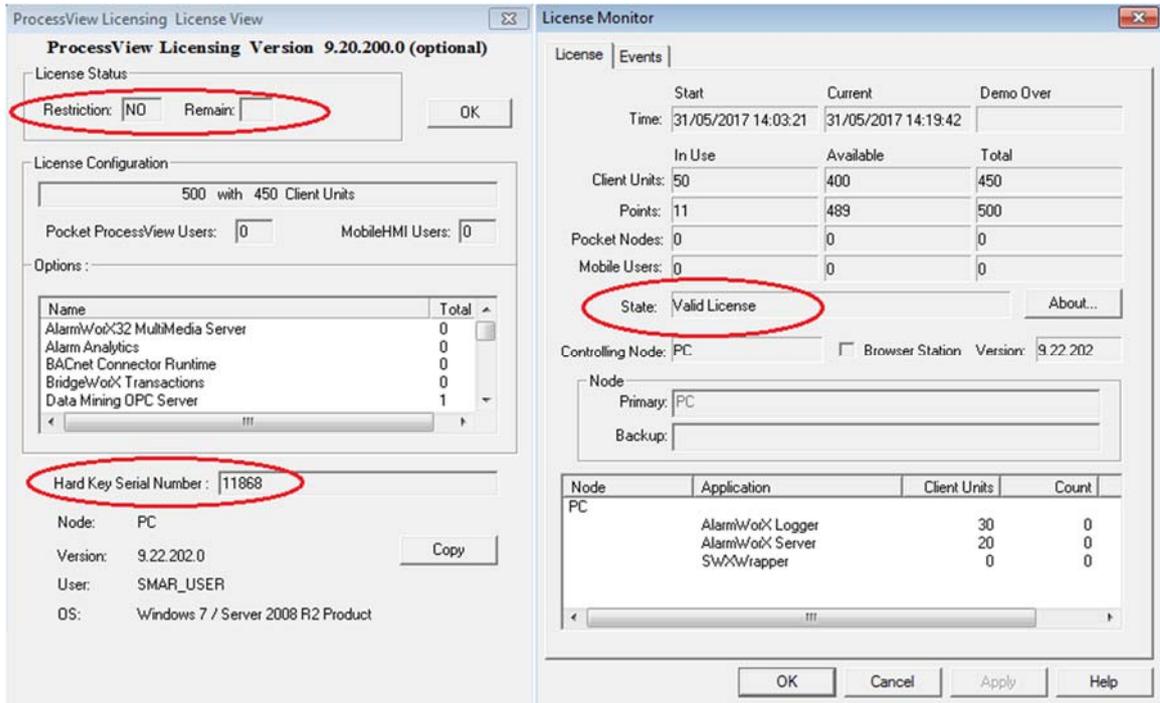


Fonte: Adaptado de SMAR

É possível identificar na imagem que existem alguns pontos com asterisco, isso ocorre devido ao sistema não ter reconhecido as licenças, devido as mesmas terem sido colocadas após o computador já estar ligado, para resolver basta reiniciar o sistema operacional com as chaves já plugadas no computador e a planta energizada.

Existem duas ferramentas que informam se a licença foi ou não reconhecida conforme Figura 19.

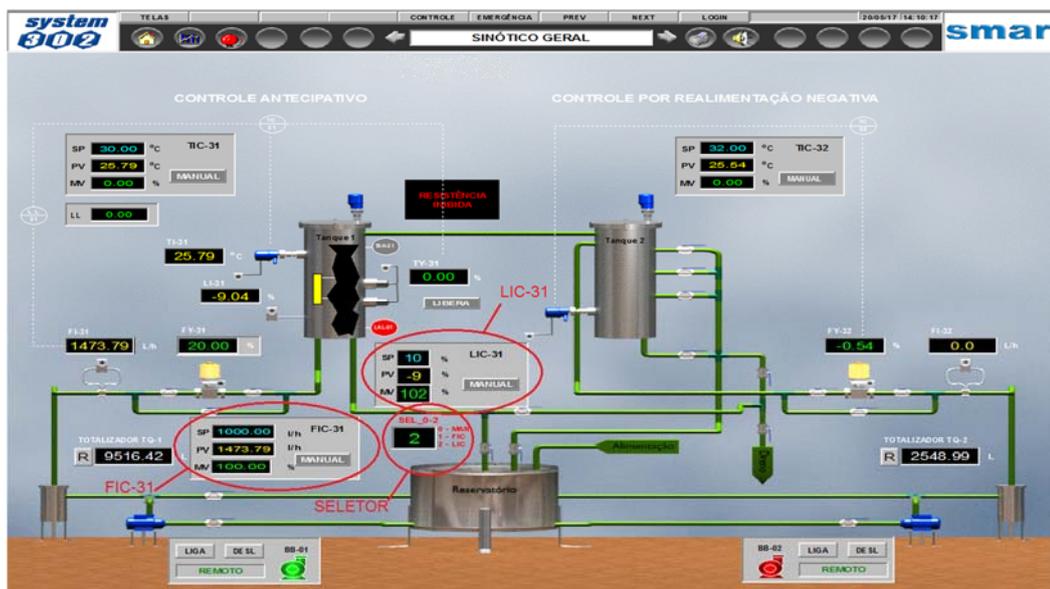
Figura 19 – Tela reconhecimento licenças



Fonte: Adaptado de SMAR

Para possibilitar os testes das malhas de vazão e temperatura foram implementados no controlador e sistema supervisorio SMAR estas estratégias de controle e incluso um campo para selecionar qual será utilizada, conforme Figura 20 abaixo:

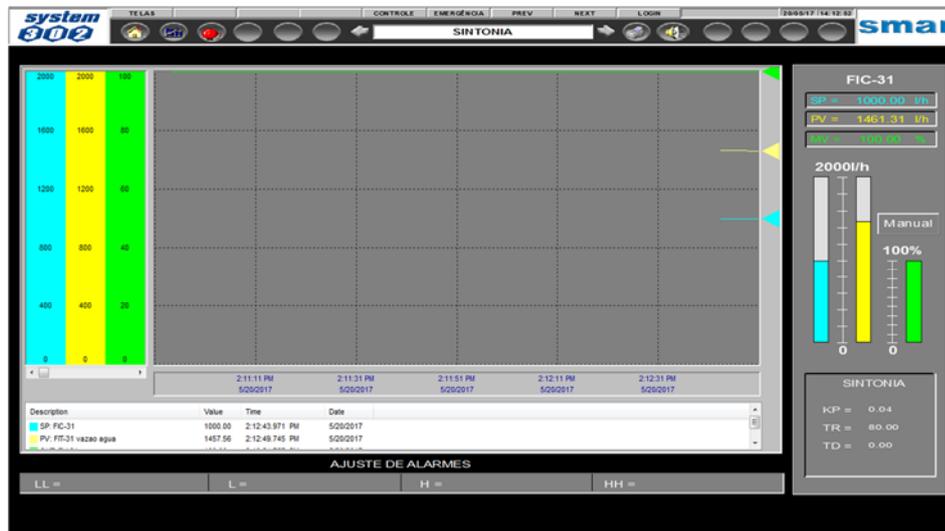
Figura 20 – Tela principal supervisorio com implementações



Fonte: Adaptado de SMAR

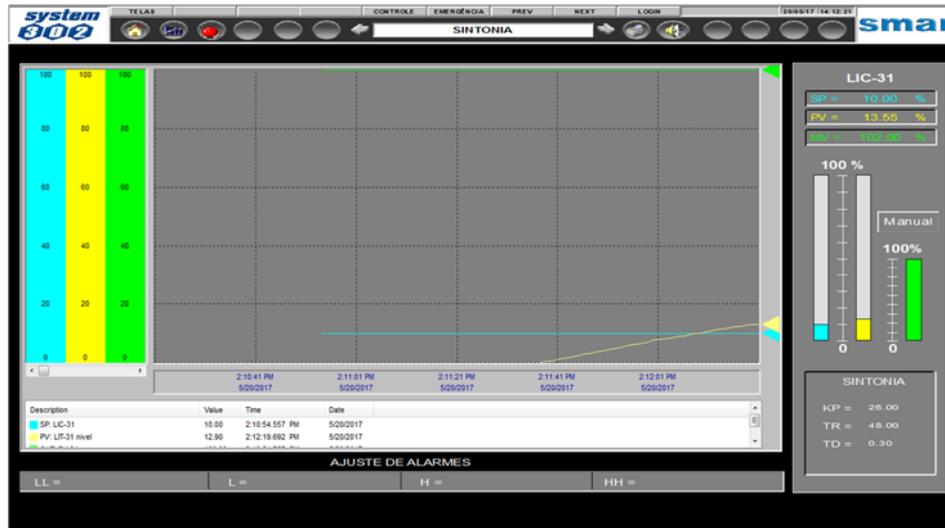
Para realizar a sintonia das novas malhas de controle foram implementadas duas telas de sintonia uma para cada malha conforme Figura 21 e Figura 22.

Figura 21 – Tela Sintonia FIC-31



Fonte: Adaptado de SMAR

Figura 22 – Tela Sintonia LIC-31



Fonte: Adaptado de SMAR

Após a conclusão desses passos a plataforma SMAR estava pronta para a realização dos ensaios.

Na plataforma Elipse, foram instalados o sistema Supervisorio E3, EPM Server, EPM Interface Server, EPM Python Tools e EPM Studio.

O E3 foi instalado para ser utilizado como *gateway*, foi criada uma aplicação no E3 para coletar os dados do sistema SMAR via OPC Server, conforme Figura 23.

Figura 23 – Tags driver OPC Elipse E3

Nome	ID do Item	Var...	Leitura?	Escrita?	Escala?	Min. UE	Máx. UE	UE	Min. E/S	Máx. E/S
TI-31	PD3_DF95-FFB1 NETIO.TIT_31		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
LI-31	PD3_DF95-FFB1 NETIO.LIT_31		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
FI-31	PD3_DF95-FFB1 NETIO.FIT_31		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
UIC-31	PD3_DF95-FFB1 NETIO.UIC_31		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
TI-32	PD3_DF95-FFB1 NETIO.TIT_32		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
FI-32	PD3_DF95-FFB1 NETIO.FIT_32		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
FY-31	PD3_DF95-FFB1 NETIO.FY_31_RB		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
FY-32	PD3_DF95-FFB1 NETIO.FY_32_RB		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
LIGA_BB1	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A01_00_LIGA_BB1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
DESL_BB1	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A01_01_DESL_BB1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
LIGA_BB2	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A01_03_LIGA_BB2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
DESL_BB2	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A01_04_DESL_BB2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
EMER_ACI0	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A00_04_EMER_ACI0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
EMER_LIBE	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A00_05_EMER_LIBE		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
LOCAL_REM	PD3_DF75-FFB1 IO.PD3_ED_LOCAL_REM		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
TESTE_LAMP	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A00_07_TEST_LAMP		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
CONV_LIB	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A01_06_CONV_LIB		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
CONV_INIB	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A01_07_CONV_INIB		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
A_M_Aquec	PD3_DF95-FFB1 VIRTUAL.A03_00_A_M_Aquec		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
A_M_Mat	PD3_DF95-FFB1 VIRTUAL.A03_00_A_M_Mat		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
LAH-S1	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A04_01_AL_TIT31D		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
LAL-S1	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A04_03_AL_LIT31D		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
CALA_ALARME	PD3_DF75-FFB1 VIRTUAL.A00_06_CALA_SIR		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
TIC31_SP	PD3_DF95-FFB1 FUNCTIONS.PID_3.SP		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
TIC32_SP	PD3_DF95-FFB1 FUNCTIONS.PID_4.SP		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
FIC31_SP	PD3_DF95-FFB1 FUNCTIONS.PID_5.SP		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
LIT_31_SP	PD3_DF95-FFB1 FUNCTIONS.PID_6.SP		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1
UIC_31	PD3_DF95-FFB1 FUNCTIONS.SMPL_5_0_1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1		0	1

Fonte: Adaptado de Elipse Studio

Após a configuração do E3 os *tags* foram adicionados no Elipse EPM, conforme Figura 24.

Figura 24 – Tags driver OPC Elipse E3

Name	Description	EU	Data Type	RT	REC	Compre...	RT-Value	RT-Timestamp	RT-Quality	Data Server	Data Address
FI_31		l/h	Float	FF	FF	FF	0	2017-05-31T15:28:08	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
LI_32		l/h	Float	FF	FF	FF	37,77703	2017-05-31T15:37:14	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
FY_31		%	Float	FF	FF	FF	-0,4712042	2017-05-31T15:35:44	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
LI_31		%	Float	FF	FF	FF	-12,53259	2017-05-31T15:37:14	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
TI_31		°C	Float	FF	FF	FF	23,67355	2017-05-31T15:37:14	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
TI_32		°C	Float	FF	FF	FF	20,64163	2017-05-31T15:37:14	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
UIC_31		%	Float	FF	FF	FF	0	2017-05-31T15:28:08	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
FIC31_SP		l/h	Float	FF	FF	FF	1000	2017-05-31T15:28:08	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
TIC31_SP		°C	Float	FF	FF	FF	30	2017-05-31T15:28:08	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
TIC32_SP		°C	Float	FF	FF	FF	32	2017-05-31T15:28:08	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
FIC31_SP		%	Float	FF	FF	FF	50	2017-05-31T15:28:08	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
FY_32		%	Float	FF	FF	FF	-0,2948169	2017-05-31T15:28:08	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...
UIC31		%	Float	FF	FF	FF	0	2017-05-31T15:28:08	Good	E3	E3_interface/DriverOPC...

Fonte: Adaptado de Elipse EPM

Com estes procedimentos descritos o sistema está pronto para a execução dos ensaios.

### 5.3 Sintonia das malhas de controle

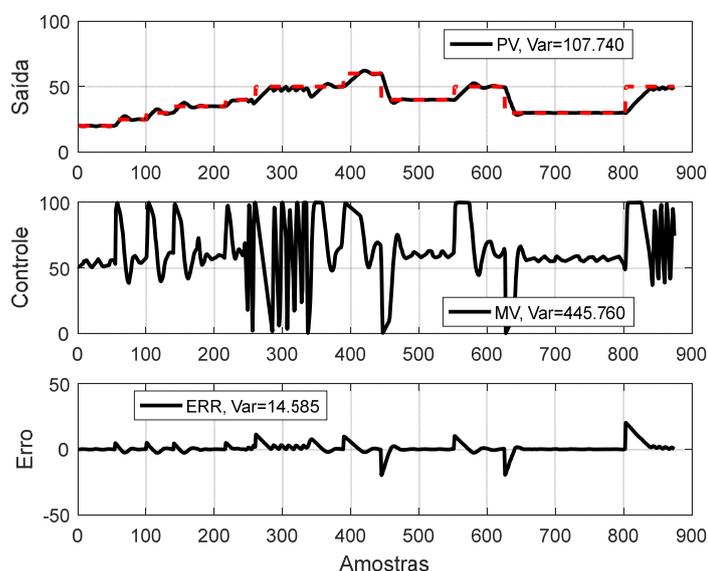
Nesta seção será apresentada a sintonia das malhas de controle utilizadas como base para os cenários de controle de nível e vazão.

#### 5.3.1 Sintonia da malha de nível LIC-31

As sintonias foram escolhidas de modo a representar as principais situações existentes na indústria, foram testados seguimentos de referência e aplicadas perturbações no processo, utilizando as válvulas manuais, de modo a aumentar ou diminuir a vazão de saída do tanque.

A malha de comportamento inadequado foi definida com parâmetros empíricos de modo a fazer com que a mesma apresente seguimento de referência, mas com um grande esforço de controle, foram aplicadas mudanças de *set-point* e perturbações na amostra 350, o comportamento desta malha está apresentado na Figura 25.

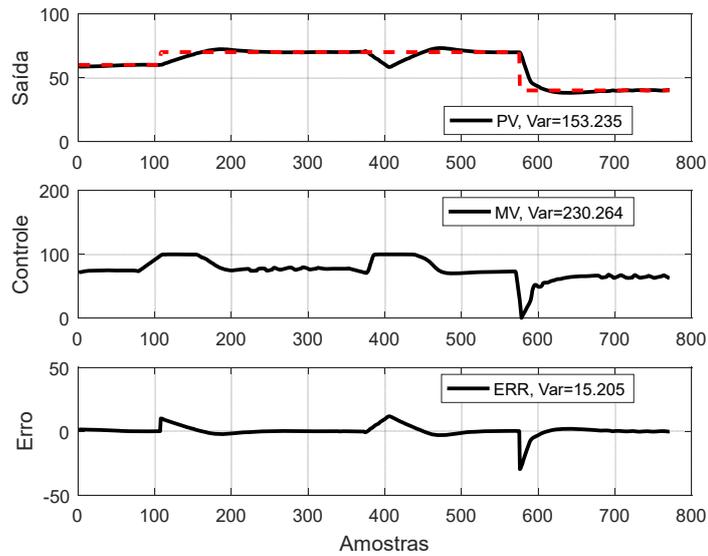
Figura 25 – Resposta da LIC-31, comportamento inadequado



Fonte: Adaptado elaborado pelo autor.

A malha com comportamento conservativa foi definida de modo a apresentar uma lenta resposta frente às mudanças de *set-point* e perturbações. Na amostra 400 foi aplicado um distúrbio na saída do tanque para representar um aumento na demanda consumida, a Figura 26 detalha este comportamento.

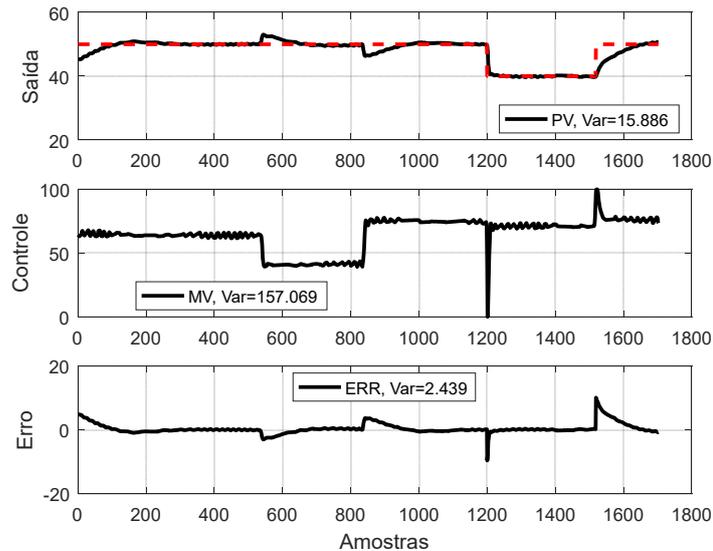
Figura 26 – Resposta da LIC-31, comportamento conservativo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A sintonia do controlador da malha com comportamento moderado foi calculada utilizando o método Lambda (não foi realizado um ajuste fino) com o objetivo deter um comportamento aceitável para esta aplicação. Nesta malha foram aplicados dois distúrbios sendo um na amostra 570 onde se reduziu o consumo de água do tanque e após o controlador ter se recuperado se aplicou um novo distúrbio na amostra 820 onde se aumentou o consumo, a Figura 27 demonstra o comportamento descrito.

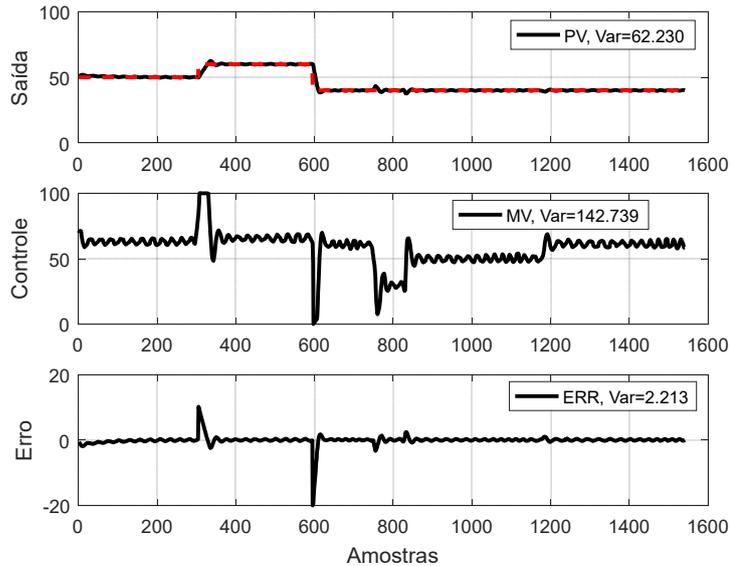
Figura 27 – Resposta da LIC-31, comportamento moderado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na malha com comportamento agressivo os parâmetros de sintonia foram modificados de modo a se obter uma rápida resposta do atuador frente às mudanças de referência e perturbações. Nas amostras 770, 820 e 1200 foram aplicadas perturbações na vazão de saída do tanque de modo a representar as variações de consumo, sendo este comportamento demonstrado pela Figura 28.

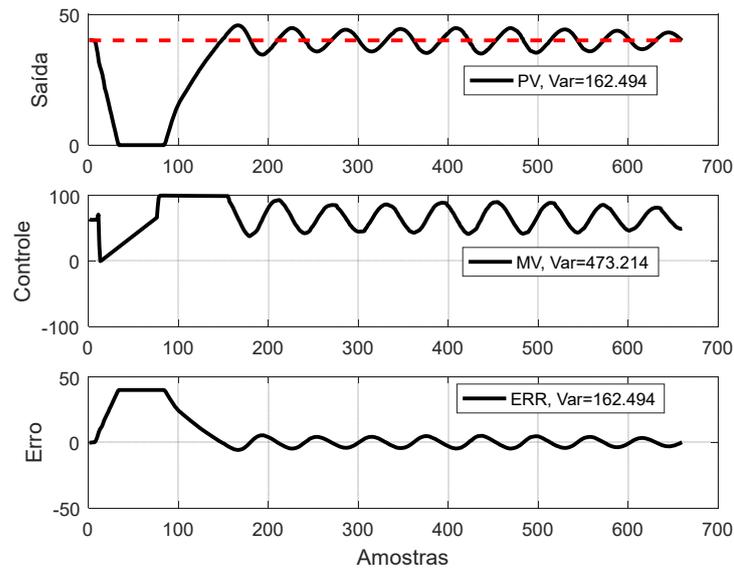
Figura 28 – Resposta da LIC-31, comportamento agressivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha oscilatória tem como principal objetivo validar os indicadores de oscilações representando um caso mais extremo onde a mesma se encontra oscilando ao redor da referência e com alto esforço de controle, neste caso provocando um alto desgaste dos atuadores e diminuindo sua vida útil, a Figura 29, demonstra este comportamento.

Figura 29 – Resposta da LIC-31, comportamento oscilatório



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta os valores dos parâmetros de sintonia utilizados nestas malhas de controle.

Tabela 8 – Sintonia malhas de nível.

Sintonia Parâmetro	Inapropriada	Moderada	Conservativa	Agressiva	Oscilatória
Kc	18,52	1,01	0,026	1,01	0,03
Ti	16,51	0,1	0,038	0,01	0,038
Td	0	5	5	5	5

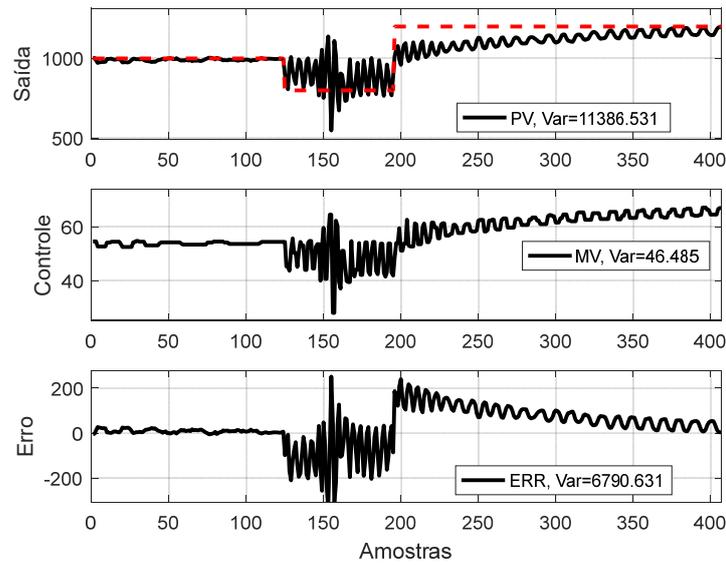
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.3.2 Sintonia da malha de vazão FIC-31

As sintonias foram escolhidas, assim como no cenário anterior de modo a representar as principais situações existentes na indústria, sendo testados seguimentos de referência e aplicadas perturbações no processo.

A malha com comportamento inapropriado, teve sua sintonia realizada de forma empírica, seguindo os padrões anteriores onde a mesma apresentava um seguimento de referência, mas com grande esforço de controle, a malha estava apresentando um comportamento aceitável até que foi aplicada uma mudança na referência, apresentando um comportamento oscilatório conforme Figura 30.

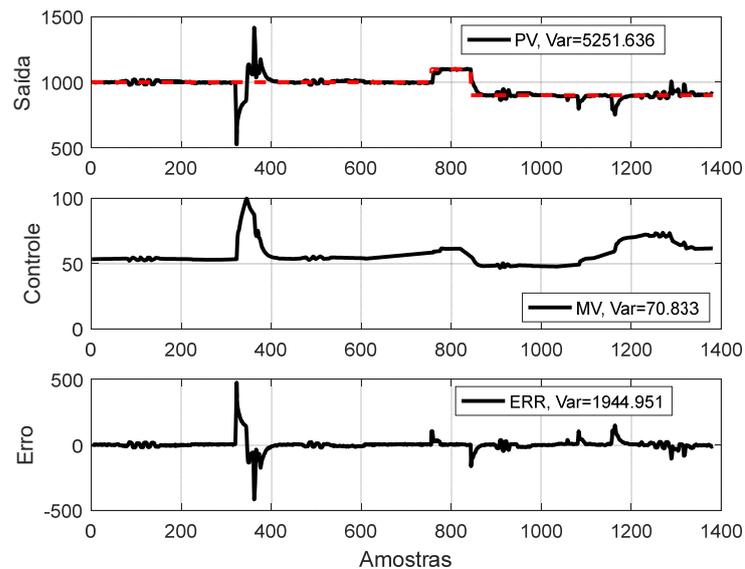
Figura 30 – Resposta da FIC-31, comportamento inapropriado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha com comportamento moderado teve sua sintonia calculada utilizando o método Lambda, de modo a se ter um comportamento aceitável para a aplicação de controle de vazão, foram aplicados seguimentos de referência e perturbações nas amostras 380, 1100, 1150 e 1300 tendo seu comportamento apresentado pela Figura 31.

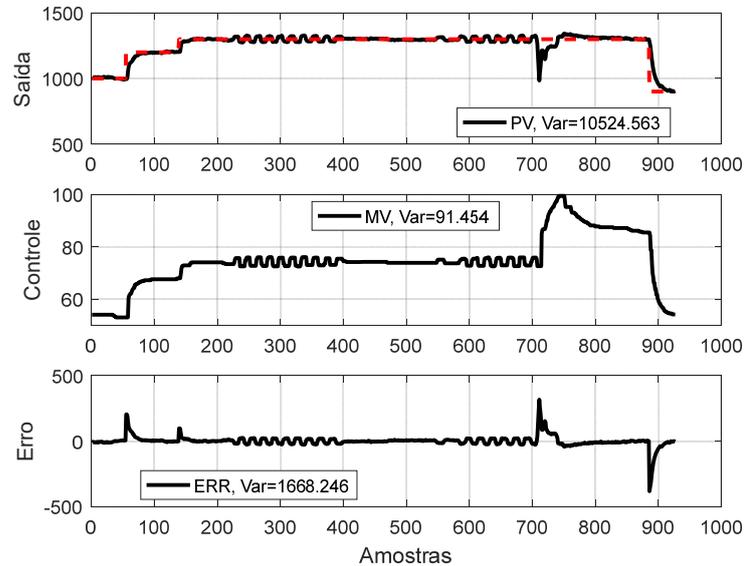
Figura 31 – Resposta da FIC-31, comportamento moderado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha com comportamento conservativo foi definida de modo a apresentar uma resposta mais lenta frente as mudanças de referencia e aplicação de distúrbios, sendo aplicado um distúrbio na amostra 710, conforme apresentado pela Figura 32.

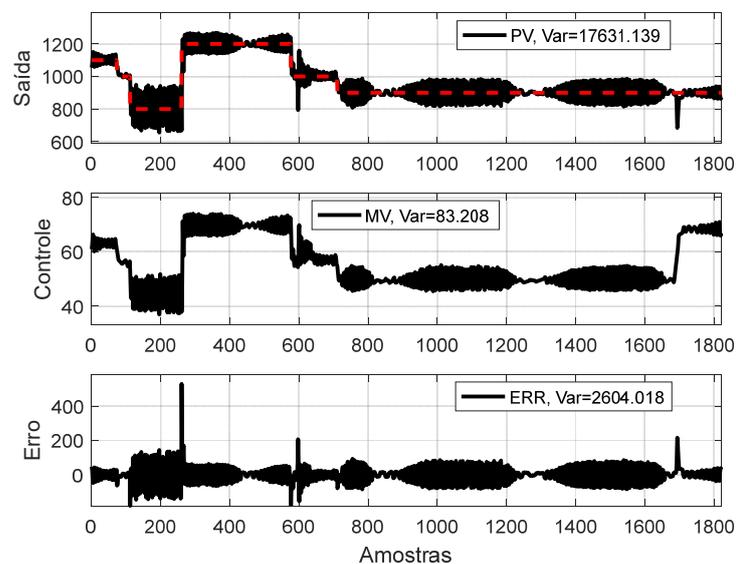
Figura 32 – Resposta da FIC-31, comportamento conservativo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha com comportamento oscilatório assim com no caso anterior foi inclusa com o objetivo de testar os indicadores de oscilação, mas neste caso o comportamento apresentou um elevado grau de oscilação e esforço de controle, a Figura 33 demonstra esse comportamento.

Figura 33 – Resposta da FIC-31, comportamento oscilatório



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros utilizados nos distintos cenários são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Sintonia malhas de vazão.

Sintonia Parâmetro	Inapropriada	Moderada	Conservativa	Oscilatória
Kc	0,01	0,02	0,0083	0,01
Ti	1	2	2	1,5
Td	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor.

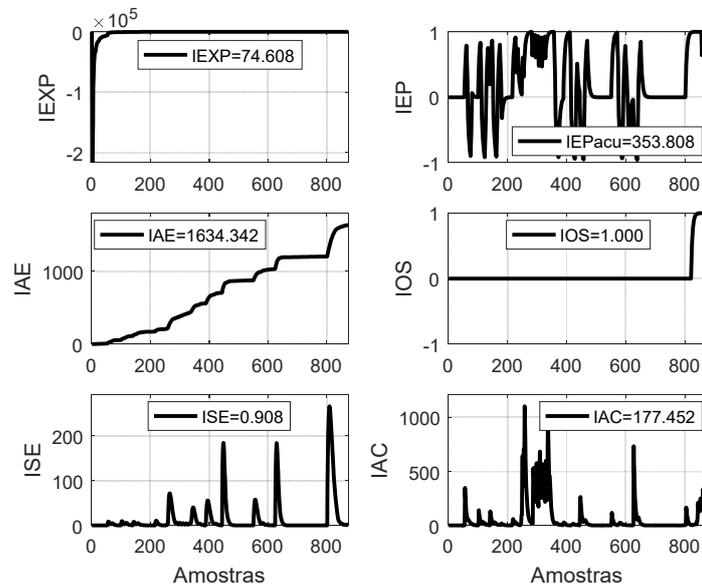
#### 5.4 Avaliação dos indicadores desempenho

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de desempenho frente aos cenários de nível e vazão apresentados no capítulo anterior.

##### 5.4.1 Avaliação da malha de nível LIC-31

Para os cenários apresentados foram aplicados os indicadores que avaliam o desempenho das malhas de controle frente a operação em estado estacionário, a primeira malha a ser analisada foi a de nível com comportamento inapropriado, tendo seus resultados apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Desempenho da LIC-31, comportamento inapropriado

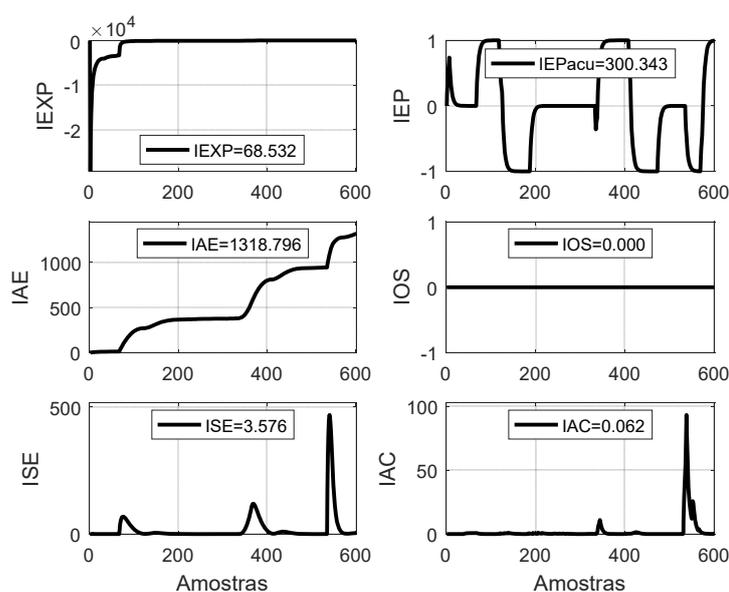


Fonte: Adaptado elaborado pelo autor.

O indicador de integral do erro Expert Tune (IEXP) sugere que a malha de controle tem 74,6% a melhorar, analisando a Figura 25 é possível identificar que a resposta está coerente com a malha de controle que está seguindo referência, mas com grande esforço de controle. Os indicadores baseados na integral do erro IAE e ISE, apresentaram um erro acumulado assim como o indicador IEP que avalia erro permanente, devido este cenário possuir muitos seguimentos de referência. O indicador de ação de controle (IAC) apresentou uma resposta adequada a uma malha que está operando com elevado esforço de controle.

A malha de comportamento conservativo, está apresentando um seguimento de referência muito bom, este fato também fez com que os indicadores apresentem resultados coerentes com a malha analisada, os indicadores de erro permanente e ação de controle identificaram um grande esforço da malha de controle para manter o seguimento de referência, os resultados estão apresentados na Figura 35.

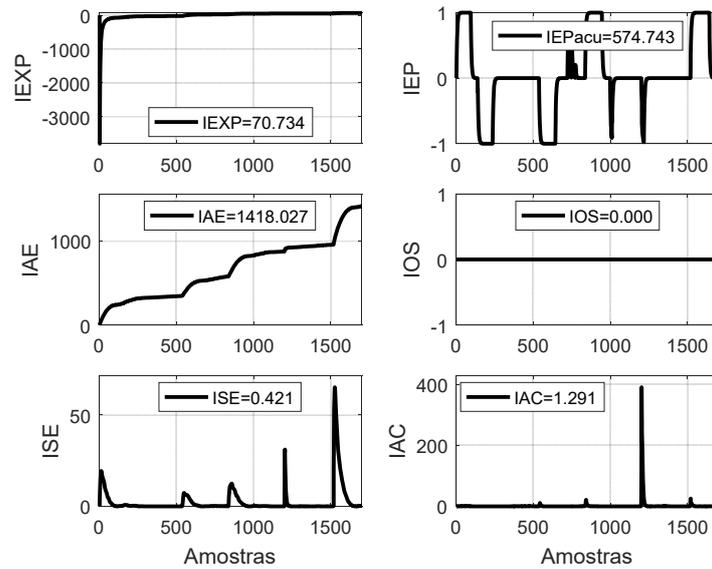
Figura 35 – Desempenho da LIC-31, comportamento conservativo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A malha de desempenho moderado foi a que apresentou menor erro em regime permanente destas malhas de nível, mas mesmo assim o indicador IEXP nos mostra que esta ainda tem 70,7% de potencial para melhorar conforme resultados na Figura 36.

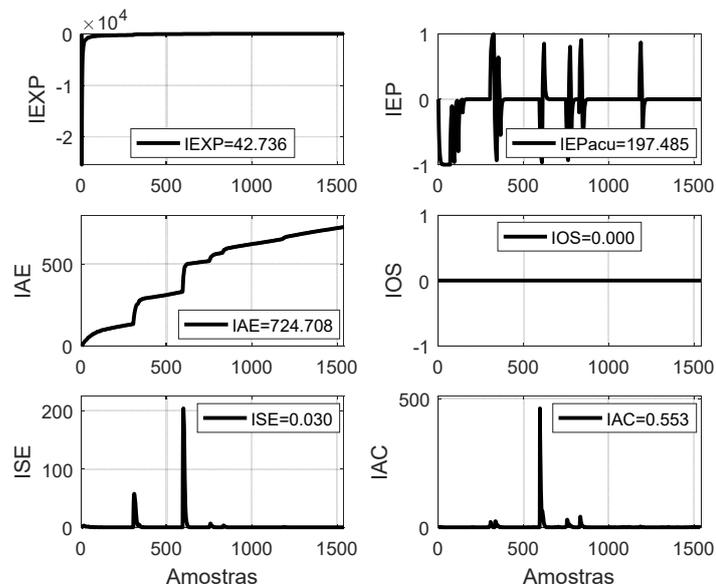
Figura 36 – Desempenho da LIC-31, comportamento moderado



Fonte: Adaptado elaborado pelo autor.

A malha de comportamento agressivo foi a que apresentou o melhor resultado frente a estes indicadores, tanto no IEXP quanto no IEP, isso se deve ao fato desta malha estar respondendo de forma rápida as varrições nas referências e perturbações conforme é mostrado na Figura 37.

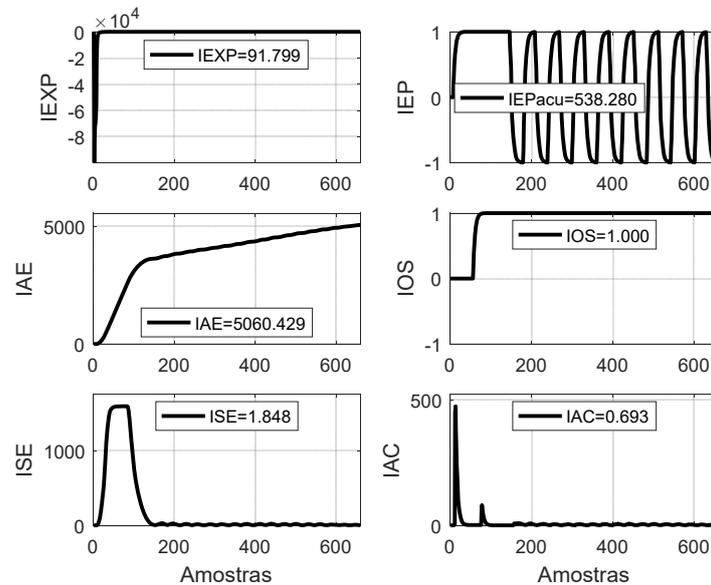
Figura 37 – Desempenho da LIC-31, comportamento agressivo



Fonte: Adaptado elaborado pelo autor.

A malha de comportamento oscilatório apresentou grande erro em regime permanente, importante ressaltar que o indicador de oscilação IOS identificou que a malha está oscilatória, conforme resultados da Figura 38.

Figura 38 – Desempenho da LIC-31, comportamento oscilatório.



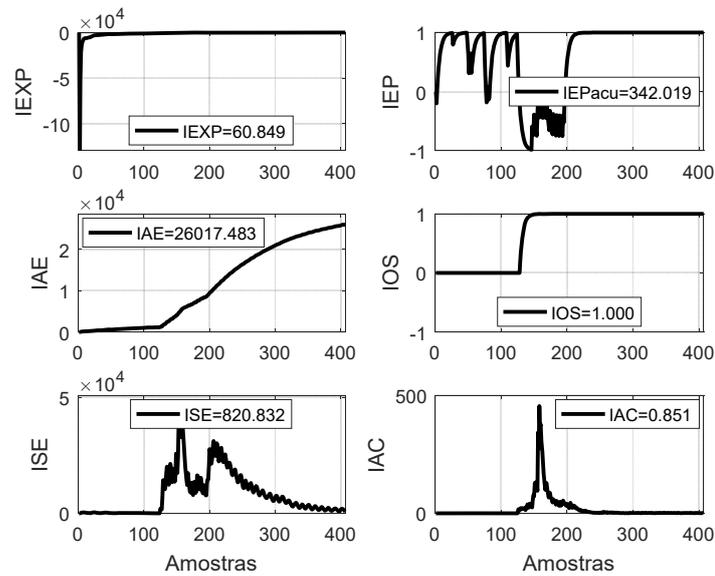
Fonte: Adaptado elaborado pelo autor.

#### 5.4.2 Avaliação da malha de vazão FIC-31

Para a malha de controle de vazão foram realizados ensaios similares aos realizados na malha de nível.

A primeira análise foi realizada em uma malha de nível com comportamento inadequado, esta malha estava com comportamento oscilatório sendo este identificado pelo indicador de oscilação, com relação ao indicador de integral do erro absoluto este retornou um valor muito maior se comparado com os demais cenários, isto se deve ao fato de as malhas de vazão possuírem uma amplitude de sinal maior nas variáveis de processo, conforme resultados apresentados na Figura 39.

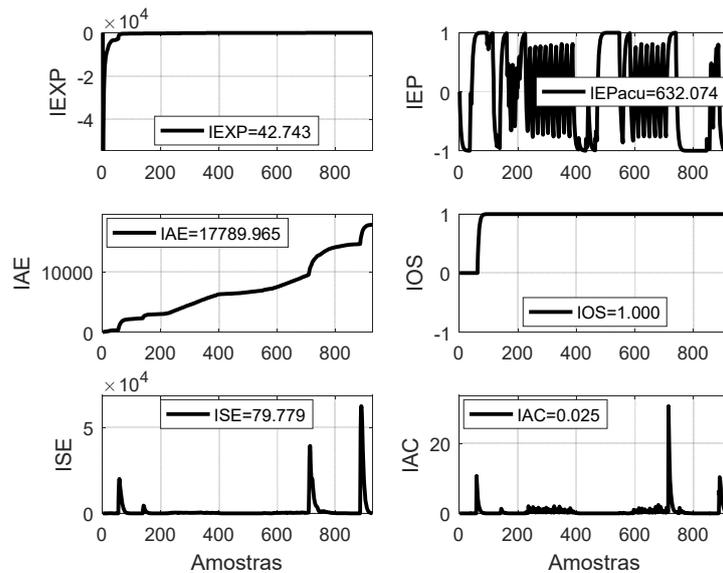
Figura 39 – Desempenho da FIC-31, comportamento inapropriado



Fonte: Adaptado elaborado pelo autor.

A malha de comportamento conservativo se mostrou estar com pouco erro em regime permanente, interessante neste ensaio é que a o indicador de oscilações apresentou um comportamento de malha oscilatório, ao se analisar a Figura 32 é possível notar que existe sim uma pequena oscilação na malha após esta receber uma mudança de referência, conforme descrito na Figura 40.

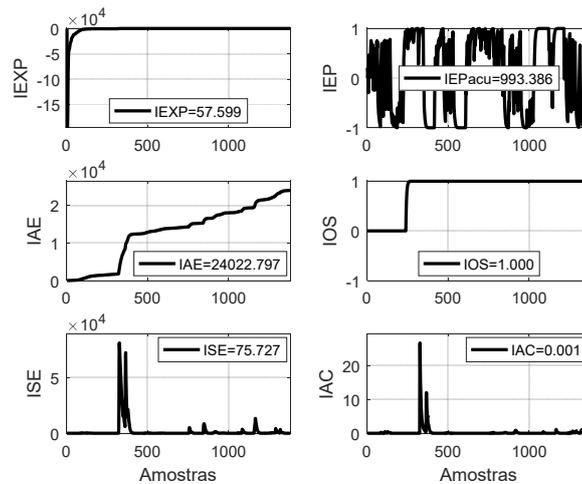
Figura 40 – Desempenho da FIC-31, comportamento conservativo



Fonte: Adaptado elaborado pelo autor.

A malha de comportamento moderado apresentou um elevado erro em regime, e um potencial de melhora de 57,6%, esta resposta ocorreu devido a sintonia apresentar oscilações após as perturbações, inclusive o indicador de oscilações detectou essas pequenas oscilações, também é importante ressaltar que o indicador IAC esta mostrando que existe uma baixa ação de controle para manter a malha em operação como pode ser visto na Figura 41.

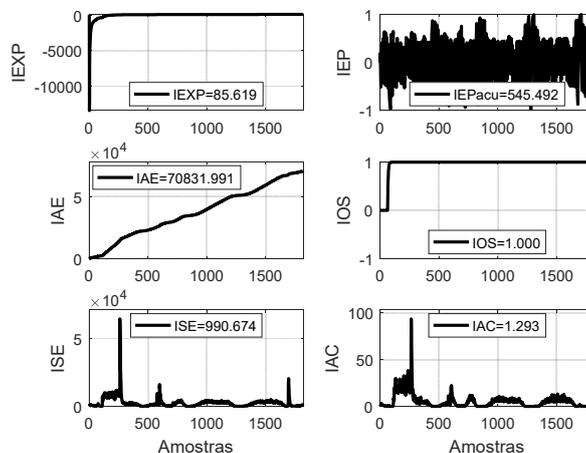
Figura 41 – Desempenho da FIC-31, comportamento moderado



Fonte: Adaptado elaborado pelo autor.

Para a malha oscilatória os resultados foram bem condizentes, o IEXP nos mostra que a malha tem um potencial para melhorar de 85,62%, o IEP apresentou erro acumulador em regime de ordem 545,49, e o indicador de oscilação retornou a informação de que a malha de controle estava oscilando, conforme Figura 42.

Figura 42 – Desempenho da FIC-31, comportamento oscilatório



Fonte: Adaptado elaborado pelo autor.

As tabelas a seguir nos mostram um resumo dos resultados de cada indicador de desempenho analisado nas malhas de nível e vazão.

Tabela 10 – Indicadores desempenho malha de nível.

Sintonia Indicador	Inapropriado	Conservativo	Moderado	Agressivo	Oscilatória
IEXP	74,608	68.532	70.73	42,74	91,80
IAE	1634,34	1318,79	1418,03	724,71	5060,43
ISE	0,908	3.57	0,421	0,030	1,85
IEPacu	353,81	300,34	574,74	197,48	538,28
IAC	177,452	0,062	1,29	0,553	0,693
VARY	107,74	153,23	15,89	62,23	162,49
VARU	445,76	230,26	157,07	142,74	473,21
ISHUNTA	0,6	0,55	0,79	0,66	0,55

Fonte: Elaborado pelo autor

O indicador IEXP apresentou todos os resultados coerentes com a sintonia analisada, e nos indica que a melhor malha é a de comportamento agressivo.

Se considerarmos os indicadores de integral do erro todos também apontam para a malha de controle agressiva como sendo a melhor do conjunto analisado.

O indicador de Shunta deixou as malhas de controle em padrões muito próximos, mas a que melhor se comportou do ponto de vista de Shunta foi a malha de controle moderada.

Tabela 11 – Indicadores desempenho malha de vazão.

Sintonia Indicador	Inapropriado	Conservativo	Moderado	Oscilatória
IEXP	60,85	42,74	57,60	85.62
IAE	26017,48	17789,96	24022,80	70831,99
ISE	820,83	79,78	75727,73	990,674
IEPacu	342,02	632,07	993,39	545,49
IAC	0,851	0,025	0,001	1,293
VARY	11386,53	10524,56	5251,64	17631,14
VARU	46,485	91,454	70,83	83,21
ISHUNTA	0,56	0,21	0,34	0,4

Fonte: Elaborado pelo autor

Na malha de vazão a que melhor se comportou do ponto de vista do IEXP foi a de comportamento conservativo, neste caso este indicador não levou em consideração as oscilações presentes nesta configuração de malha de controle.

Com relação aos indicadores de integral do erro estes também apontaram para a malha conservativa, ou seja, convergiram para a mesma sintonia assim como na malha de nível.

Do ponto de vista de Shunta todas as malhas estão com baixa qualidade na sintonia, mas o que chama mais atenção é o fato de Shunta apontar a malha com melhor comportamento como sendo a de sintonia inapropriada, neste caso não se mostrou um bom indicador para avaliar malhas de vazão.

## **5.5 Avaliação da sintonia do controlador PID**

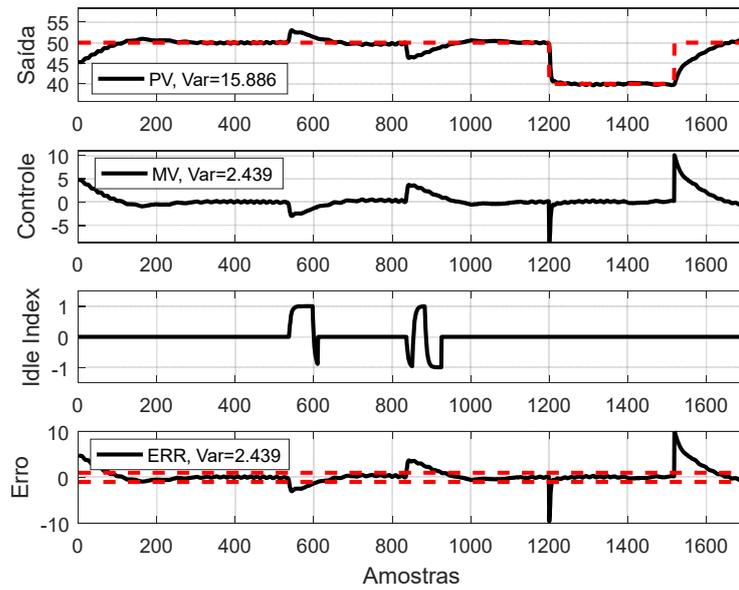
A avaliação da sintonia dos controladores será realizada com base no indicador de Idle, o qual avalia a sintonia frente as perturbações e desconsidera nos seguimentos de referencia.

### **5.5.1 Avaliação da malha de nível LIC-31**

A primeira sintonia a ser avaliada foi a sintonia de comportamento moderado, analisando a Figura 27 é possível identificar que o indicador retornou “um” nas amostras 580 e 820 isso significa que a sintonia está lenta frente as perturbações nestes instantes, no restante do intervalo o indicador retornou zero pois neste intervalo analisado a malha não recebeu nenhuma perturbação, somente segmento de referencia e este não é considerado por Idle.

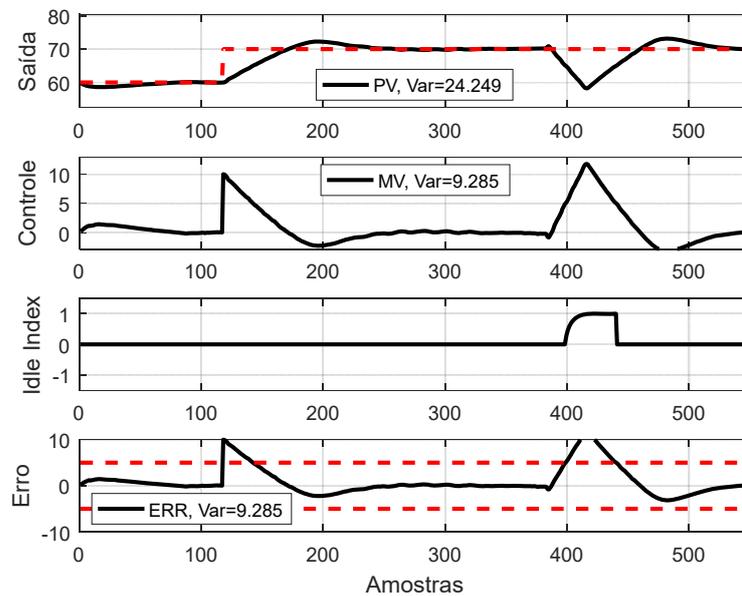
A malha de comportamento conservativo, esta com o indicador retornando zero em grande parte de seu período amostrado, indicando valor unitário somente na amostra 420 que foi quando recebeu uma perturbação, neste caso a malha apresenta comportamento conservativo conforme já era esperado, a Figura 44 nos mostra o resultado deste indicador.

Figura 43 – Desempenho da LIC-31, comportamento moderado



Fonte: Elaborado pelo autor.

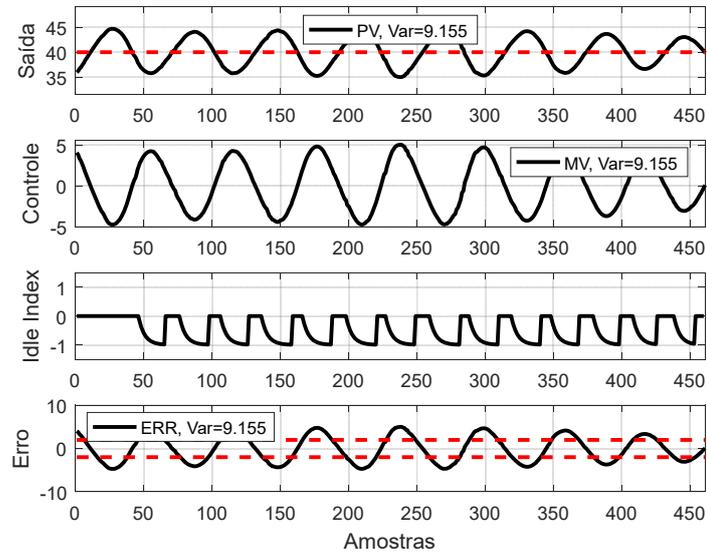
Figura 44 – Desempenho da LIC-31, comportamento conservativo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a malha de comportamento oscilatório o indicador retornou o valor de -1, que neste caso indica um resultado incerto onde a malha pode estar bem sintonizada ou ser oscilatória.

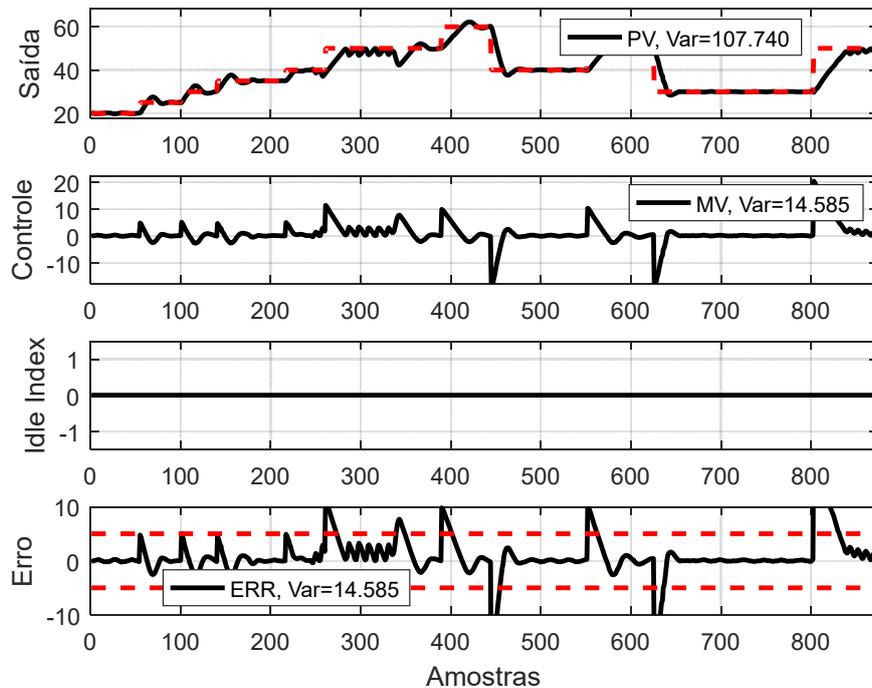
Figura 45 – Desempenho da LIC-31, comportamento oscilatório



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a malha de comportamento inapropriado o indicador retornou zero por todo o período de amostragem, devido a este não ter sofrido nenhuma perturbação durante o período analisado. A Figura 46 nos mostra o comportamento deste indicador.

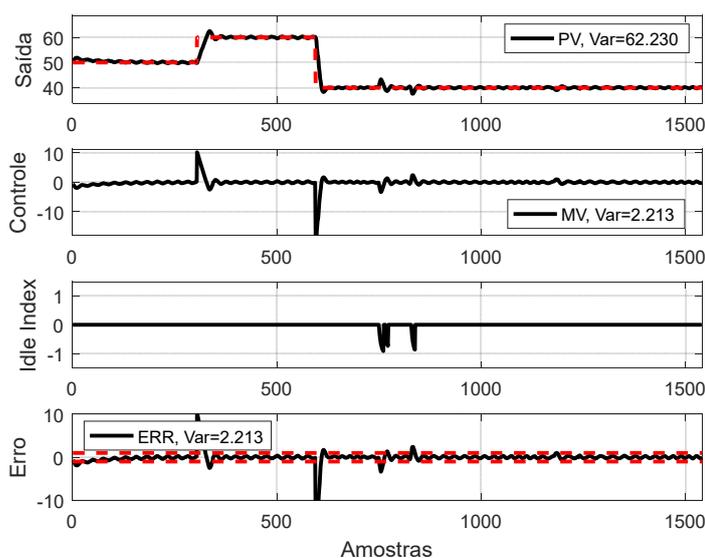
Figura 46 – Desempenho da LIC-31, comportamento inapropriado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a malha de comportamento inapropriado o indicador retornou um valor próximo de -1 nas amostras 700 e 800, exatamente neste instante o controlador recebeu uma perturbação, então devido a isso nos retornou esta resposta que pode indicar que a malha está oscilatória ou muito rápida, a Figura 47 nos mostra o comportamento deste indicador perante a esta malha agressiva.

Figura 47 – Desempenho da LIC-31, comportamento agressivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

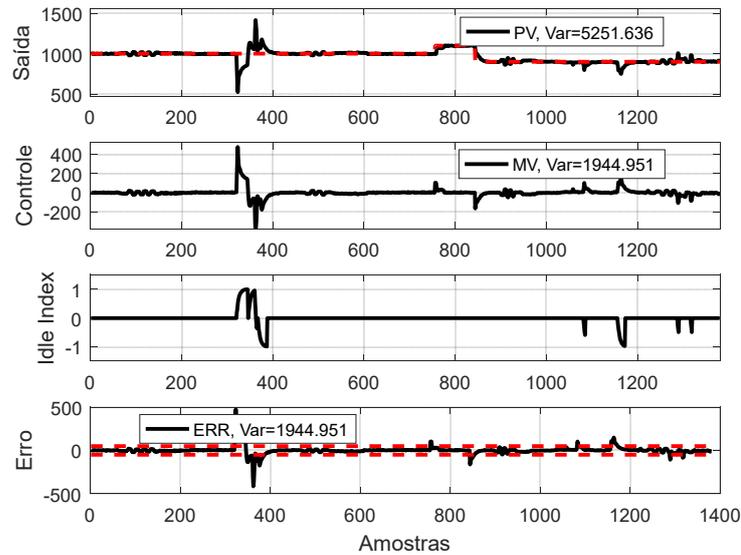
### 5.5.2 Avaliação da malha de vazão FIC-31

A malha de vazão será avaliada seguindo os padrões realizados na malha de nível.

A primeira a ser avaliada é a sintonia de comportamento moderado, neste caso o indicador retornou valores próximos de -1 e 1, isto significa que esta malha está apresentando resultado incerto.

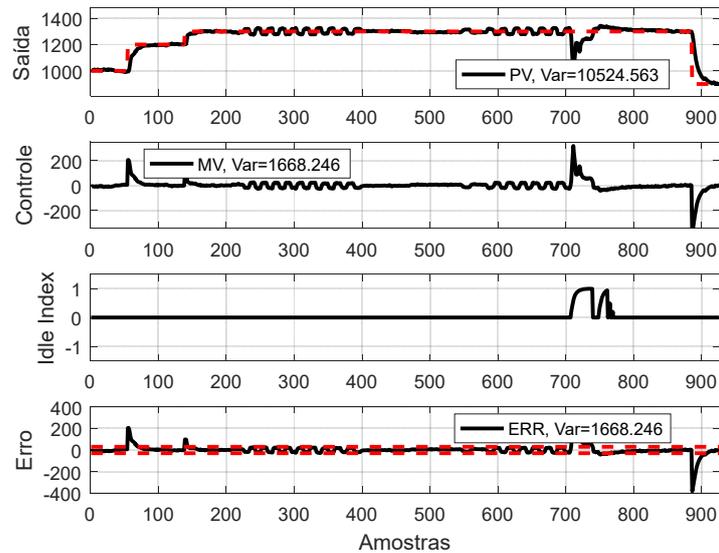
Ao analisar a malha de comportamento conservativo o indicador nos retornou um valor de próximo de 1, ou seja, a malha possui um comportamento lento, conforme já era esperado, a Figura 49 nos mostra o comportamento desta resposta.

Figura 48 – Desempenho da FIC-31, comportamento moderado



Fonte: Elaborado pelo autor.

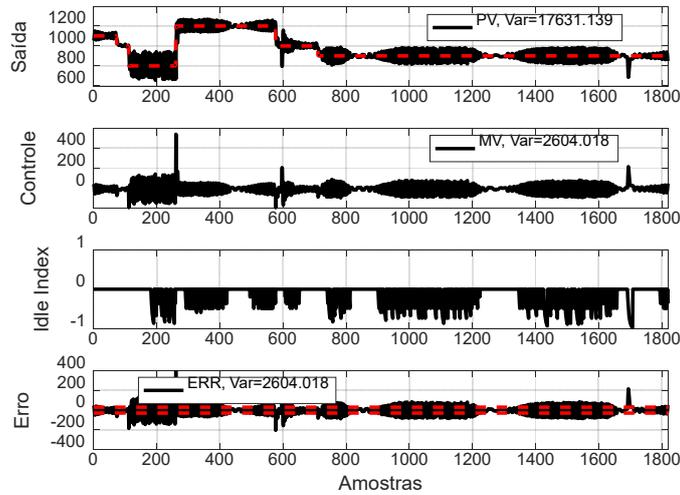
Figura 49 – Desempenho da FIC31, comportamento conservativo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao avaliar a malha de comportamento oscilatório o indicador retornou como valores muito próximos de -1, desta forma a mesma pode apresentar um comportamento oscilatório ou muito rápido, a Figura 30 descreve o comportamento deste indicador frente a uma malha oscilatório.

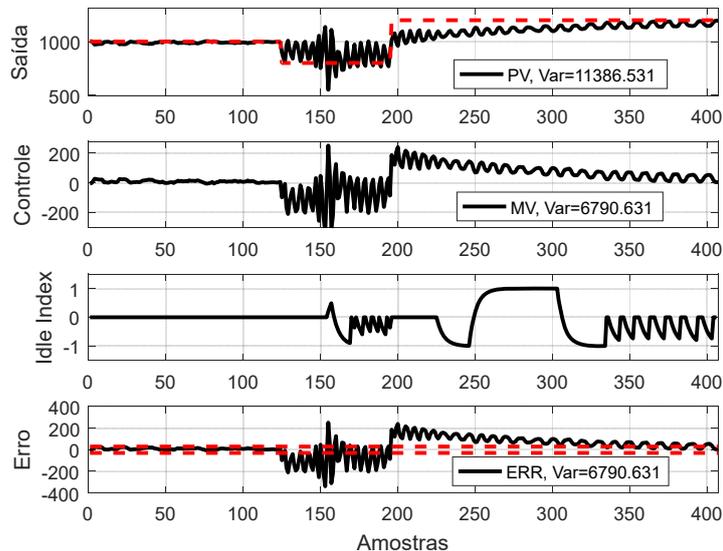
Figura 50 – Desempenho da FIC-31, comportamento oscilatório



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a malha com comportamento inapropriado, o indicador nos retornou valores ente -1 e 1, sendo este um resultado incerto, isto ocorreu devido a esta malha estar com um comportamento oscilatório. A Figura 51 nos descreve este comportamento.

Figura 51 – Desempenho da FIC-31, comportamento inapropriado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

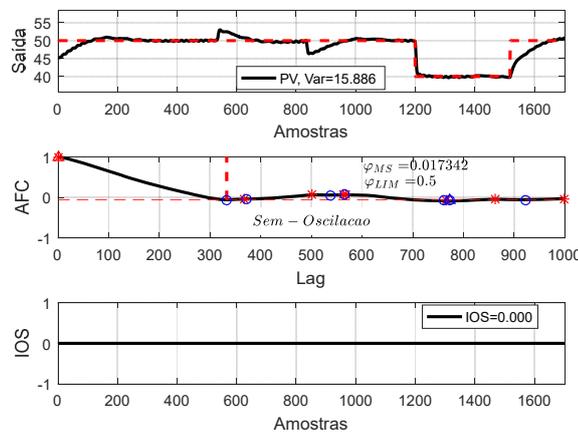
## 5.6 Avaliação da detecção de oscilações

Nesta seção as malhas de nível e vazão serão analisadas pelos indicadores de detecção de oscilações.

### 5.6.1 Avaliação da malha de nível LIC-31

Ao analisar a malha de comportamento moderado, os indicadores retornaram que a mesma não possui oscilação, sendo esta característica mostrada na Figura 52.

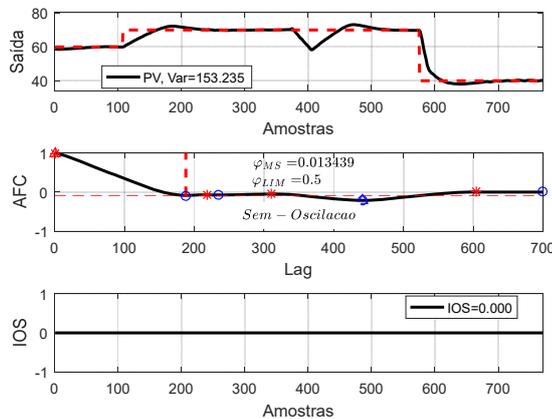
Figura 52 – Desempenho da LIC-31, comportamento moderado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisarem a malha de comportamento conservativo os indicadores retornaram que a malha está sem oscilação, conforme já era esperado, a Figura 53 mostra os resultados desta análise.

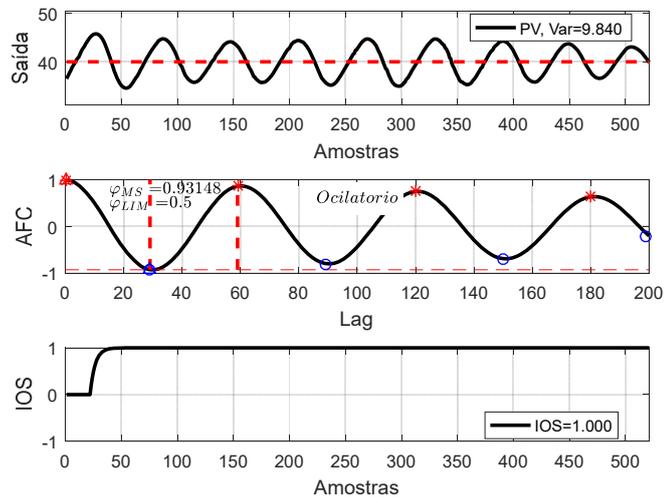
Figura 53 – Desempenho da LIC-31, comportamento conservativo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a malha oscilatória ambos os indicadores apontaram que a malha possui oscilações, conforme já se era esperado, o comportamento esta descrito na Figura 54.

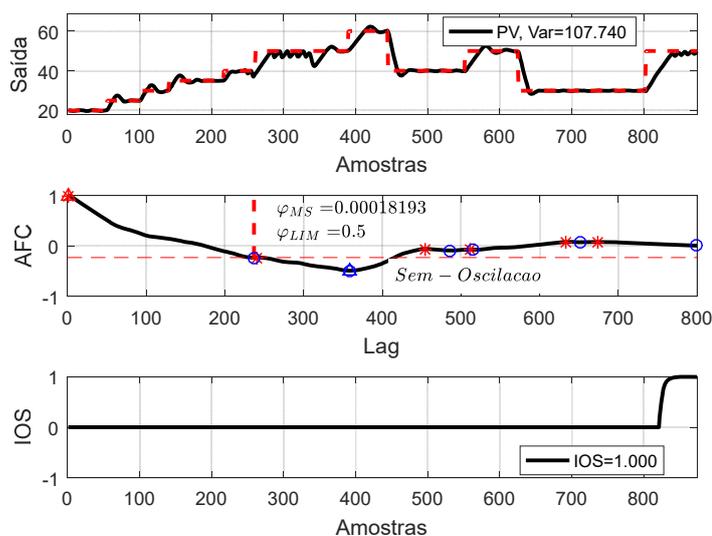
Figura 54 – Desempenho da LIC-31, comportamento oscilatorio



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar a malha de nível com sintonia inapropriada, o indicador de Miao não detectou oscilações, já o indicador de Hangglud detectou oscilação a partir da amostra 810 conforme descrito na Figura 55.

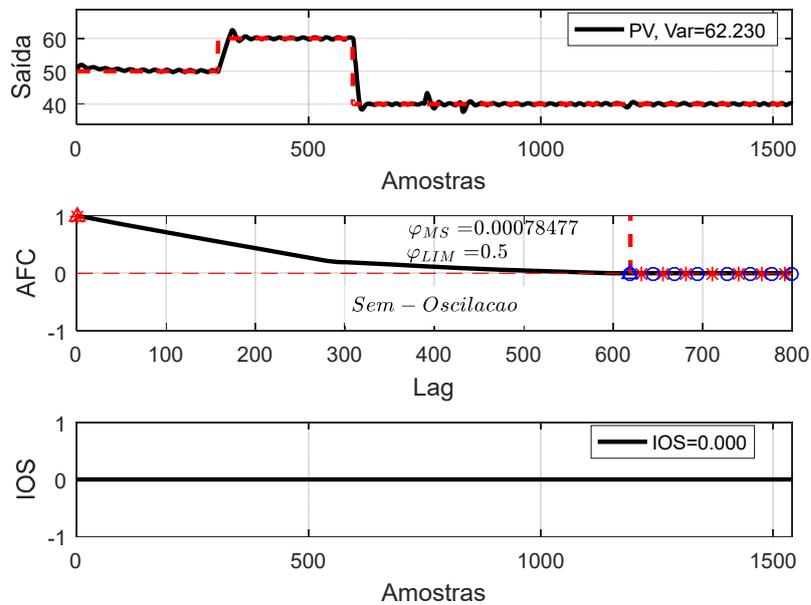
Figura 55 – Desempenho da LIC-31, comportamento inapropriado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao testar os indicadores frente a a malha com comportamento agressivo, ambos retornaram que não existiam oscilações, sendo esta a resposta esperada, conforme Figura 56.

Figura 56 – Desempenho da LIC-31, comportamento agressivo



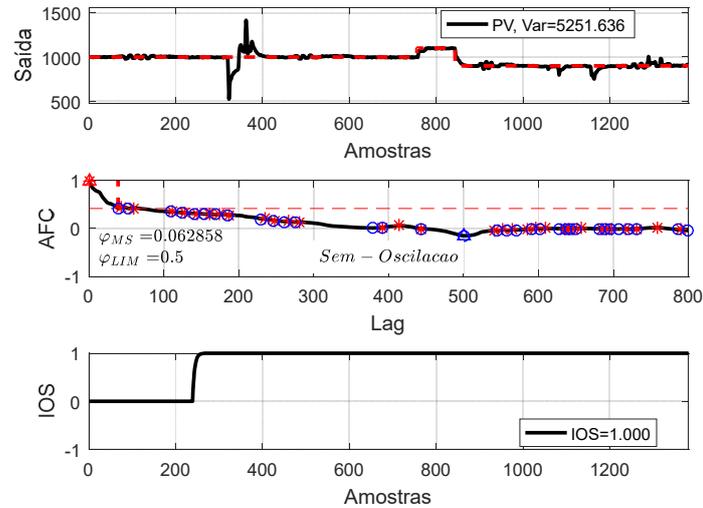
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 5.6.2 Avaliação da malha de vazão FIC-31

As malhas de vazão foram testadas frente aos indicadores de oscilações de modo a se identificar o comportamento dos indicadores.

A primeira malha a ser testada é a de sintonia moderada, esta malha possui oscilações nas amostras 100, 500 e uma perturbação foi aplicada na amostra 370, ambos detectados pelo método de Hangglud, mas não foram detectas pelo método de Miao, conforme comportamento descrito na Figura 57.

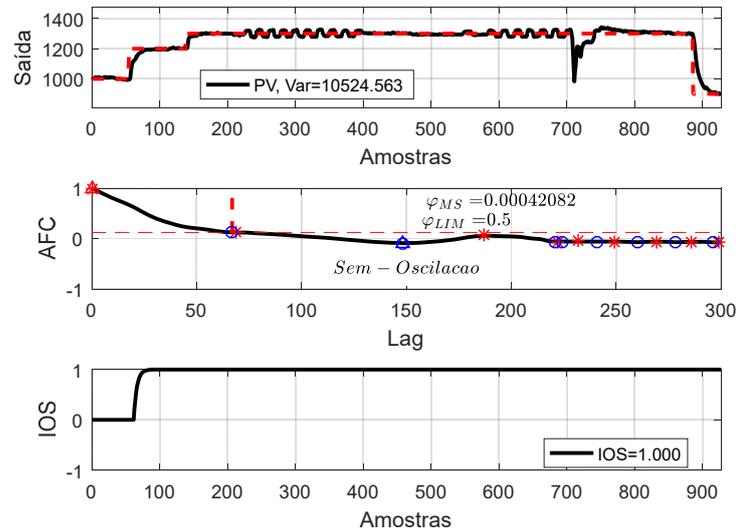
Figura 57 – Desempenho da FIC-31, comportamento moderado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando os métodos de detecção de oscilações na malha de vazão com comportamento conservativo, o método de Hangglud detectou as pequenas oscilações existentes a partir das amostras 200 e 600, mas o método de Miao não detectou, conforme descrito na Figura 58.

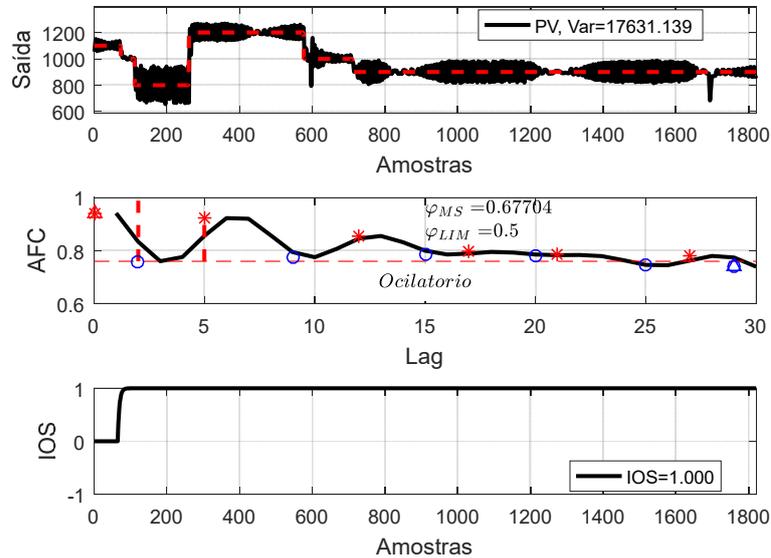
Figura 58 – Desempenho da FIC-31, comportamento conservativo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aplicando os indicadores na malha de comportamento oscilatório, ambos detectaram as oscilações conforme esperado, a Figura 59, descreve o comportamento destes indicadores frente a malha oscilatória.

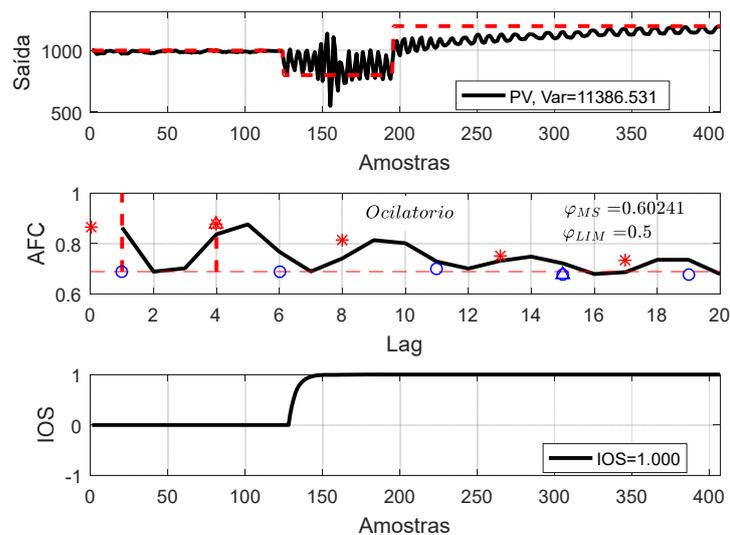
Figura 59 – Desempenho da FIC-31, comportamento oscilatório



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para finalizar os ensaios, os indicadores de oscilações foram submetidos a uma malha com comportamento inapropriado, esta malha possuía oscilação em parte do período de amostragem, sendo que ambos os indicadores detectaram estas oscilações, conforme descrito na Figura 60.

Figura 60 – Desempenho da FIC-31, comportamento inapropriado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 12 mostra um resumo com os resultados dos indicadores de oscilação e de avaliação de sintonia das malhas de nível.

Tabela 12 – Indicadores avaliação sintonia malha de nível.

Sintonia Indicador	Inapropriado	Conservativa	Moderada	Agressiva	Oscilatória
IDLE	0	1	1	-1	-1
IOS	1	0	0	0	1
IMIAO	0	0,013	0,017	0	0,92
	Sem Osc	Sem Osc.	Sem Osc.	Sem Osc.	Oscilatória

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos ensaios realizados é possível concluir que o indicador Idle de sintonia precisa sempre trabalhar em conjunto com um indicador de oscilações para os casos onde este retorna um valor igual a -1 que é uma resposta incerta podendo ser uma malha oscilatória ou muito rápida.

O indicador de Hangglud (IOS) se mostrou ser mais sensível a detecção de pequenas oscilações se comparado com o indicador de Miao.

A Tabela 13 mostra um resumo com os resultados dos indicadores de oscilação e de avaliação de sintonia referente as malhas de vazão.

Tabela 13 – Indicadores avaliação sintonia malha de vazão.

Sintonia Indicador	Ruim	Conservativa	Moderada	Oscilatória
IDLE	-1/1	1	-1	-1
IOS	1	1	1	1
IMIAO	0,602	0	0,062	0,67
	Oscilatória	Sem Osc.	Sem Osc.	Oscilatória

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os resultados dos indicadores aplicados a malha de vazão é possível identificar que o indicador de avaliação de sintonia de Idle se mostrou inconclusivo frente a malha mal sintonizada, pois indicou comportamento irregular, nas malhas moderada e oscilatória a resposta também, também foi inconclusiva pois o indicador retornou -1. Fazendo uma análise do indicador de Idle em conjunto com

as técnicas de detecção de oscilações é possível concluir que as malhas de controle possuem sim oscilações durante o período amostrado sendo que o indicador de Hangglud detecta oscilações de amplitude menores, isso explica o fato de na malha com comportamento moderado ter acontecido de um indicador ter detectado oscilações e outro não.

## 6 CONCLUSÕES E POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS

Conforme o objetivo geral deste trabalho, apresentou-se um estudo e a implementação de técnicas para detecção de oscilações, análise de desempenho de malhas de controle. Os algoritmos foram testados frente a diversos cenários similares aos existentes na indústria de modo a validar o funcionamento dos mesmos.

Em relação aos desenvolvimentos realizados, mediante os estudos efetuados, este trabalho apresenta:

- Estudo de funcionamento da planta didática SMAR para aplicação das estratégias de controle de nível, vazão e temperatura.
- Desenvolvimento de uma guia de operação da planta SMAR de modo a simplificar os passos necessários para colocar o sistema em operação.
- Estudo da plataforma Elipse EPM para comunicação com a planta didática SMAR, criação de banco de dados e aplicação de datasets para avaliação dos dados existente no banco de dados.
- Integração das tecnologias Elipse EPM, Matlab, Python com a plataforma SMAR System302.
- Desenvolvimento dos algoritmos de detecção de oscilações e análise de desempenho de malhas de controle.
- Validação dos resultados frente aos diversos cenários similares aos existentes na indústria.

Este trabalho foi de grande importância, pois proporcionou o conhecimento das técnicas de auditoria de malhas de controle, de uma nova ferramenta utilizada no gerenciamento de processos industriais e manutenção de ativos, além de possibilitar a utilização de ferramentas de supervisão, controle e análise de banco de dados atuais e presentes no ambiente industrial, assim como instrumentação, válvulas e controladores industriais presentes na planta piloto Smar.

### 6.1 Conclusões do Trabalho

A implementação da metodologia mostrou-se adequada para o desenvolvimento do trabalho com foco no objetivo geral, por meio do cumprimento dos objetivos específicos.

Em relação aos resultados obtidos, pode se concluir que:

Os indicadores de desempenho baseados em variância mínima, como por exemplo o de Shunta aplicado neste estudo, servem para se ter uma base de como está a malha de controle. Possibilitam que a malha seja comparada com um padrão referencial, tornando possível visualizar o quanto ainda se pode melhorar no desempenho da malha de controle, entretanto estes indicadores são teóricos e podem na prática nunca atingir o desempenho ótimo.

Os algoritmos de detecção de oscilações de Miao e Hangglud são uma ótima ferramenta para se detectar de forma automática a presença de perturbações oscilatórias, sendo que o método de Hangglud identifica oscilações de pequena amplitude, já o método de Miao se comportou de uma maneira menos sensível a presença de pequenas oscilações. Em ambos os métodos a definição da janela de monitoramento é um parâmetro fundamental para a apropriada identificação das oscilações.

O indicador para avaliar a sintonia de controladores PID por meio do índice *Idle* foi certo na avaliação, no entanto, a implementação direta do trabalho publicado Hägglund (1999), requer uma série de outras tecnologias para funcionar adequadamente, por exemplo, a filtragem dos sinal, uma técnica para identificação de perturbações, algoritmos para evitar a avaliação da sintonia durante mudanças de referencia, nos modos transitórios e em modos em regime permanente onde o desempenho seja aceitável e de uma técnica para identificar oscilações, este conjunto de técnicas minimiza o surgimento de falsos positivos e negativos na avaliação da sintonia da malha.

## 6.2 Possibilidades de Trabalhos Futuros

Como extensão desta pesquisa, para trabalhos futuros sugere-se que sejam implementados estes algoritmos e outros para operação em modo *online*, no sistema EPM de modo que os algoritmos fiquem durante todo o tempo analisando a série temporal em uma janela e caso ocorra algum problema na malha de controle este já sinalize para o operador tomar uma providência.

Também seria muito interessante que a Universidade instale um medidor de nível no tanque de mistura da planta didática SMAR, de modo a possibilitar que sejam implementadas estratégias de controle, onde o nível do tanque é submetido a um fluxo

controlado com base na variação de fluxo de entrada e saída do mesmo através das válvulas automáticas.

## REFERÊNCIAS

ANDRZEJ W. ORDYS, D. U., MICHAEL A. JOHNSON. **Process Control Performance Assessment From Theory to Implementation**. Springer. 2007

ÅSTRÖM, K. J. **Introduction to Stochastic Control Theory**. 1970.

BARBOSA, T. A.; BARROS, P. R. Comparativo de desempenho de controladores PID utilizando o índice de Harris. **SICOMP 2011**, 2011.

CARVALHO, M. A. G. D. Teoria dos Grafos - Uma Introdução. UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, 2005. Disponível em: < [http://www.ft.unicamp.br/~magic/ft024/apografos\\_ceset\\_magic.pdf](http://www.ft.unicamp.br/~magic/ft024/apografos_ceset_magic.pdf) >. Acesso em: 13 de Junho de 2016.

COELHO, A. A. R. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. 2004.

COOPER, D. J. **Practical Process Control using Loop-Pro Software**. Control Station, Inc., 2005.

COUGHRAN, M. T. **Lambda Tuning the universal method for PID controllers in process control**. <http://www.controlglobal.com/assets/13WPpdf/131022-coughran-controllers.pdf> 2013.

DESBOROUGH, L.; HARRIS, T. Performance assessment measures for univariate feedback control. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, p. 1186-1197, 1992.

DUARTE-RAMOS, H. Fundamentos do Controlo Digital. **Eletricidade**, p. 175-185, 2000.

ELIPSE, C. Elipse EPM. 2016. Disponível em: < <http://www.elipse.com.br/port/epm.aspx> >.

FORSMANN, K.; STATTIM, A. A new criterion for detecting oscillations in control loops. **European Control Conference**, 1999.

HÄGGLUND, T. A. A Control-Loop Performance Monitor. **Control Engineering Practice**, p. 1543-1551, 1995.

HARRIS, T. J. Assessment of Control Loop Performance. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. Volume 67, 1989.

HARRIS, T. J.; SEPPALA, C. T.; DESBOROUGH, L. D. A review of performance monitoring and assessment techniques for univariate and multivariate control systems. **Journal of Process Control** 9, n. Elsevier, p. 1-17, 1999.

HUANG, B.; SHAH, S. L. Performance limits: practical control loop performance assessment. **Proceedings of AIChE Annual Meeting**, 1996.

HUANG, B.; SHAH, S. L. **Performance Assessment of Control Loops - Theory and Applications**. Springer, 1999.

JAMSA-JOUNELA, S.-L. et al. Evaluation of control performance: methods, monitoring tool and applications in a flotation plant. **Minerals Engineering**, v. 16, p. 1069–1074, 2003.

JEFFERY, H. **Loop checking: A technicians's guide**. ISA – Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2005.

JELALI, M. **Control Performance Management in Industrial Automation - Assessment, Diagnosis and Improvement of Control Loop Performance**. Springer, 2013.

KARRA, S.; KARIN, M. N. Comprehensive methodology for detection and diagnosis of oscillatory control loops. **Control Engineering Practice**, v. 17, p. 939-956, 2009.

MACHADO, G. G. **Avaliação de Métricas de Detecção de Oscilação em Malhas de Controle**. 2013. Engenharia Química, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

MATSUO, T.; SASAOKA, H.; YAMASHITA, Y. Detection and Diagnosis of Oscillations in Process Plants. n. Springer, p. 1258-1264, 2003.

MEJÍA, R. I. G. **Métodos para a Análise do Desempenho e da Robustez de Processos Industriais Orientados a Dados: Abordagem Determinística e Estocástica**. 2008. (Doctorado). Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

MEJIA, R. I. G. et al. Auditoria de Malhas de Controle em Processos Industriais. **Congresso Brasileiro de Automática CBA 2008**, v. Vol. 1, n. Book Editora, p. 160-217, 2008.

MIAO, T.; SEBORG, D. E. Automatic Detection of Excessively Oscillatory Feedback Control Loops. **IEEE**, 1999.

MICHIGAN, U. O. Chemical Process Dynamics and Controls Book I. 2007. Disponível em: < [http://open.umich.edu/sites/default/files/chemical\\_process\\_dynamics\\_and\\_controlsbook\\_1.pdf](http://open.umich.edu/sites/default/files/chemical_process_dynamics_and_controlsbook_1.pdf) >. Acesso em: 09 de Abril de 2016.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice Hall, 1997.

PUHLMANN, H. Processamento Digital de Sinais - DSP - Parte 2. 2014. Disponível em: < <http://www.embarcados.com.br/processamento-digital-de-sinais-dsp-parte-2/> >. Acesso em: 21/06.

SALSBURY, T. I.; SINGHAL, A. A New Approach for ARMA Pole Estimation Using Higher-Order Crossings. **American Control Conference**, 2005.

SHUNTA, J. P. **Achieving World Class Manufacturing Through Process Control**. 1995.

SMAR. **Manual de Operação Planta Didática III** 2004.

\_\_\_\_\_. Planta Didática Hart, Foundation Fieldbus e PROFIBUS. 2016 2016. Disponível em: < <http://www.smar.com/brasil/produto/pd3-planta-didatica-hart-foundation-fieldbus-e-profibus> >.

THORNHILL, N. F.; CHOUDHURY, M. A. A. S.; SHAH, S. L., The impact of compression on data-drive analysis and process understanding. **Control Engineering Practice**, p. 389-398, 2004.

THORNHILL, N. F.; HUANG, B.; ZHANG, H. Detection of Multiple Oscillations in Control Loops. **Journal of Process Control** **13**, p. 91-100, 2003.

THORNHILL, N. F.; OETTINGER, M.; FEDENCZUK, P. Refinery-wide control loop performance assessment. **Journal of Process Control** **9**, n. Elsevier, p. 109-124, 1999.

YANG, F. et al. **Capturing Connectivity and Causality in Complex Industrial Processes**. Springer, 2014.

## ANEXO A

### GUIA DE OPERAÇÃO PLANTA DIDÁTICA SMAR

Elaborado por: Diego Balsante Lopes.

Curso: Engenharia Elétrica

Disciplina: TCC II 2017/1

#### 1 Planta Didática SMAR

Para realizar os ensaios e simulações das malhas de controle será utilizada a planta didática da SMAR. Esta planta possui equipamentos e instrumentos nos padrões atuais utilizados na indústria.

A planta possui um controlador lógico programável da plataforma DFI302 que é um controlador HSE High Speed Ethernet que possibilita executar lógicas em Ladder e comunicação com componentes de campo via Modbus.

A planta possui um segundo controlador, o DF95, com função de Gateway da rede Profibus para rede Ethernet HSE, este também faz parte da plataforma DFI302, possui 1 canal Profibus DP e 2 canais Profibus PA os quais suportam até 32 equipamentos por canal.(Smar, 2004).

Figura 1 – Imagem Planta Didática SMAR

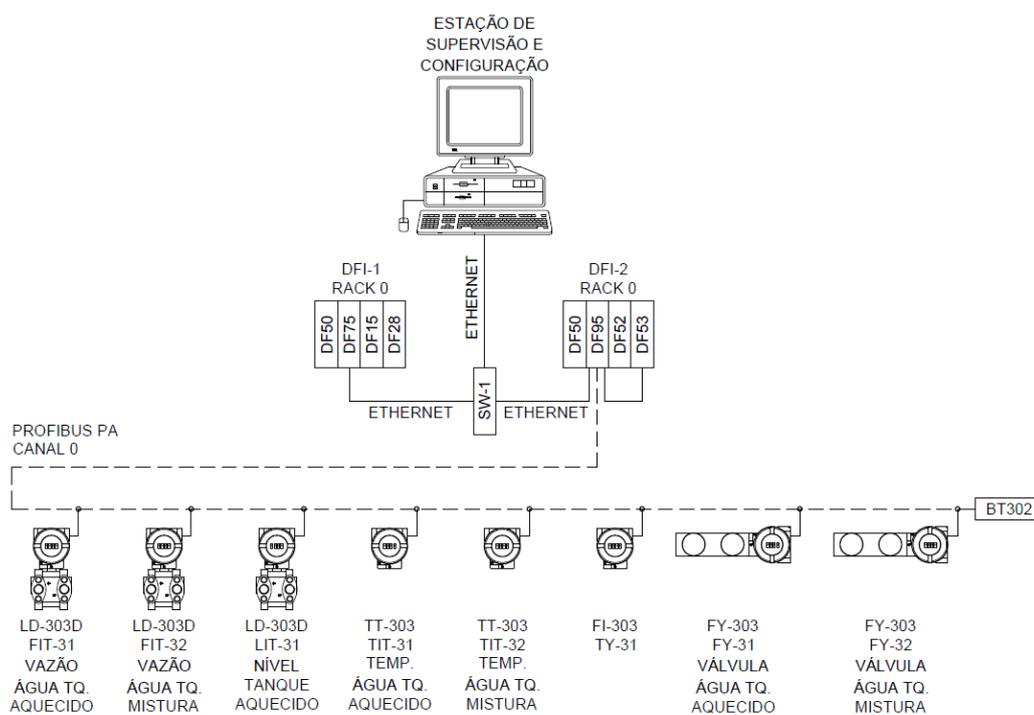


Fonte: (Smar, 2004)

## 1.1 Arquitetura de Comunicação

A arquitetura de rede desta planta pode ser descrita basicamente por duas camadas de rede, a rede Ethernet que faz a comunicação entre os controladores DF75, DF95 com a estação de operação/supervisão e a rede Profibus PA que interliga os instrumentos analógicos da planta com o controlador DF95.

Figura 2 – Arquitetura de Rede



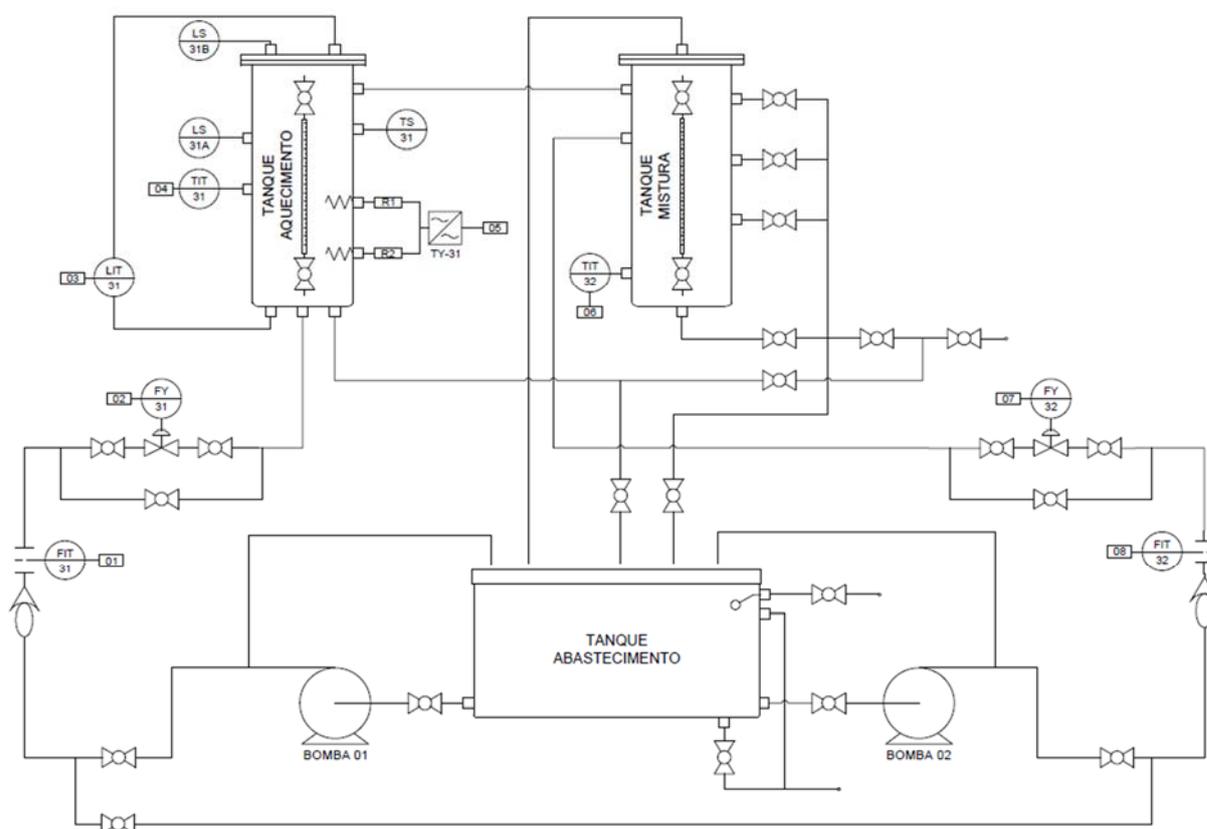
Fonte: Adaptado (Smar, 2004)

## 1.2 Fluxograma de Processo

A planta é composta por três tanques denominados reservatório, tanque de aquecimento e tanque de mistura.

O reservatório é um tanque aberto, ou seja, está a pressão atmosférica, já os tanques de aquecimento e mistura são tanques fechados que dependendo da configuração das válvulas manuais de processo podem estar pressurizados.

Figura 3 – Fluxograma P&ID da Planta Didática



Fonte: Adaptado Manual de Operação Planta Didática III. (2004).

A tabela abaixo nos mostra as características principais dos componentes da planta.

Tabela 1 – Descrição Instrumentos e válvulas

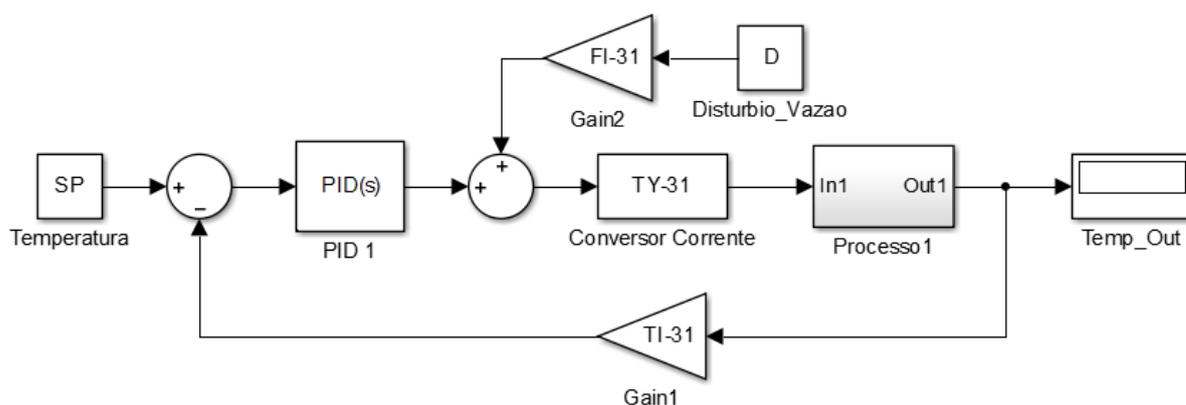
TAG	DESCRIÇÃO	FABRICANTE	RANGE
LIT-31	Transmissor de Pressão diferencial para medição de nível	SMAR	0-100%
FIT-31	Transmissor de Pressão diferencial para medição de vazão	SMAR	0-2000 l/h
FIT-32	Transmissor de Pressão diferencial para medição de vazão	SMAR	0-2000 l/h
TIT-31	Transmissor de Temperatura para PT-100	SMAR	0-100 °C
TIT-32	Transmissor de Temperatura para Termopar tipo J	SMAR	0-100 °C
FY-31	Posicionador de válvula	SMAR	0-100%
FY-32	Posicionador de válvula	SMAR	0-100%
UIC-31	Conversor Profibus-PA para corrente	SMAR	4-20mA

Fonte: Adaptado Manual de Operação Planta Didática III (2004)

A planta possibilita que sejam realizadas três estratégias de controle, controle Antecipativo, Realimentação Negativa e em Cascata.

Controle Antecipativo ou Feedforward o objetivo é manter a temperatura do tanque de aquecimento TIT-31, esta estratégia é realizada com base nos valores de vazão do medidor FIT-31, esta vazão será utilizada para antecipar a resposta do conversor de corrente que atua nas resistências de aquecimento, desta forma a perturbação identificada na vazão é eliminada antes de provocar alteração no processo. A perturbação é feita atuando manualmente no supervisorio na válvula FY-31.

Figura 4 – Diagrama Blocos Controle Antecipativo

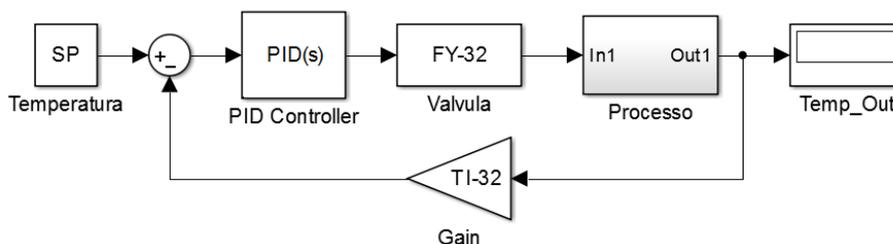


Fonte: Elaborado pelo autor

Controle Realimentação Negativa o objetivo é controlar a temperatura no tanque de mistura, esta estratégia é realizada medindo-se o valor de temperatura do tanque de mistura TI-32, que recebe água quente do tanque de aquecimento a uma temperatura fixa, este valor é comparado com um set point definido pelo operador

enviando para o controlador a diferença entre esses valores que seria o erro, com base neste erro o controlador atua na válvula FY-32 para ajustar a quantidade de água fria que entra no tanque.

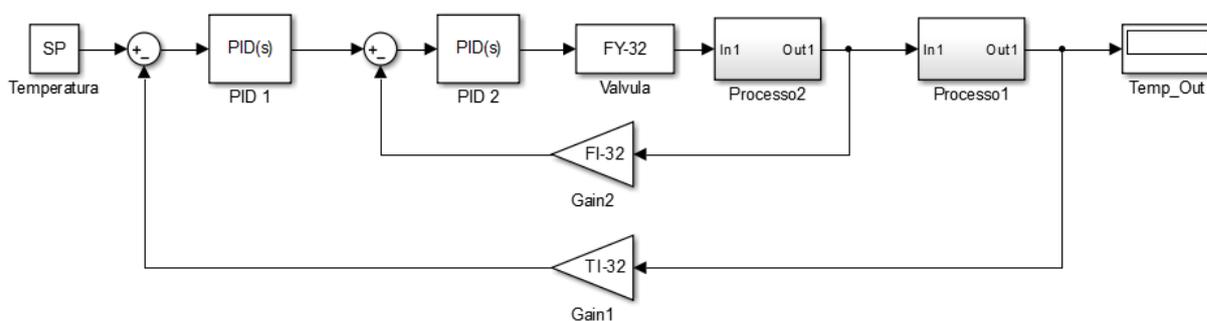
Figura 5 – Diagrama Blocos Controle Realimentação



Fonte: Elaborado pelo autor

Controle em Cascata o objetivo é manter a temperatura da água no tanque de mistura, nesta estratégia a malha que controla a vazão de água fria FY-32 e FI-32 vai receber como setpoint a saída da malha do controle de temperatura do tanque de mistura, caso ocorra alguma variação na temperatura da água quente a malha de vazão irá atuar a válvula para corrigir.

Figura 6 – Diagrama Blocos Controle Cascata



Fonte: Elaborado pelo autor

### 1.3 Principais Softwares de Monitoramento

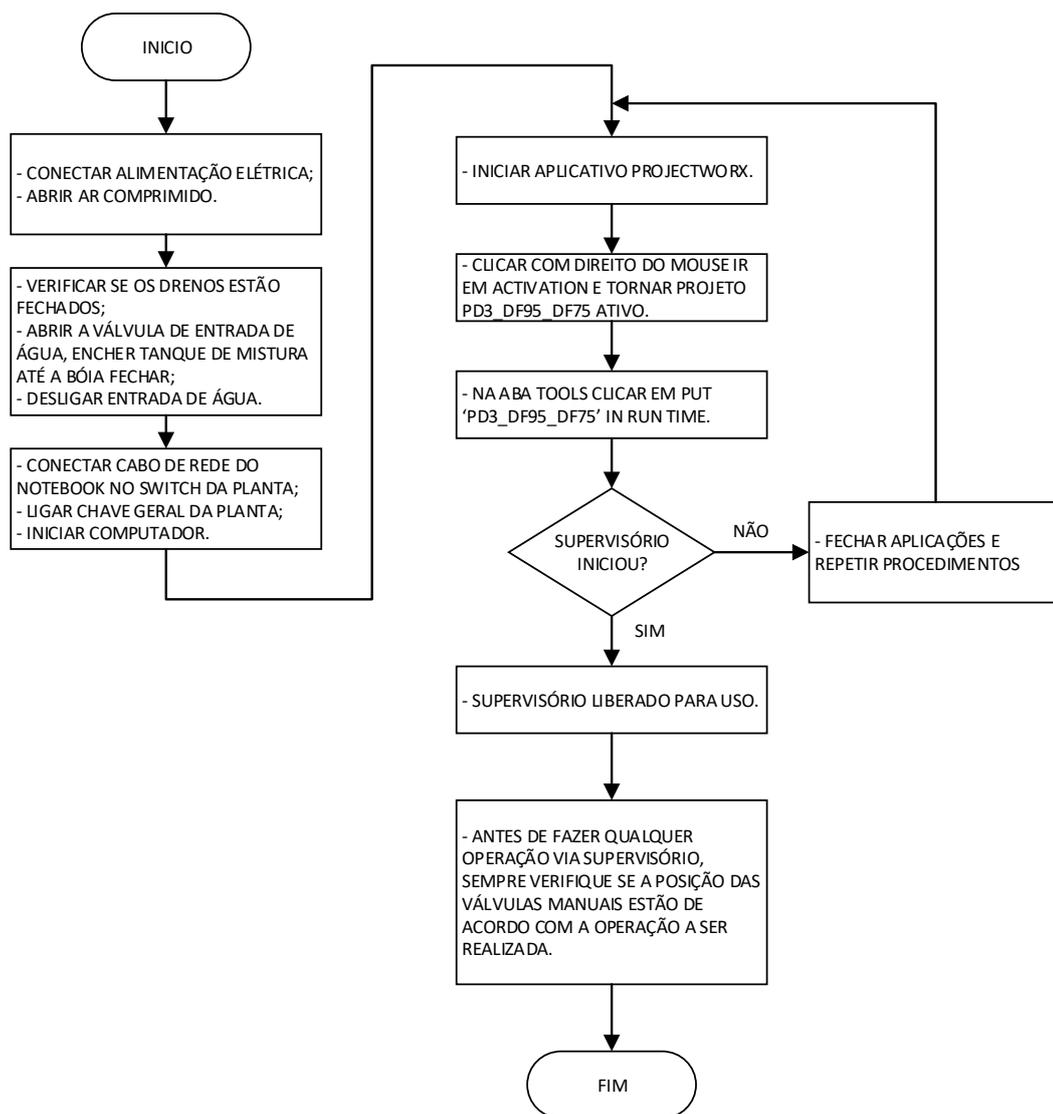
Na sequência são apresentados os principais softwares de monitoramento disponíveis hoje na universidade para a para a planta SMAR:

- ProcessView trata-se de um software de Supervisão e Interface Homem-Máquina (IHM) o qual é um opcional do sistema de Automação e Controle System 302.
- GraphWorx é um cliente OPC destinado a interfaces Homem-Máquina, o qual possui uma grande variedade de ferramentas que possibilitam a criação de telas para sistemas supervisórios.
- TrendWorx é um cliente OPC destinado à coleção de dados em tempo real, além de possibilitar o armazenamento dos dados coletados em um banco de dados.
- AlarmWorx é um cliente OPC que faz o gerenciamento dos alarmes e eventos que ocorrem na planta. Possibilita a configuração de alarmes digitais, analógicos e expressões matemáticas, sendo possível utilizá-los para definir as condições de cada alarme.
- OPC OLE™ for Process Control (OPC™) é um protocolo de comunicação no campo de controle e supervisão de processos industriais, oferece uma interface de comunicação que permite que componentes de software individuais interajam e compartilhem dados, por meio de uma arquitetura cliente-servidor.
- OPC Simulator é um software capaz de criar e simular variáveis OPC as quais podem ser utilizadas na simulação da planta e em algum eventual processo de manutenção.
- OPC Data Spy é um aplicativo que possibilita o usuário visualizar os dados de qualquer servidor OPC local ou que esteja na rede, além de possibilitar a manipulação dos valores.
- Security Configurator neste aplicativo são configuradas as permissões que cada usuário pode ter, ou seja, é possível definir os níveis de acesso de acordo com o usuário, exemplo operador, gerente e manutenção.
- Screen Manager é um configurador que possibilita alterar a disposição das telas, tendo como opção exibir até quatro telas de supervisão, no formato de um mosaico.
- ProjectWorx é um aplicativo gerenciador de projetos, esta ferramenta possibilita acesso a todos os aplicativos do pacote ProcessView através de uma única interface. Nele também é possível realizar as operações de ativação dos servers, backup e inicialização automática do sistema supervisório.

## 1.4 Configuração Operação da Planta

O fluxograma abaixo descreve os passos necessários para colocar a planta em operação.

Figura 7 – Fluxograma operação

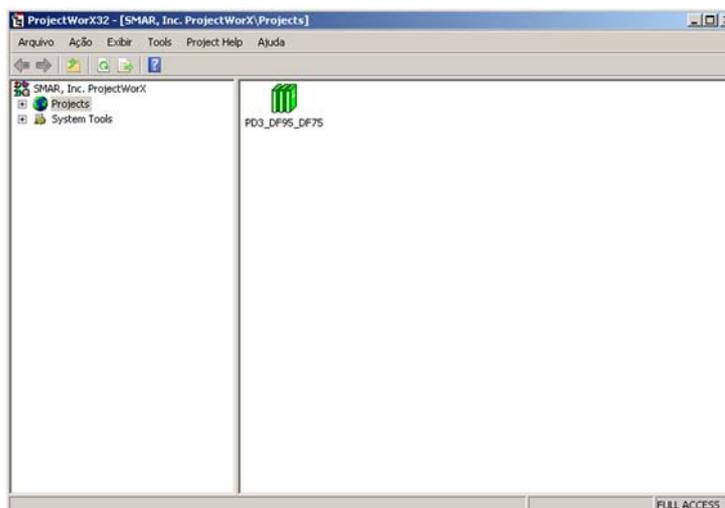


Fonte: Elaborado pelo Autor

As imagens abaixo mostram o procedimento a ser executado para iniciar o sistema supervisório.

Abrir o programa ProjectWorx32.

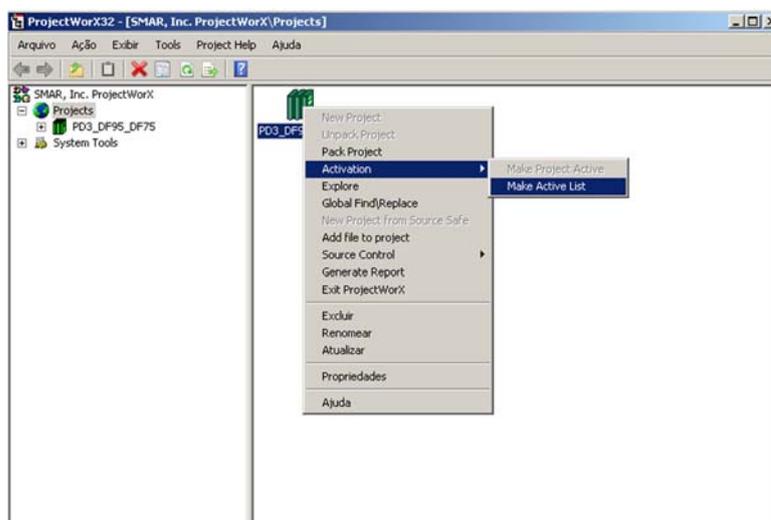
Figura 8 – Tela inicial



Fonte: ProjectWorX32

Nesta janela é preciso tornar ativos os arquivos do projeto da planta caso não estejam.

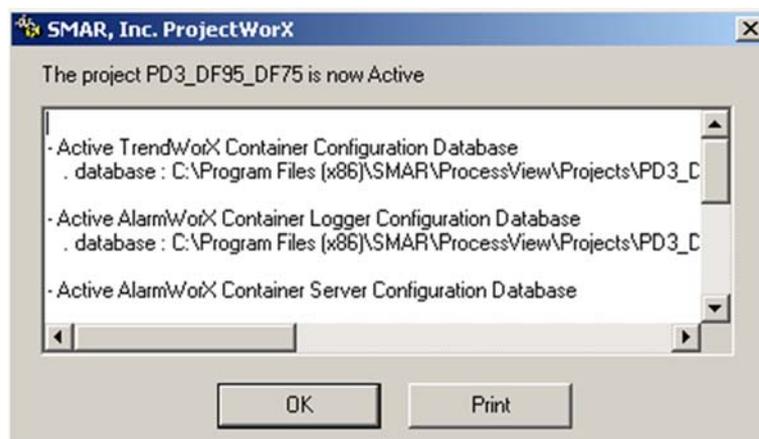
Figura 9 – Ativação Projeto



Fonte: ProjectWorX32

Após realização deste comando o sistema retornará a mensagem informando que o projeto está ativo.

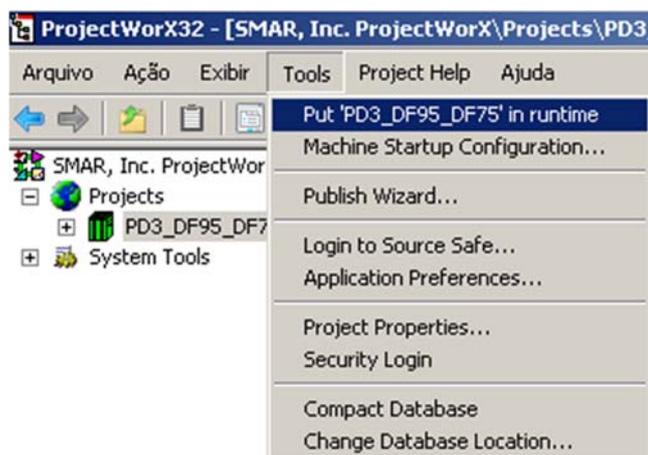
Figura 10 – Projeto Ativado



Fonte: ProjectWorx32

Para finalizar esta etapa é necessário colocar o projeto para rodar.

Figura 11 – Colocando Projeto em runtime

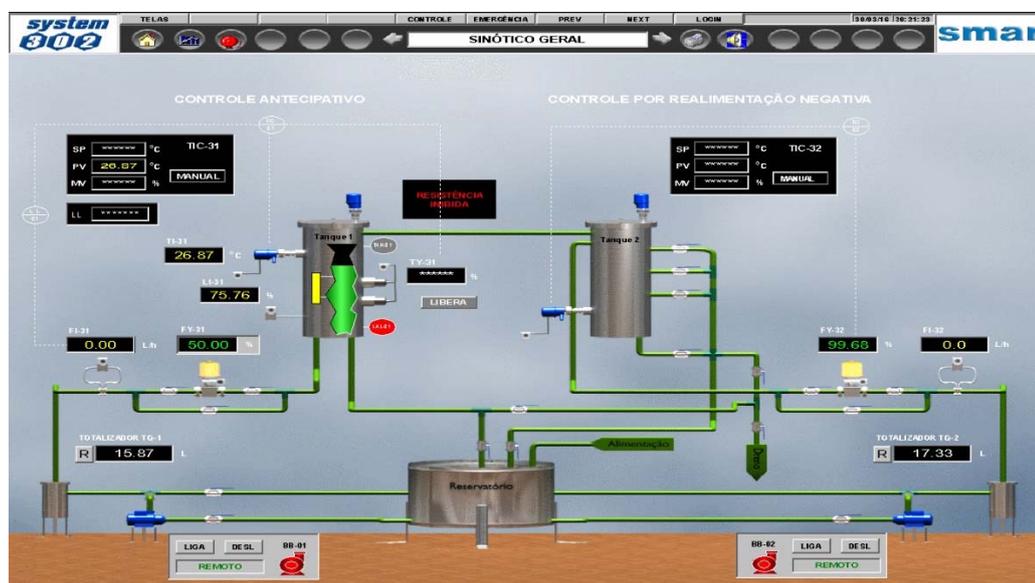


Fonte: ProjectWorx32

Ao concluir esta etapa o ProjectWorx fará a inicialização de todo o sistema abrindo o supervisório na tela inicial, ao clicar no botão central será aberta a tela principal do sistema supervisório.

Nesta tela é possível visualizar todas as variáveis de processo, acionar os motores, válvulas em modo manual e também colocar a planta para operar no modo automático.

Figura 12 – Tela Principal Sistema Supervisório

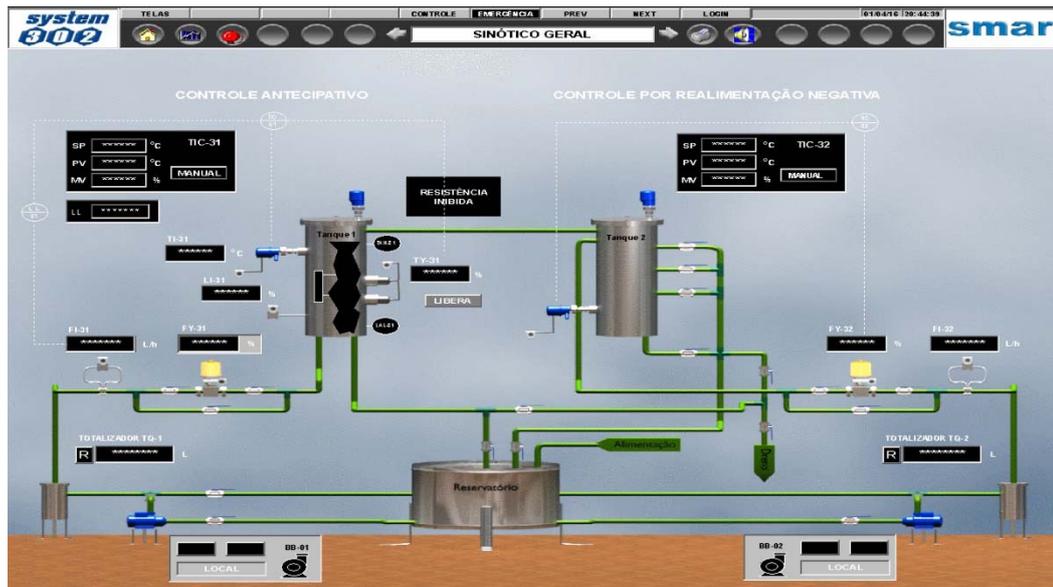


Fonte: Tela GraphWorx Planta Didática Unisinos

## 1.5 Observações gerais

Pode ocorrer que mesmo ao ligar a planta e seguindo os procedimentos, o supervisão inicie com falha de comunicação apresentando a tela conforme abaixo.

Figura 13 – Tela Principal Sistema Supervisório



Fonte: Tela GraphWorx Planta Didática Unisinos

É possível identificar que as variáveis estão com asteriscos \*\*\*\* ou em branco, isso se deve ao fato de por algum motivo o servidor OPC SMAR não ter entrado em operação, para resolver basta fechar todas as aplicações e refazer o procedimento de partida.

Mesmo seguindo todos os passos ainda sim permanecerão alguns campos com asteriscos \*\*\*\* ou em branco, ou ao clicar nos botões do supervisório este pode emitir um som e não realizar a operação, isto se deve ao fato de o supervisório estar sem a licença do ProcessView. A falta desta hardkey faz com que os botões possam parar de operar de forma aleatória, pois quando está sem a chave o supervisório roda em modo “Demo” liberando apenas 32 tags de comunicação sendo esta quantidade insuficiente para a operação da planta.

## 1.6 Comunicação OPC Server

Abaixo segue relação dos principais tags de comunicação OPC para controle da planta via Matlab ou qualquer outro cliente OPC.

Tabela 2 – Principais Tags OPC Planta SMAR

VARIÁVEIS DE PROCESSO		
TAG	TAG OPC	FUNÇÃO
LI-31	PD3_DF95-FFB1.NETIO.LIT_31	Nível TQ aquecimento
FI-31	PD3_DF95-FFB1.NETIO.FIT_31	Vazão Entrada TQ aquecimento
TI-31	PD3_DF95-FFB1.NETIO.TIT_31	Temperatura TQ aquecimento
UIC-31	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.SMPL_1_O_1	Conversor de potencia
TI-32	PD3_DF95-FFB1.NETIO.TIT_32	Temperatura TQ mistura
FI-32	PD3_DF95-FFB1.NETIO.FIT_32	Vazão Entrada TQ mistura
ATUADORES		
TAG	TAG OPC	FUNÇÃO
FY-31	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.SMPL_2:OUT	Válvula controle TQ Aquecimento em manual
FY-32	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.SMPL_4_O_1	Válvula controle TQ Mistura
FY-32	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.SEL_5:OUT	
FY-31	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.SMPL_1_O_1	
MALHA CONTROLE DE VAZÃO : FIC-31		
TAG	TAG OPC	FUNÇÃO
FI-31	PD3_DF95-FFB1.NETIO.FIT_31	Vazão Entrada TQ aquecimento
FY-31	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.SMPL_7_O_1	
SP	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_5:SP	
KP	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_5:KP	
TR	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_5:TR	
TD	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_5:TD	
MALHA CONTROLE DE Nível : LIC-31		
TAG	TAG OPC	FUNÇÃO
LI-31	PD3_DF95-FFB1.NETIO.LIT_31	Nível TQ aquecimento
FY-31	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.SMPL_8_O_1	
MALHA CONTROLE DE TEMPERATURA : TIC-31		
TAG	TAG OPC	FUNÇÃO
TI-31	PD3_DF95-FFB1.NETIO.TIT_31	Temperatura TQ aquecimento
TY-31	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.SMPL_5_O_1	
SP	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_3:SP	
KP	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_3:KP	
TR	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_3:TR	
TD	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_3:TD	
MALHA CONTROLE DE TEMPERATURA : TIC-32		
TAG	TAG OPC	FUNÇÃO
TI-32	PD3_DF95-FFB1.NETIO.TIT_32	Temperatura TQ mistura
FY-32	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.SMPL_6_O_1	
SP	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_4:SP	
KP	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_4:KP	
TR	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_4:TR	
TD	PD3_DF95-FFB1.FUNCTIONS.PID_4:TD	
SINAIS DE CONTROLE PLANTA		
TAG	TAG OPC	FUNÇÃO
LAH-S1	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A04_01_AL_TIT31D	Alarme nível alto TQ mistura
LAL-S1	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A04_03_AL_LIT31D	Alarme nível baixo TQ mistura
LIGA_BB1	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A01_00_LIGA_BB1	Liga bomba 1
DESL_BB1	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A01_01_DESL_BB1	Desliga bomba 1
LIGA_BB2	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A01_03_LIGA_BB2	Liga bomba 2
DESL_BB2	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A01_04_DESL_BB2	Desliga bomba 2
EMER_ACIO	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A00_04_EMER_ACIO	Aciona emergência
EMER_LIBE	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A00_05_EMER_LIBE	Libera emergência
LOCAL_REM	PD3_DF75-FFB1.IO.PD3_ED_LOCAL_REM	Status modo local/rem
TESTE_LAMP	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A00_07_TEST_LAMP	Teste lâmpadas painel
CALA_ALARME	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A00_06_CALA_SIR	Silencia Alarme Sonoro
CONV_LIB	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A01_06_CONV_LIB	Libera conversor resistência
CONV_INIB	PD3_DF75-FFB1.VIRTUAL.A01_07_CONV_INIB	Bloqueio conversor resistência
A/M_Aquec	PD3_DF95-FFB1.VIRTUAL.A03_00_A_M_Aquec	Aquecimento automático/manual
A/M_Mist	PD3_DF95-FFB1.VIRTUAL.A03_00_A_M_Mist	Mistura automático/manual

Bibliografias:

**SMAR. Manual de Operação Planta Didática III 2004.**