

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

Marcelo Gonçalves Trentin

**MONITORAMENTO E CONTROLE
ESTATÍSTICO INTEGRADO AO
CONTROLE DE ENGENHARIA DE
PROCESSO**

Porto Alegre

2010

Marcelo Gonçalves Trentin

**MONITORAMENTO E CONTROLE ESTATÍSTICO
INTEGRADO AO CONTROLE DE ENGENHARIA DE PROCESSO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Orientadora: Professora Liane Werner, Dra.

Porto Alegre

2010

Marcelo Gonçalves Trentin

**MONITORAMENTO E CONTROLE ESTATÍSTICO
INTEGRADO AO CONTROLE ENGENHARIA DE PROCESSO**

Esta Tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Professora Liane Werner, Dra.
Orientadora PPGEP/UFRGS

Prof. Carla Schwengber ten Caten, Dra.
Coordenadora PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Adriano Mendonça Souza, Dr. (PPGEP/UFSM)

Professora Carla Schwengber ten Caten, Dra. (PPGEP/UFRGS)

Professor Danilo Marcondes Filho, Dr. (DEST/UFRGS)

Dedico este trabalho, com todo o esforço demandado, à minha esposa Cida pelo seu companheirismo e apoio, e aos meus filhos Lucas e Pedro que de forma forçada se acostumaram à minha ausência neste período.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, o grande responsável por todas as conquistas e méritos alcançados, o qual permitiu os envolvimento e relacionamentos necessários, sabedoria e discernimento nas horas cruciais.

À minha orientadora Professora Dra. Liane Werner, pelas suas valorosas contribuições, paciência e longo tempo despendido durante todas as fases desta tese.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação e Engenharia de Produção, os quais proporcionaram o incentivo inicial e a base para o caminho que se seguiu.

Aos professores Adriano, Danilo e Carla, por suas considerações, as quais enriqueceram o trabalho.

À empresa tomada como base para o estudo realizado, que abriu suas portas possibilitando dados e informações essenciais, principalmente na pessoa de sua gestora, Maria Nalu, a qual não mediu esforços em sua colaboração.

À UTFPR e aos colegas de trabalho, pela colaboração e incentivos recebidos.

Aos meus amigos e familiares, pelos incentivos recebidos e por compreenderem os períodos de ausência e distanciamento dos últimos anos.

Finalmente aos colegas de doutorado, pelos momentos de ansiedade vividos e pelas expectativas compartilhadas desde os primeiros momentos.

RESUMO

Com o aumento da produção mundial em proporções cada vez maiores, os processos industriais têm se tornando um desafio pela complexidade do seu gerenciamento. A identificação rápida e precisa de não conformidades é cada vez mais necessária e mais difícil de ser realizada. Este estudo propõe a integração do Controle de Engenharia com o Controle Estatístico de Processo, no monitoramento e controle de processos industriais, almejando a percepção mais rápida de anormalidades, visando à redução de problemas de especificação de produtos. Uma forma de autoajuste do controlador Proporcional-Integral e Derivativo (PID) é proposta, aumentando a robustez do sistema, empregando-se técnicas comumente utilizadas nos processos. O modelo matemático do processo, equacionando as relações das variáveis envolvidas, é estabelecido para determinação e especificação do controlador e de forma conjunta as cartas de controle são configuradas. O controlador projetado para a situação normal de operação atua no sentido de manter as variáveis de saída (controladas) dentro de especificações através do conhecimento de sua relação com as de entrada e de processo. As cartas de controle baseadas em modelos, monitorando os resíduos provenientes de ajustes de modelos ARIMA, acompanham as variações do processo, evitando variabilidade excessiva e possibilitando a detecção de comportamentos anormais, inclusive monitorando o desempenho do próprio controlador. Com a sinalização das cartas de controle, é realizada uma interferência na equação de ajuste do controlador. Empregando-se a simulação numérica, analisam-se os comportamentos do controlador e este, combinado com as cartas de controle. Falhas inseridas propositalmente, em cada variável controlada, foram devidamente sinalizadas. Estas sinalizações ocorreram mesmo em situações em que as variáveis estiveram mantidas dentro da especificação pelo controlador. Para o sistema de autoajuste, o aumento dos ganhos de contribuição das cartas de controle proporcionou maior acurácia das variáveis controladas (monitoradas). A integração proposta apresentou melhores resultados, quanto à manutenção das variáveis de saída próximas aos seus alvos, quando comparada com o controlador operando isoladamente.

Palavras-chave: Controle Estatístico de Processo. Controle de Engenharia de Processo.
Integração CEP e CEnP.

ABSTRACT

With the increase of world production at bigger and bigger proportions, the industrial processes have become a challenge by the complexity of their management. The fast and precise identification of non-conformities is increasingly necessary and more difficult to be performed, preferably even before problems with product specification or waste can be considered. This study proposes the integration of Engineering Process Control with the Statistical Process Control, in monitoring and controlling of industrial processes, aiming the quicker perception of abnormalities, looking for the reduction of products specification problems. A form of self-adjustment of the Proportional-Integral and Derivative Controller (PID) is proposed, increasing the system robustness applying techniques commonly used in the processes. The mathematical model of the process, equating the relationship of the variables involved, is established to the determination and specification of the controller, and the control charts are configure in an integrated way. The controller projected to the normal operation situation, acts in the sense of keeping the exit variables (controlled) within the specifications through the knowledge of its relationship with that of the entrance and that of the process. The control charts based in models, monitoring the residues coming from the models adjustment ARIMA, follow up the process variations avoiding excessive variability and making it possible the detection of abnormal behaviors, even monitoring the performance of the controller itself. With the signalling of the control charts, an interference in the equation of adjustment of the controller is performed. Applying the numerical simulation, the controller behaviors are analyzed and this combined with the control charts. Intentionally inserted failures, in each controlled variable, were properly signalized. These signallings have happened even in situations where the variables were kept by the controller within the specification.. To the self-adjustment system, the increase of contribution gains of the control charts has provided greater accuracy of the controlled variables. The integration proposed has presented better results, in relation to maintain of the exit variables next to their targets, when compared to the controller operating in isolation.

Key words: Statistical Process Control; Engineering Process Control; Integration SPC and EPC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação do Controle de Engenharia e do Controle Estatístico de Processo	16
Figura 2 – Sistemas de Controle.....	40
Figura 3 – Diagrama de blocos de um controlador automático industrial típico	42
Figura 4 – Diagrama de um sistema de controle linear no espaço de estados.....	50
Figura 5 – Fluxograma Módulo 1 - modelagem e especificação do CEnP e CEP	70
Figura 6 – Procedimentos de Projeto de Sistemas de Controle.....	74
Figura 7 – Fluxograma Módulo 2 - Integração CEnP - CEP	80
Figura 8 – Cenários avaliados	81
Figura 9 – Fluxograma Módulo 3 – Operação integrada e inserção de anormalidades	88
Figura 10 – Sequência do processo de revestimento.....	96
Figura 11 – Tanque de Cromagem	97
Figura 12 – Idealização do Modelo Físico do Processo	98
Figura 13 – Semana típica de trabalho do processo de cromagem.....	109
Figura 14 – Comportamento da variável controlada Temperatura.....	110
Figura 15 - Comportamento da variável controlada Densidade	111
Figura 16 – Comportamento da variável controlada Nível	111
Figura 17 – Arquitetura do Controlador	115
Figura 18 – Variáveis Manipuladas -Vazão de entrada de ácido crômico e água – semana típica	118
Figura 19 – Erros instantâneos do Nível e Densidade – semana típica.....	119
Figura 20 - Variável Manipulada Pf e Ações do Controlador de Temperatura – semana típica	120
Figura 21 - Ações do Controlador de Nível – semana típica.....	120
Figura 22 - Ações do Controlador de Densidade – semana típica.....	121
Figura 23 – Cenários avaliados	125
Figura 24 – Temperatura - Cenário 3, Repetição 600	138
Figura 25 – Erros de ajuste variável Temperatura – cenário 3, semana 600.....	138
Figura 26 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Temperatura – cenário 3,	139
Figura 27 – Nível - Cenário 3, Repetição 600.....	140
Figura 28 – Erros de ajuste variável Nível – cenário 3, semana 600	141
Figura 29 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Nível – cenário 3, semana 600.....	141
Figura 30 – Densidade - Cenário 3, Repetição 600.....	142
Figura 31 - Erros de ajuste variável Densidade – cenário 3, semana 600	143
Figura 32 – Cartas de controle Individuais e EWMA, variável Densidade – cenário 3, semana 600	143
Figura 33 – Densidade - cenário 3, repetição 589, $K_{cc} = 0\%$	145
Figura 34 – Cartas de controle Observações Individuais e EWMA, Densidade – cenário 3 - semana 589, $K_{cc}=150\%$	145

Figura 35 – Contribuições para Lei de Controle, Densidade – cenário 3 - semana 589, Kcc–150%.....	146
Figura 36 – Vazão de entrada ácido crômico e água, 5000 a 5800 min. – cenário 3, semana 589, Kcc–150%	147
Figura 37 - Variável Temperatura, cenário 4 - semana 356	147
Figura 38 – Cartas de controle Observações Individuais e EWMA, variável Temperatura – cenário 4 - semana 356	148
Figura 39 – Contribuições para Lei de Controle, Temperatura – cenário 4 - semana 356 , Kcc–150%.....	148
Figura 40 – Variável Temperatura, cenário 4 - semana 866	149
Figura 41 – Cartas de controle Observações Individuais e EWMA, variável Temperatura – cenário 4 - semana 866	150
Figura 42 – Contribuições para Lei de Controle, Temperatura – cenário 4 - semana 866 , Kcc–150%.....	150
Figura 43 – Temperaturas médias semanais - cenário 4.....	151
Figura 44 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Nível – cenário 2 - semana 100, quinta-feira	162
Figura 45 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Densidade – cenário 2 - semana 100, quinta-feira	163
Figura 46 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Densidade – cenário 1 - semana 500, quinta-feira	165
Figura 47 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Temperatura, repetições sem sinalizações – cenário 3 - semana 24	167
Figura 48 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Temperatura – cenário 4 - semana 750, quinta-feira	169
Figura 49 – Variáveis Controladas Nível e Densidade, Vazão de entrada de ácido crômico e água – cenário 2 - semana 100	174
Figura 50 – Variáveis Controladas Nível e Densidade, Vazão de entrada de ácido crômico e água – cenário 1 - semana 500	177
Figura 51 – Variável Controlada Temperatura, Variável Manipulada Pf – cenário 4 - semana 750	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vazão de arraste – ritmo normal de produção	105
Tabela 2 – Aquecimento banho pela corrente de deposição – ritmo normal de produção	106
Tabela 3 – Densidade de Corrente.....	107
Tabela 4 – Área de peças depositada por banho – ritmo normal de produção	108
Tabela 5 – Valores Iniciais – Variáveis Controladas	108
Tabela 6 – Valores limites de especificação das variáveis controladas	113
Tabela 7 – Ganhos do Sistema de Controle.....	118
Tabela 8 – Modelos ARIMA ajustados aos dados	127
Tabela 9 – Parâmetros cartas de controle	129
Tabela 10 – Ganhos Avaliados na Interferência das Cartas de Controle	133
Tabela 11 – Quantidade de repetições com ocorrências por tipo de Carta de Controle e cenário	135
Tabela 12 – Valores Máximos e Mínimos das Variáveis Controladas, período de produção – CEnP.....	136
Tabela 13 – Indicação de desempenho das variáveis controladas.....	153
Tabela 14 – Ganhos Avaliados na Interferência das Cartas de Controle	158
Tabela 15 – Quantidade de repetições com sinalizações por tipo de Carta de Controle e cenário – Falha vazamento do tanque	160
Tabela 16 – Instante Médio de Identificação por cenário e ganhos K_{cc} – Falha vazamento do tanque	161
Tabela 17 – Quantidade de repetições com sinalizações por tipo de Carta de Controle e cenário – Falha sensor densidade	164
Tabela 18 – Instante Médio de Identificação por cenário e ganhos K_{cc} – Falha sensor densidade	165
Tabela 19 – Quantidade de repetições com sinalizações por tipo de Carta de Controle e cenário – Falha variável manipulada P_f	166
Tabela 20 – Instante Médio de Identificação por cenário e ganhos K_{cc} – Falha variável manipulada P_f	168
Tabela 21 – Valores Máximos e Mínimos da Variável Controlada Nível (cm) – Vazamento Tanque	170
Tabela 22 – Valores Máximos e Mínimos da Variável Controlada Densidade (g/cm^3) – Falha Sensor	170
Tabela 23 – Valores Máximos e Mínimos da Variável Controlada Temperatura (C°) – Falha Variável P_f	171
Tabela 24 – Indicação de desempenho – Falha vazamento no tanque	172
Tabela 25 – Indicação de desempenho – Falha sensor de densidade	175
Tabela 26 – Indicação de desempenho – Falha variável manipulada P_f	178

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA E SUA RELEVÂNCIA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	15
1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA	17
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
1.6 DELIMITAÇÕES.....	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO.....	21
2.1.1 Controle estatístico com dados autocorrelacionados	23
2.1.2 Ajuste por modelos ARIMA	25
2.1.3 Carta de controle EWMA envolvendo dados autocorrelacionados.....	29
2.1.4 Carta de controle CUSUM envolvendo dados autocorrelacionados	32
2.1.5 Cartas de controle com modificações nos limites de controle	34
2.1.6 Outras técnicas para monitoramento de dados autocorrelacionados	35
2.2 CONTROLE DE ENGENHARIA DE PROCESSO.....	38
2.2.1 Sistemas de controle	39
2.2.2 Sistema de controle PID.....	42
2.2.3 Outros sistemas de controle.....	46
2.3 INTEGRAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO E DE ENGENHARIA DE PROCESSO.....	56
2.3.1 Integrações de sistemas univariados.....	59
2.3.2 Integrações de sistemas com diversas variáveis.....	63
2.3.3 Considerações	66
3 PROPOSIÇÃO DE INTEGRAÇÃO	68
3.1 MÓDULO 1 - ESPECIFICAÇÕES DO PROCESSO E DETERMINAÇÃO DO CEnP E CEP.....	69
3.1.1 Características do processo a ser estudado	69
3.1.2 Modelagem matemática e definição de variáveis.....	71
3.1.3 Validação do modelo matemático	72
3.1.4 Projeto do controlador e estratégia de controle e parametrização	73
3.1.5 Registro dos parâmetros e configurações do controlador	76

3.1.6 Definição das variáveis monitoradas pelas cartas de controle	77
3.1.7 Definições das cartas de controle	77
3.1.8 Configuração de técnicas necessárias ao emprego das cartas de controle	78
3.1.9 Registro das cartas de controle e suas configurações	79
3.2 MÓDULO 2 - OPERAÇÃO INTEGRADA CEnP E CEP	79
3.2.1 Determinação de cenários	79
3.2.2 Simulação do processo	81
3.2.3 Intervenções nas sinalizações de anormalidades	84
3.2.4 Registro das informações das variáveis do controlador e das cartas de controle....	85
3.2.5 Todos os cenários foram testados?.....	86
3.2.6 Organização e tabulação dos dados	86
3.2.7 Análise dos resultados e comportamentos.....	86
3.3 MÓDULO 3 - INTEGRAÇÃO DO CEnP E DO CEP COM A INSERÇÃO DE ANORMALIDADES	87
3.3.1 Introdução de forma intencional de falha no processo e/ou componente	89
3.3.2 Cenários a serem avaliados.....	89
3.3.3 Simulação do processo	90
3.3.4 Intervenções nas sinalizações de anormalidades	90
3.3.5 Registro das informações das variáveis do controlador e das cartas de controle....	91
3.3.6 Todos os cenários testados?	91
3.3.7 Todas as falhas testadas?	91
3.3.8 Verificação das sinalizações e identificações das anormalidades criadas	92
3.3.9 Análise de desempenho	92
4 APLICAÇÃO	94
4.1 MÓDULO 1 - ESPECIFICAÇÕES DO PROCESSO E DETERMINAÇÃO DO CEnP E CEP.....	94
4.1.1 Características do processo estudado	94
4.1.2 Modelagem matemática e definições de variáveis	98
4.1.3 Validação do modelo matemático	108
4.1.4 Projeto do controlador e estratégia de controle e parametrização	112
4.1.5 Registro dos parâmetros e configurações do controlador	122
4.1.6 Definição das variáveis monitoradas pelas cartas de controle	122
4.1.7 Definições das cartas de controle	123
4.1.8 Configuração de técnicas necessárias ao emprego das cartas de controle	123

4.1.9 Registro das cartas de controle e suas configurações.....	124
4.2 MÓDULO 2 - OPERAÇÃO INTEGRADA CEnP E CEP	124
4.2.1 Determinação de cenários	124
4.2.2 Simulação do processo	126
4.2.3 Intervenções nas sinalizações de anormalidades	131
4.2.4 Registro das informações das variáveis do controlador e das cartas de controle..	133
4.2.5 Todos os cenários foram testados?.....	134
4.2.6 Organização e tabulação dos dados	134
4.2.7 Análise dos resultados e comportamentos.....	136
4.3 MÓDULO 3 - INTEGRAÇÃO DO CEnP E DO CEP COM A INSERÇÃO DE ANORMALIDADES	154
4.3.1 Introdução de forma intencional de falha no processo e/ou componente	154
4.3.2 Cenários a serem avaliados.....	156
4.3.3 Simulação do processo	156
4.3.4 Intervenções nas sinalizações de anormalidades	158
4.3.5 Registro das informações das variáveis do controlador e das cartas de controle..	159
4.3.6 Todos os cenários testados?	159
4.3.7 Todas as falhas testadas?	159
4.3.8 Verificação das sinalizações e identificações das anormalidades criadas	159
4.3.9 Análise de desempenho	171
4.4 COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS	180
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	182
5.1 TRABALHOS FUTUROS	185
REFERÊNCIAS	187
APÊNDICES	198

1 INTRODUÇÃO

As indústrias, nos dias atuais, estão inseridas cada vez mais em um mercado competitivo e globalizado. Este fato as obriga a modernizarem-se, caso desejem manter os seus mercados ou conquistar novos. Toda a cadeia produtiva, as quais pertencem, sente os efeitos desta busca por melhorias. Então, existe uma demanda contínua por maior produtividade, competitividade e, conseqüentemente, qualidade. Mas, a busca por novas alternativas, soluções técnicas e econômicas são preocupantes em função da velocidade com que são solicitadas.

O mercado consumidor tem exigido das empresas um atendimento cada vez mais flexível, personalizado, rápido e mais exigente, obrigando-as a se adequarem às necessidades e desejos dos clientes. A satisfação do consumidor é um dos objetivos mais importantes das empresas. Com esse intuito, tem-se aumentado a atenção dispensada à Qualidade e, por sua vez, ao Controle Estatístico da Qualidade. Dentro dos processos de fabricação, procura-se integrar os diversos setores envolvidos visando o melhor desempenho de todo processo produtivo. A busca constante pela melhoria da qualidade e a integração harmoniosa entre fornecedor, fabricante e consumidor têm um papel de destaque no cenário econômico mundial atual.

O consumidor com maior grau de exigência, busca pela satisfação das suas necessidades, e induz toda cadeia produtiva a aumentar a qualidade agregada ao produto. A qualidade de produtos e serviços tem se tornado um importante fator de decisão na maioria dos negócios. Independente de quem seja o consumidor, quando este estiver fazendo decisões de compra, estará propenso a considerar a qualidade com a mesma importância que o custo e o prazo de entrega; conseqüentemente a melhoria da qualidade tem se tornado uma preocupação importante para as corporações (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Com os altos níveis de qualidade exigidos, com as produções em larga escala e com a competitividade necessária à sobrevivência, o Controle Estatístico da Qualidade vem sendo buscado incessantemente e sendo implementado em um número crescente de instituições.

Entre as aplicações estatísticas para a melhoria da qualidade, o Controle Estatístico de Processo (CEP) é uma ferramenta utilizada para auxiliar os operadores a controlar e monitorar os processos industriais (MASON et al., 1997). Através das cartas de controle as variáveis de qualidade são monitoradas constantemente visando detectar a presença de causas especiais, as quais devem ser investigadas e eliminadas. Desta forma, a variabilidade da produção poderá

ser reduzida proporcionando assim melhores níveis de qualidade dos produtos (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2004).

Gerenciando a tecnologia que avança velozmente, o Controle de Engenharia de Processo (CEnP) assume papel importante, uma vez que as variáveis presentes podem e devem ser monitoradas e controladas de forma contínua. Ajustes necessários para manter o sistema dentro de determinado padrão são realizados de forma autônoma, sempre que necessário. Esta ferramenta de gerenciamento vem auxiliar o controle de processo, pois é difícil a tarefa de qualquer operador tomar decisões rápidas e adequadas em função da quantidade de variáveis envolvidas influenciadoras da produção e consequente especificação e qualidade do produto final. O Controle de Engenharia realiza alterações regulares nas variáveis de processo que são ajustáveis, visando manter as características de qualidade nos padrões alvo.

Nos processos modernos, em crescente automatização, os seus desempenhos são melhorados com as reduções das suas variabilidades, em que o controle destas é cada vez mais necessário. Para realizar este controle são indicadas duas formas: Controle Estatístico de Processo e o Controle de Engenharia de Processo. O Controle Estatístico de Processo visa monitorar o processo para detectar causas especiais e o Controle de Engenharia visa reduzir os efeitos de variações de qualidade previsíveis (YANG; SHEU, 2006). A integração destes dois sistemas de monitoramento e controle, procurando-se minimizar a variabilidade do processo, é uma evolução aos avanços tecnológicos que surgem. Outra necessidade, também em função da evolução dos processos, é o aumento da exigência dos níveis de precisão. Em alguns, a sensibilidade envolvida é tão grande que, pequenas variações devem ser percebidas em curto espaço de tempo, evitando-se correções bruscas posteriores e possíveis falhas de especificação (OGATA, 2003).

1.1 TEMA E SUA RELEVÂNCIA

Com a evolução dos métodos produtivos e a busca incessante pela qualidade que vem sendo exigida pelo mercado consumidor, o controle da qualidade assume papel importante. A velocidade que a produção seriada está atingindo deixa clara a necessidade de usarem-se sistemas de amostragem, análise e controle cada vez mais rigorosos e que apresentem certo grau de precisão.

As parcerias comerciais que, frequentemente, estão sendo assumidas entre fornecedores e clientes (qualidade assegurada) fazem com que seja estabelecido um grau de

confiabilidade mútua, ou mesmo contratual, buscando-se um índice de não conformidade zero. Nos tempos modernos, a qualidade é um dos fatores que auxilia a tornar a empresa competitiva. Sendo assim, produzir itens ou produtos finais sem defeitos é uma meta perseguida por muitos empresários. Com isto fica claro que é preciso buscar ferramentas precisas e eficientes que possam demonstrar problemas de processo com maior sensibilidade e principalmente, antecipação.

A integração das duas áreas, Controle Estatístico do Processo e de Engenharia de Processo pode contribuir com a melhoria da qualidade. Os trabalhos encontrados na literatura (YU; XI, 2007; CLARO; COSTA; MACHADO, 2007; ALTIOK; MELAMED, 2001) citam as dificuldades de controlarem-se processos autocorrelacionados devido a sua complexidade. Esta integração tem se tornado necessária para melhorar o desempenho dos processos em crescente grau de automação e na busca pela redução de custos com desperdícios, retrabalhos ou mesmo insatisfação dos clientes por falhas não percebidas a tempo. Busca-se a integração de um sistema em que os comportamentos de controle e monitoramento possam ser analisados e avaliados em situações de operação o mais próximo possível da real. A implementação deste estudo pode auxiliar na identificação rápida de problemas, proporcionar a redução de ocorrências que façam o processo sair de especificação e reduzir situações de comportamento de processo no qual existam maiores dificuldades de identificação e controle de anormalidades.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal é propor a integração entre o controle de engenharia de processo e as cartas de controle estatísticas para dados autocorrelacionados, aumentando a robustez do sistema de controle através das suas operações integradas, incluindo autoajustes do controlador.

Como objetivo secundário, tem-se a estruturação de um controlador de engenharia, capaz de gerenciar o processo tomado como base para o estudo, operando de forma independente (isolada), mantendo as variáveis de saída próximas aos seus valores-alvo.

Como outro objetivo secundário pretende-se realizar uma avaliação, em que a combinação dos métodos deverá ser testada quanto a sua eficiência em monitoração e controle, através de simulações baseadas em um processo real, utilizando-se técnicas de controle comumente empregadas em processos.

Também como objetivo secundário, almeja-se verificar se as cartas de controle são

capazes de detectar falha do processo, mesmo o controlador mantendo as variáveis controladas (monitoradas) dentro das especificações nos momentos de anormalidades.

1.3 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Pelos históricos de aplicação, o CEP tem sido bem sucedido na fabricação discreta de peças, enquanto o CEnP tem apresentado bons resultados em processos contínuos. Com a integração entre CEP e CEnP, podem ser gerados bons resultados melhorando o desempenho dos sistemas de controle. Com a combinação das duas técnicas gerando um procedimento melhorado, o resultado será de um CEnP com possibilidades de detectar causas especiais. O controle de engenharia de processo, em muitas situações, altera a variável a cada período. O controle estatístico só indica a necessidade de alteração do processo quando tem evidências estatísticas. Em muitos processos o CEnP é mais adequado, porém só reage às perturbações e não faz tentativas para remover possíveis causas especiais, sendo que a sua remoção poderia resultar em melhoria significativa para o gerenciamento do sistema (MONTGOMERY, 2004).

O emprego do CEnP supõe a existência de um modelo dinâmico que relaciona a entrada com a saída do processo. Se o modelo for adequado, o controle evitará distorções na saída. Na ocorrência de perturbações externas, não contempladas no modelo, o sistema não conseguirá o controle necessário e a variabilidade aumentará. A utilização conjunta com o CEP possibilitará identificar as perturbações externas (causas especiais). Aplicação combinada de CEnP e CEP no processo, será mais eficiente que as técnicas aplicadas de forma isoladas, pois com um monitoramento e um controle mais acurados, serão evitadas possíveis não conformidades e prevenidos problemas de perdas na fabricação, rendimento em campo e até mesmo paradas do processo (TSUNG; TSUI, 2003). Na Figura 1, pode ser visto como o sistema conjunto pode se relacionar. Nela, estão representadas: a variável de saída (y_t), o seu valor-alvo desejado (T) e a variável manipulada (x_t). O valor da variável de saída é acompanhado tanto pelo Controle Estatístico quanto pelo Controle de Engenharia. O Controle Estatístico, constatando anormalidades, sinaliza para que sejam removidas as causas especiais. O Controle de Engenharia, por sua vez, procura reduzir a diferença entre o valor obtido na saída em relação ao valor-alvo especificado.

Trabalhos encontrados na literatura descrevem aplicações na qual o controle de engenharia e o controle estatístico são empregados de forma concomitante, sendo o CEP geralmente utilizado para avaliação do sistema de controle ou para sinalizações reconhecendo

causas especiais quando da ocorrência de sinalizações (VENKATESAN, 2003; SCHIPPERS, 2001; CAPILLA et al. 1999).

Em Mason e Young (1998) realça-se a importância de utilizar o controle estatístico integrado com CEnP. Citam, os autores, que o CEnP mantém os valores das variáveis dentro de uma faixa de variação criando uma região de trabalho, buscando manter a variável no seu valor-alvo. O CEP sinaliza se o processo está sendo mantido dentro desta região de trabalho, mais especificamente, em uma delimitação mais restrita com os limites de controle estabelecidos pelos pressupostos sobre as variáveis de processo e pela taxa de falsos alarmes desejados. O CEP avalia se novos dados das variáveis de processo atendem a esta delimitação, sinalizando quando este limite é extrapolado.

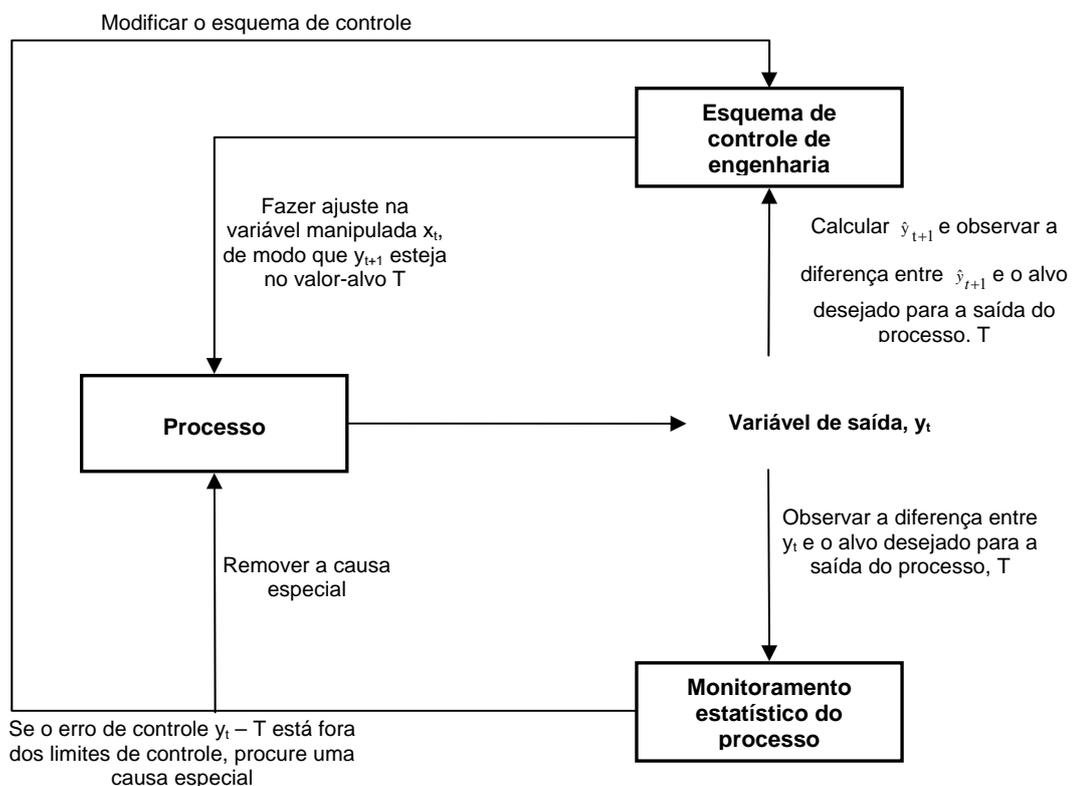


Figura 1 - Relação do Controle de Engenharia e do Controle Estatístico de Processo
[Fonte: Adaptado de Montgomery (2004)]

Em Tsung e Tsui (2003) é ressaltada a importância da integração entre CEP e CEnP, visando reduzir as variabilidades do processo e, principalmente, reduzirem-se as falhas de especificação. Em seu estudo, esses autores utilizaram o controle estatístico monitorando as variáveis de saída e as de ações do controlador de mínimo erro quadrático médio. Investigam como as compensações do controlador afetam o padrão médio de deslocamento do processo monitorado.

Reynolds e Park (2009), investigam as cartas de controle e combinações para detectar causas especiais que afetam processos sob a gerência do controle automático de processo ou controle de engenharia. Concluem como necessário o desenvolvimento de maiores estudos envolvendo as duas áreas.

Yu, Zhang e Xu (2009) ressaltam que as pesquisas sobre CEP e CEnP foram originalmente conduzidas em paralelo. A fim de aperfeiçoar o efeito do controle de processo, nos últimos anos as pesquisas começam gradualmente caminhar no sentido da integração cada vez maior das técnicas.

Existe a busca por uma interação mais direta entre as duas técnicas, considerando uma integração refletindo diretamente a relação apresentada na Figura 1, em que o controlador venha a modificar de forma autônoma seu esquema de controle (com base em sua lei de controle), considerando informações vindas do monitoramento estatístico, proporcionando, assim, uma forma de autoajuste conforme sugerido por Capilla et al. (1999).

1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Devido ao caráter de implementação direta dos conhecimentos adquiridos quanto à natureza, o método deste estudo científico é classificado como Pesquisa Aplicada, sendo o conhecimento gerado direcionado a um problema específico (OLIVEIRA, 2001). Quanto à forma de abordagem, trata-se de uma Abordagem Quantitativa, uma vez que são manipulados dados numéricos referentes aos dados provenientes de variáveis de processo e as suas relações. Quanto aos objetivos é classificada como Descritiva uma vez que são estabelecidas relações entre as variáveis do sistema estudado.

A abordagem do ponto de vista dos procedimentos técnicos é enquadrada como Modelagem e Simulação, em que um sistema produtivo, ou parte dele, é descrito através de técnicas matemáticas e simulada a sua operação com o emprego de técnicas computacionais, na qual é investigada a relação entre as variáveis envolvidas (MIGUEL, 2007).

O trabalho é precedido de uma revisão bibliográfica sobre o controle estatístico de processo, de forma abrangente, buscando o estado da arte das cartas de controle para processos autocorrelacionados, além do controle de engenharia de processo. Verifica-se a interação das duas técnicas na busca pela redução da variabilidade no controle de produção, mantendo-se um processo, o mais próximo possível, de valores especificados.

Em um processo, com mais de uma variável de entrada e de saída, um controlador de engenharia de processo é especificado para gerenciar o sistema. Este procura manter o sistema

sob controle, no qual as variáveis de saída devem permanecer dentro dos limites de controle. Perturbações são corrigidas através dos ajustes de variáveis diretamente relacionadas. Na ocorrência de anormalidades e falhas de ajuste do controlador, o controle estatístico de processo sinaliza o evento. Para isso, cartas de controle baseadas em modelos são utilizadas. Esta combinação aumenta a confiabilidade do sistema, tornando mais sensível a percepção e diagnóstico de falhas, diminuindo o custo com desperdícios e problemas de qualidade.

Os dois tipos de controle (CEnP e CEP) são compatibilizados de forma a programar como e em que momentos atuarão. O CEnP buscará a compensação e regulagem do processo através de ajustes das variáveis manipuláveis, minimizando a variabilidade de saída em torno de um valor-alvo. O uso do CEP visará manter o processo sobre controle e também identificar possíveis causas especiais.

O estudo toma como base a análise de parte do processo de uma indústria, porém os dados e o comportamento das variáveis são simulados. O comportamento deste modelo é verificando em conjunto com as ferramentas e métodos propostos. Devido à complexidade de interação com o processo industrial, principalmente quanto à criação de cenários, utiliza-se a simulação numérica em um pacote computacional que permite a sua análise e comprovação.

A metodologia é apresentada em três módulos. O primeiro módulo aborda a especificação do processo e definições do controlador e das cartas de controle. O segundo trata da operação integrada CEnP e CEP. No terceiro módulo é avaliada a operação integrada com inserções propositas de falhas. Foi realizado um caso aplicado possibilitando obter conclusões.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese, para melhor apresentação e compreensão, está dividida em cinco capítulos discriminados a seguir.

No Capítulo 1 é apresentado o problema abordado na pesquisa, os objetivos pretendidos, as justificativas do estudo e engloba também a metodologia de pesquisa, a divisão dos capítulos e delimitação da tese.

O referencial teórico relaciona os temas pertinentes a esta tese: o controle estatístico de processo, em destaque a abordagem baseada em modelos, e o controle de engenharia de processo com os seus sistemas de ajustamento e retroação, bem como, as integrações entre as duas formas de controle relatadas em estudos já realizados. Estes conteúdos são apresentados no Capítulo 2.

No Capítulo 3, são descritos o método empregado, as técnicas e estratégias de implementação, que consiste em como se pode aplicar o ferramental proposto, utilizando o CEP e CEnP para monitoramento e controle de processos.

A aplicação do método proposto, através da elaboração de cenários, com dados simulados de um processo, é demonstrada no Capítulo 4. A combinação do Controle Estatístico com o de Engenharia é aplicada através de dados simulados e os resultados deste estudo, apresentados.

No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais com as conclusões do trabalho e sugestões para futuros trabalhos e encaminhamentos.

1.6 DELIMITAÇÕES

A integração proposta tem como finalidade uma aplicação em processos contínuos, nos quais a monitoração e controle são de grande importância. Não foram consideradas as variações com os períodos de início da produção, troca de produtos (*setups*) ou ajustes para o processamento de novos, alterações na especificação dos já existentes ou mesmo variações da produção em lotes.

Considera-se a existência de uma única linha de produção, não existindo o compartilhamento da mesma com outras operações. O volume produzido e as possíveis alterações de demanda são considerados como variáveis inerentes ao comportamento do processo, não sendo utilizadas técnicas de previsão específicas para estas variáveis.

A modelagem matemática abordada visa possibilitar a aplicação da simulação numérica, estudo e manipulação das variáveis através do Controle de Engenharia, em que a sua quantificação é obtida de forma a representar os comportamentos em situações reais. O estudo não visa otimizações envolvendo as relações obtidas na formulação do modelo.

A influência dos problemas operacionais (como por exemplo: sujeira nos barramentos, contaminações do banho, desgastes de eletrodos, oscilações da rede elétrica sobre o retificador) são considerados indiretamente nas gerações de valores das variações naturais do processo. Não foram considerados os efeitos de qualidade dos produtos utilizados no banho ou dos produtos a serem processados. Quanto às simulações, não foram simuladas paradas inesperadas da produção ou operações fora do horário normal de trabalho (horas extras e jornadas eventuais aos finais de semana).

Não fez parte do estudo a avaliação econômica de melhoria da qualidade com a implementação da aplicação proposta. Também não foram considerados os custos de

equipamentos para implementação real no processo (sensores, atuadores). Foi apenas verificada a viabilidade técnica de operação confrontando-se a especificação dos materiais necessários com os disponíveis comercialmente.

As abordagens envolvendo análises multivariadas não foram empregadas neste trabalho. Com o envolvimento de mais de uma variável controlada (saída), foram utilizadas múltiplas cartas de controle baseadas em modelos de autocorrelação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, estão relacionadas as principais abordagens sobre o tema proposto, dividido em três partes. A primeira apresentam-se as principais técnicas sobre o Controle Estatístico de Processo, priorizando monitorações com dados autocorrelacionados (CEP dados autocorrelacionados), suas características e aplicações. Na segunda parte, aborda-se o Controle de Engenharia de Processo (CEnP), do inglês *Engineering Process Control* (EPC), as suas variações, como *Automatic Process Control* (APC). Na terceira e última parte são abordadas as integrações realizadas entre os dois sistemas, tendo como foco as integrações envolvendo dados correlacionados.

2.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

O Controle Estatístico de Processo - CEP (*Statistical Process Control* - SPC), ligado ao controle da qualidade moderno iniciou-se nos Estados Unidos nos anos 20, na Companhia Telefônica Bell. Em 1924, Walter Shewhart elaborou a primeira carta de controle e um uso racional para o processo de monitoração e controle. Como uma das ferramentas do Controle Estatístico de Processo (CEP), as cartas de controle buscam monitoramento contínuo de determinadas características de qualidade, julgadas importantes no processo ou produto. Sinalizam indícios da existência de um evento não aleatório interferindo nos sistema, desta forma identificando e retirando este evento, asseguram menor variabilidade e maior qualidade conseqüentemente. Diagnósticos e detecção antecipada de falhas são importantes para as indústrias de manufatura e de outros ramos, no controle de qualidade dos produtos (MACGREGOR; KOURTI, 1995; KOURTI; LEE; MACGREGOR, 1996; YOUNG; WINISTORFER, 2001).

Uma carta de controle típica para uma característica de qualidade obtida a partir de amostras apresenta: uma linha central (LC) que representa o valor médio da característica de qualidade esperada em um estado de controle, dois limites, superior (LSC) e inferior (LIC), que são definidos em termos de desvios padrões, entre os quais os pontos amostrais sinalizam que o processo está sob controle. No caso de alguma amostra estar fora dos limites, existe a indicação de instabilidade e necessidade de investigar a existência de causas especiais responsáveis por esta situação. Uma vez encontradas, estas podem ser eliminadas.

A carta de controle é um teste de hipótese que verifica se o processo está sob controle estatístico (HINES *et al.*, 2006). O modelo geral de um gráfico de controle pode ser visto conforme as equações (1) a (3).

$$LSC = \mu_w + K\sigma_w \quad (1)$$

$$LC = \mu_w \quad (2)$$

$$LIC = \mu_w - K\sigma_w \quad (3)$$

Com que, W é a estatística da amostra que mede alguma característica de qualidade; μ_w é a média de W ; σ_w é o desvio padrão da distribuição amostral de W , K é a distância dos limites de controle a partir da linha central, unidades de desvio-padrão.

Mesmo que todos os pontos estejam dentro dos limites em um gráfico de controle, se eles se comportarem de maneira sistemática ou não aleatória, é uma indicação de que o processo está fora de controle. Com a identificação rápida destes comportamentos pode-se intervir com mais rapidez para eliminar a fontes de causas especiais, minimizando custos.

Além das cartas de controle de Shewhart, como ficaram conhecidas, variações destas foram desenvolvidas, visando melhorar a sensibilidade na detecção de mudanças de parâmetros do processo. As cartas de Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas (MMEP ou EWMA) e de Soma Cumulativa (CUSUM), desenvolvidas com esta finalidade, são mais efetivas na identificação de pequenos desvios (REYNOLDS JR.; STOUMBOS, 2005). Para maiores detalhes sobre as cartas de controle EWMA e CUSUM ver Montgomery (2004) e Devore (2006). Em Woodall (2000) e Woodall *et al.* (2004), são discutidos alguns pontos controversos envolvendo a utilização de cartas de controle para monitorar processos e perfil de qualidade dos produtos. Nessa discussão os autores visam aproximar os estudiosos do CEP com os responsáveis pelas aplicações práticas das cartas de controle, esclarecendo e desmistificando pontos de conflito de informações.

As empresas, com uma maior maturidade nos procedimentos de gerenciamento da produção, utilizam de forma intensiva o Controle Estatístico de Processo e outras ferramentas estatísticas como as de planejamento de experimentos. O Controle Estatístico de Processo tem sido aplicado nos mais diversos ramos apesar de ter se originado e difundido nos ambientes industriais de produção seriada. Exemplo disso pode ser visto nos controles de sinal analítico líquido na indústria farmacêutica e no controle de uma planta de tratamento de resíduos industriais (ROSA, *et al.* 2007; ALBAZZAZ; WANG; MARHOON, 2005).

Os processos modernos são, em geral, sistemas automatizados e informatizados que podem capturar um grande número de dados continuamente das variáveis do processo, alguns deles atualizados a cada segundo ou menos. Tais dados podem ser utilizados para monitorar e diagnosticar o desempenho do sistema de forma mais efetiva, gerando variáveis que deixam de ser independentes umas das outras. Quando da ocorrência de um evento no processo, as variações de algumas das medições podem ser reflexo da mesma interferência, ou seja, existindo correlação entre elas (MACGREGOR; KOURTI, 1995).

Técnicas avançadas para as cartas de controle de processos industriais estão sendo desenvolvidas nas quais, dados *on-line* estão disponíveis e necessitam de rápida resposta para situações indicadas como fora de controle. O grande impacto da tecnologia computacional nos ambientes de controle de processo, tem permitido o acesso a grande quantidade informações com altas taxas de atualização. Uma consequência da aquisição de dados automatizada é que possibilitou reconhecer processos com variáveis autocorrelacionadas, que anteriormente não eram detectadas (PALM *et al.*; 1997).

2.1.1 Controle estatístico com dados autocorrelacionados

O Controle Estatístico de Processo envolvendo dados autocorrelacionados está cada vez mais sendo difundido e empregado em processos industriais. As dificuldades de monitoramento, controle e identificação das variáveis que estão sendo disponibilizadas em tempo real, atualizadas constantemente e em grande quantidade, tem tornado essencial o emprego de técnicas mais robustas. No atual cenário da indústria de manufatura, onde se dispõe de registros avançados e automáticos de dados e técnicas de inspeção precisa, torna-se necessário a implementação do Controle Estatístico de Processo que possa ser utilizado nestes ambientes automatizados envolvendo relações sequenciais dos dados. Com as altas taxas de dados de entrada, a identificação dos sinais de fora de controle deve ser percebida assim que possível, visando a eliminação das fontes de causas anormais e procurando manter baixo o custo ligado às perdas (YU; XI, 2007).

A aplicação das cartas de controle tradicionais, baseadas no modelo de Shewhart, pressupõe que os dados gerados pelo processo sob controle sejam independentes e sigam uma distribuição normal e com média μ e desvio padrão σ . Mudanças nestes parâmetros são consideradas alterações que proporcionam a sinalização de anormalidade pela Carta. Na condição dita sob controle, a independência dos dados é justificada por estarem somente presentes variações decorrentes da parte aleatória, representadas por uma componente de erro,

com média zero e desvio padrão σ . Estas considerações de aleatoriedade geralmente não são observadas nos dados advindos de processos automatizados, nos quais as variáveis são lidas e controladas regularmente, em curtos intervalos, possuindo desta forma algum tipo de autocorrelação (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

Processos nos quais medidas consecutivas das variáveis são monitoradas e a existência de inspeção automatizada cuja toda característica de qualidade é medida em cada unidade na ordem de produção, são situações passíveis da ocorrência de autocorrelação dos dados (ALTIOK; MELAMED, 2001). Com a evolução dos sistemas de produção, com o aumento da automação empregada no gerenciamento e controle das operações industriais, os dados passaram a violar uma das mais importantes considerações das cartas de controle, a sua independência. Mesmo pequenas correlações entre sucessivas observações da variável monitorada, fazem com que as Cartas convencionais não operem de forma satisfatória, principalmente com excessos de alarmes falsos, que sem tratamento adequado inviabiliza seu emprego (MONTGOMERY, 2004). Em situações em que a autocorrelação não é considerada, esta irá influenciar na sinalização de forma errônea (desnecessária) das cartas de controle, uma vez que altera a quantidade média de observações necessárias até que seja emitida uma sinalização de fora de controle ARL (*average run length*) (MOREIRA, 2005; LU; REYNOLDS, 1999a).

Nas situações nas quais não se pode pressupor a independência dos dados, aumenta-se a probabilidade de uma observação ser registrada de forma errônea. Como consequência poderá resultar em falhas operacionais das plantas de manufatura e na sua instrumentação associada, como em controladores e ajustes desacreditados para o seu gerenciamento (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2004; YOUNG; WINISTORFER, 2001).

Em um processo quando a autocorrelação dos dados é significativa, se faz necessário modificar a metodologia tradicional para considerá-la. Uma alternativa recomendada é a de ajustar modelos de séries temporais, removendo a autocorrelação, e a utilizar os resíduos de previsão a partir destes modelos em cartas de controle tradicionais (REYNOLDS; LU, 1997; MONTGOMERY, 2004; NOFFSINGER; ANDERSON, 2002).

Na monitoração de processo autocorrelacionados, duas vertentes são identificadas. Na primeira, cartas de controle tradicionais são utilizadas para monitorar os resíduos obtidos entre os valores reais e os ajustados por meio de técnicas de previsões de séries temporais (cartas de controle baseadas em modelos). Na segunda, são monitorados os valores das observações originais através de cartas de controle tradicionais sendo que são propostos ajustes nas definições dos limites de controle e técnicas de estimação de parâmetros (LU;

REYNOLDS, 2001).

Na sequência são abordados os ajustes dos dados baseados em modelos de séries temporais, Modelos ARIMA, e os resíduos monitorados por cartas de controle tradicionais. São apresentadas também as versões das cartas de controle EWMA e CUSUM aplicadas diretamente às observações e aos resíduos sendo que alguns autores propõem modificações para melhorar o seu desempenho, além de outras principais técnicas abordadas na literatura sobre as cartas de controle envolvendo dados autocorrelacionados.

2.1.2 Ajuste por modelos ARIMA

Os modelos de séries temporais baseados na metodologia Box e Jenkins (BOX, JENKINS; REINSEL, 1994) são um dos mais utilizados nos tratamentos dos dados para remoção de autocorrelações. Esta metodologia consiste na identificação de um modelo e estimação de seus parâmetros de forma que possa capturar o comportamento dos dados. É buscado ajustar um modelo que melhor explique o comportamento da variável observada, deixando as variações inexplicáveis a cargo de uma componente aleatória (ruído branco). Desta forma, é possível o emprego de cartas de controle tradicionais monitorando os resíduos (diferença entre o valor real e o ajustado pelo modelo), os quais sinalizarão quando alguma outra influência não capturada pelo modelo venha a alterar o seu comportamento. O rigor matemático desta abordagem exige um maior conhecimento e experiência do usuário para aplicá-la adequadamente (MONTGOMERY, 2004).

Também conhecidos como modelos ARIMA, referem-se a uma classe de modelos lineares que associam, de forma conjunta, as partes autorregressiva (AR), integral (I) e de médias móveis (MA). A ordem destes modelos é indicada pela quantidade de seus parâmetros que seguem a sequência ARIMA (p,d,q).

Pode-se, primeiramente, abordar os modelos autorregressivos (AR). Eles são representados por uma soma ponderada de p valores passados adicionados a um ruído (parte aleatória) e que, em sua forma geral, pode ser apresentado conforme equação (4) (MORETTIN; TOLOI, 2004). Em função da quantidade de termos autorregressivos existentes no modelo, pode-se dizer que o modelo é de ordem p , AR(p).

$$Z_t = \delta + \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + a_t \quad (4)$$

Em que, Z_t é o valor observável da série temporal no instante t ; δ representa o termo

constante da série; ϕ_i corresponde ao i -ésimo parâmetro autorregressivo, $i = 1, 2, \dots, p$ e $1 < \phi_i < 1$; a_t é o erro no instante t (ruído branco), $N \sim (0, \sigma_a^2)$.

Outro conjunto de modelos são os de Médias Móveis (MA), que podem ser representados pela soma ponderada dos ruídos (erros), observados em cada período passado. A representação geral deste modelo é definida pela equação (5) (MORETTIN; TOLOI, 2004). Em função da necessidade de utilização, são especificados q parâmetros para melhor representar a série analisada. Define-se a ordem do modelo de Médias Móveis como sendo MA(q).

$$Z_t = \delta + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (5)$$

No qual, Z_t é o valor observável da série temporal no instante t ; δ representa o termo constante da série; θ_i corresponde ao i -ésimo parâmetro médias móveis, $i = 1, 2, \dots, q$ e $1 < \theta_i < 1$; a_t é o erro (ruído) no instante t não explicáveis pelo modelo, $N \sim (0, \sigma_a^2)$.

Os modelos Autorregressivos (AR) e os modelos de Médias Móveis (MA) usados isoladamente podem requer uma grande quantidade de parâmetros. Se forem combinados irão gerar um novo modelo conhecido como modelo Autorregressivo e de Médias Móveis (ARMA) que pode gerar um modelo mais parcimonioso (menos parâmetros). A representação geral deste modelo é obtida por (6).

$$Z_t = \delta + \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \dots + \phi_p Z_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (6)$$

No qual, Z_t é o valor observável da série temporal no instante t ; δ representa o termo constante da série; ϕ_i corresponde ao i -ésimo parâmetro autorregressivo, $i = 1, 2, \dots, p$ e $1 < \phi_i < 1$; θ_i corresponde ao ao i -ésimo parâmetro médias móveis, $i = 1, 2, \dots, q$ e $-1 < \theta_i < 1$; a_t é o erro (ruído) no instante t não explicáveis pelo modelo, $N \sim (0, \sigma_a^2)$.

Os modelos AR(p), MA(q) e ARMA são válidos para representação de séries estacionárias. Séries estacionárias são aquelas que, no decorrer do tempo, permanecem com seus valores em torno de uma média constante, possuem variância constante e a função de covariância; só depende das diferenças temporais entre as observações. Das séries encontradas na prática, grande parte não são estacionárias e necessitam ser colocadas nesta forma para poderem ser analisadas. Uma série não estacionária pode ser transformada em estacionária desde que ela seja não estacionária homogênea, tomando-se um número finito de

diferenças d (MORETTIN; TOLOI, 2004; MAKRIDAKIS; WHEELWRIGHT; HYNDMAN, 1998). A diferenciação é realizada utilizando-se o filtro de integração d . Uma série não estacionária, a qual é tomada uma diferença ($d=1$) tem sua condição de estacionariedade obtida através da equação (7).

$$\omega_t = Z_t - Z_{t-1} = (1 - B)Z_t = \Delta Z_t \quad (7)$$

Em que, ω_t é a série tornada estacionária; B é o operador de retardo ou translação para o passado; Z_t é o valor observável da série temporal no instante t ; Z_{t-1} é o valor observável da série temporal no instante $t-1$; $\Delta = 1 - B$.

Uma forma genérica de representação, quando forem tomadas d diferenças, é representada pela equação (8).

$$\omega_t = \Delta^d Z_t \quad (8)$$

Na maioria dos casos, uma ou duas diferenças ($d = 1, d = 2$) são suficientes para deixar as séries na forma estacionária (MORETTIN; TOLOI, 2004). Se ω_t é uma diferença de Z_t , então Z_t é uma integral de ω_t , do qual advém o modelo autorregressivo integrado de médias móveis (ARIMA), que pode ser designado por ARIMA (p, d, q), no qual p e q são respectivamente a quantidade de parâmetros AR e MA e d o número de diferenças necessárias para transformar a série em estacionária. O modelo em sua forma geral é representado pela equação (9).

$$\omega_t = \phi_1 \omega_{t-1} + \phi_2 \omega_{t-2} + \dots + \phi_p \omega_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (9)$$

Em que, ω_t é o valor da série no instante t após tomadas as diferenças; ϕ_i são os parâmetros autorregressivos, $i = 1, 2, \dots, p$; θ_i são os parâmetros de médias móveis, $i = 1, 2, \dots, q$; a_t representa o ruído branco, (ruído com média zero e variância σ_a^2).

Uma vez conhecidos os modelos, a obtenção do modelo que melhor representa a série temporal leva em consideração um ciclo iterativo, em que a sua determinação e estruturação propriamente dita está baseada nos dados. Este ciclo pode ser resumido nas etapas seguintes, nas quais uma classe de modelos é considerada para análise (MORETTIN; TOLOI, 2004).

- *identificação da estrutura do processo gerador* - identifica-se com base na análise dos correlogramas das autocorrelações e autocorrelações parciais, além da não estacionariedade, as ordens p , d e q da estrutura, é uma das fases críticas do método;
- *estimação* – fase em que os parâmetros de um modelo da estrutura identificada são estimados, sendo que nesta etapa é necessária a utilização de um algoritmo de programação não linear;
- *verificação* – através de uma análise de resíduos procura-se verificar o modelo mais adequado;
- *previsão* – com o modelo devidamente estimado e verificado, pode-se realizar previsões para futuros valores da série. Porém, neste estudo, serão obtidos apenas os valores preditos (valores ajustados).

Para maiores detalhes sobre os modelos ARIMA e suas fases de aplicação, consulte Box, Jenkins e Reinsel (1994) e Makridakis, Wheelwright e Hyndman (1998). Após a obtenção do melhor modelo, devidamente ajustado aos valores das medições realizadas, os resíduos obtidos deste ajuste são então monitorados através de cartas de controle.

2.1.2.1 Cartas de controle para o monitoramento dos resíduos

Após estar devidamente determinado o modelo que melhor representa o comportamento dos dados, este é utilizado para calcular o valor ajustado de cada observação. A família de modelos ARIMA é largamente empregada para estimação e filtragem da autocorrelação do processo (GAL; MORAG; SHMILOVICI, 2003).

A estrutura responsável pela geração da autocorrelação deverá ser identificada da forma mais acurada possível. Assim, há a possibilidade de computar o resíduo entre cada dado e seu respectivo valor ajustado, já livre da influência da autocorrelação. Utilizando-se a equação (10) obtêm-se os valores a serem monitorados através de cartas de controle como: Shewhart, EWMA, CUSUM (DYER; CONERLY; ADAMS, 2003).

$$e_t = Z_t - \hat{Z}_t \quad (10)$$

Em que, e_t é o valor do resíduo entre o dado real e o ajustado no instante t ; Z_t é o valor observável da série temporal no instante t ; \hat{Z}_t é o valor ajustado pelo modelo AR(p) no instante t ;

Como resultado de seu estudo comparativo, Noffsinger e Anderson (2002) apresentam

que para dados com grande autocorrelação, o emprego de cartas de controle monitorando os resíduos de séries ajustadas por modelos ARIMA proporciona uma técnica mais consistente em detectar causas especiais em processo contínuos. Outros estudos também comprovaram o bom desempenho da monitoração de resíduos (APLEY; SHI, 1999; APLEY; LEE, 2003; LU; REYNOLDS, 2001; SILVA; FONTANINI; CORSO, 2007).

Para aplicação das cartas de controle aos resíduos, necessita-se de um conhecimento básico de modelos de séries temporais para selecionar melhores modelos e ajuste de parâmetros. Nem sempre os responsáveis pelo controle do processo dominam este conhecimento, sem o qual a eficiência e desempenho destas cartas podem ficar comprometidos (TIMMER; PIGNATIELLO; LONGNECKER, 2000).

Um estudo verificando o impacto da não normalidade das observações nos métodos de CEP autocorrelacionados é apresentado em Castagliola e Tsung (2005). Os autores apresentam alternativas para que as cartas de controle baseadas em resíduos sejam menos sensíveis e mais robustas quando da ocorrência deste tipo de situação.

Uma aplicação recente das cartas de controle baseada nos resíduos, ou cartas de controle de causas especiais como também são conhecidas, faz parte do estudo de Elevli, Uzgoren e Savas (2009). Estes pesquisadores empregaram estas cartas para o controle de concentrados na indústria química. Realizaram um comparativo entre as cartas de controle para observações individuais, monitorando diretamente as medições, e as cartas monitorando os resíduos, após determinação de melhores modelos ARIMA ajustados aos dados. Sendo um processo autocorrelacionado, verificaram a ineficiência da monitoração direta dos dados, gerando alarmes falsos.

A utilização de cartas de controle para resíduos ou diretamente sobre dados originais do processo é discutida por alguns autores. Questiona-se que as cartas de controle baseadas em observações também podem ser efetivas, dependendo da relação do modelo de séries temporais produzidos na presença de inércia dos elementos do processo, em relação à magnitude dos distúrbios que venham a ocorrer. É destacada a maior complexidade de estimação de modelos e parâmetros a serem ajustados às observações para cálculos dos resíduos (RUNGER; 2002; FALTIN *et al.*; 1997).

2.1.3 Carta de controle EWMA envolvendo dados autocorrelacionados

Nos processos em que a sua média não oscile muito rapidamente e se as observações forem positivamente correlacionadas, procedimentos baseados na carta de controle de Médias

Móveis Exponencialmente Ponderadas (MMEP) ou do inglês *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) obtêm bons resultados (MONTGOMERY; 2004). Consiste em ajustar um modelo de Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas aos dados, com a escolha apropriada do parâmetro λ (minimizando o erro quadrático), e grafando os erros de predição um passo a frente (e_t) em uma carta de controle. Estes erros, considerados independentes e identicamente distribuídos com média zero, seguem a seguinte relação (11).

$$P[\hat{x}_t(t-1) - 3\sigma \leq x_t \leq \hat{x}_t(t-1) + 3\sigma] = 0,9973 \quad (11)$$

Em que, $\hat{x}_t(t-1)$ é o valor previsto para a variável x estando no instante $t-1$; σ é o desvio padrão dos resíduos e_t .

Através da relação (11) e substituindo a previsão um passo a frente da carta de controle EWMA como referência central para o instante $t+1$, os limites de controle são definidos por (12) a (14).

$$LSC_{t+1} = z_t + K\sigma \quad (12)$$

$$LC_{t+1} = z_t \quad (13)$$

$$LSC_{t+1} = z_t - K\sigma \quad (14)$$

No qual, z_t é o preditor EWMA um passo a frente; σ é o desvio padrão dos resíduos e_t ; K é a distância dos limites de controle a partir da linha central, sugerido $K = 3$.

A observação x_{t+1} é comparada com estes limites para averiguar seu controle estatístico. Como as referências estão relacionadas a z_t , esta carta de controle EWMA possui linha central móvel.

O monitoramento de dados provenientes de processos correlacionados utilizando cartas de controle EWMA com linha central móvel, foi empregado por: Ye, Borrer e Zhang (2002) para o controle de invasão de computadores e em redes e sistemas de comunicação; Young e Winistorfer (2001), no processo contínuo de controle de umidade na indústria de compensados.

Um estudo abrangente foi realizado por Lu e Reynolds (1999a) envolvendo cartas de Controle EWMA diretamente aos dados e também aos resíduos. Concluíram que, o monitoramento sobre os resíduos, teve melhor desempenho. Os autores também apresentam recomendações de ordem prática para aplicações de monitoramentos com observações

autocorrelacionadas. Em outro estudo, Lu e Reynolds (1999b) utilizaram combinações de cartas de controle de Shewhart e EWMA para os dados originais e para os resíduos, visando monitorar média e variância. Mostraram que, das combinações realizadas, nenhuma delas obteve ótimo desempenho em toda a variedade de situações avaliadas. A que obteve melhores resultados foi a combinação entre a carta de controle EWMA das observações com a de Shewhart para os resíduos.

Os efeitos das estimativas dos parâmetros nas variações da média e variância de cartas de controle EWMA foram estudas por Jones, Champ, e Rigdon (2001). Perceberam que o tamanho da amostra para estimar os parâmetros pode ser frequentemente maior que o esperado, estando diretamente ligado à constante de alisamento.

Cartas de controle EWMA baseadas nos resíduos, com os limites de controle alargados, são propostas por Apley e Lee (2003). Os limites de controle são determinados baseados no cenário mais pessimista das situações avaliadas, envolvendo a variância da carta dentro de um intervalo de confiança apropriado.

Visando monitorar o desempenho de processos na presença de dados dependentes do tempo sujeitos aos deslocamentos da média e na estrutura de autocorrelação, English *et al.* (2000) propõem cartas de controle \bar{X} e EWMA para os resíduos com limites de controle fixos. Os autores citam que, sem o auxílio dos parâmetros das séries temporais, existe uma grande dificuldade de anormalidades serem detectadas com cartas de controle monitorando diretamente os dados.

Claro, Costa e Machado (2007) abordam o monitoramento de processos autocorrelacionados com observações coletadas em subgrupos racionais. Com a magnitude da autocorrelação, de baixa a moderadamente alta, estudaram o efeito desta nas propriedades das cartas de controle de médias. Propuseram a utilização da carta EWMA diretamente aos dados, com limites de controle adaptados a existência da correlação no modelo do processo. Esta carta permitiu detectar pequenos desvios na média, possuindo grande sensibilidade.

Vermaat, Does e Bisgaard (2008) procuram demonstrar uma expressão que permita facilitar a determinação da variância para cartas de controle EWMA para as observações de processos autocorrelacionados. Com a obtenção da variância, esta pode ser utilizada para o cálculo dos limites de controle modificados. Para os autores essa proposição de carta, facilita o entendimento e a interpretação por parte dos responsáveis pelo processo.

Vermaat, Meulen e Does (2008) também avaliaram o comportamento da variância comparando três diferentes métodos de estimação da estatística EWMA aplicada a dados autocorrelacionados. Como resultado, indicam um estimador para parametrizar a carta de

controle EWMA.

Pelas pesquisas publicadas em período recente, percebe-se que a busca por uma melhor determinação de parâmetros e de limites de controle para a carta EWMA ainda desperta interesse, principalmente tratando-se da monitoração de dados autocorrelacionados. Dependendo do comportamento do processo estudado, algumas proposições apresentaram melhores desempenhos que outras. Várias alternativas são estudadas: limites de controle alargados ou modificados, monitoramento dos resíduos, linha central móvel, combinações com cartas \bar{X} e outras. Tomando-se por base os relatos de English *et al.* (2000), neste trabalho será empregada a carta EWMA monitorando os resíduos, provenientes dos ajustes de modelos ARIMA.

2.1.4 Carta de controle CUSUM envolvendo dados autocorrelacionados

A carta de controle da Soma Cumulativa (do inglês *Cumulative Sum* – CUSUM) é uma boa alternativa para detecção de deslocamentos da média de processos, inclusive para pequenas mudanças (ATIENZA; TANG; ANG, 2000). Consiste em monitorar as somas cumulativas dos desvios dos valores da amostra de um valor-alvo. Esta quantidade, obtida pela equação (15) é relacionada na carta com sua respectiva amostra ($n \geq 1$).

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{x}_j - \mu_0) \quad (15)$$

Em que, C_i soma cumulativa incluindo a amostra i ; \bar{x}_j é a média da amostra j ; μ_0 é o valor-alvo da média do processo.

Para determinação dos limites de controle, existem duas formas de especificação, tabular e máscara V. O cusum tabular acumula desvios de μ_0 que estão acima ou abaixo do alvo, e quando estes desvios ultrapassam um determinado intervalo de decisão, o processo é considerado fora de controle. O cusum máscara V, leva em consideração uma forma geométrica em forma de V, delimitando uma região onde os valores sucessivos da estatística cusum, calculados com observações padronizadas, são avaliados quanto ao controle do processo. Maiores detalhes sobre a especificação e construção destas cartas podem ser obtidos em Montgomery (2004).

As propriedades da carta CUSUM, na presença de dados correlacionados de nível baixo a moderadamente alto, foram verificados por Runger e Willemain (1995) e Vanbrackle

e Reynolds (1997). O comprimento médio de sequência (*average run length* - ARL) desta carta é fortemente afetado pela autocorrelação dos dados. Com este tipo de carta, é possível obterem-se resultados acurados. Para tal, os limites de controle devem ser corretamente determinados.

Lu e Reynolds (2001) estudaram o comportamento da carta de Controle CUSUM monitorando processos correlacionados. Apresentam uma técnica para determinação dos parâmetros da carta, visando aumentar a sua sensibilidade na detecção de deslocamentos da média. Avaliaram o desempenho tanto da utilização das observações originais quanto da aplicada aos resíduos de modelos de previsão. As duas formas de monitoramento obtiveram êxito, exceto em situações em que a autocorrelação e o deslocamento da média eram muito grandes.

Uma variação da carta CUSUM para detectar mudanças de deslocamentos na média do processo é proposta por Atienza, Tang e Ang (2002). Utilizando diretamente observações autocorrelacionadas nesta técnica, uma estatística é calculada, cujo valor sinaliza a ocorrência do deslocamento. Os autores concluem que o desempenho da sua proposição compete com as cartas de Controle Shewhart e CUSUM baseadas nos resíduos. Em trabalhos anteriores Atienza, Tang e Ang (2000) propuseram uma alternativa para os limites da carta CUSUM na qual uma máscara parabólica visava detectar deslocamentos da média e Atienza, Tang e Ang (1997) realizaram um estudo comparativo com um sistema para detectar alterações na média, variância e no comportamento estocástico dos dados.

Uma carta CUSUM tabular livre de distribuição é apresentada por Kim *et al.*, (2007). Esta carta está baseada diretamente nas observações obtidas do processo autocorrelacionado ou de médias de lotes de qualquer tamanho podendo ser empregada quando o comportamento dos dados não segue uma distribuição de probabilidade conhecida, dificultando determinarem-se os limites de controle. Os resultados apresentados mostram que a carta reage de forma mais rápida na presença de deslocamentos do que outras cartas CUSUM.

Através da pesquisa bibliográfica pode-se constatar que, também com as cartas CUSUM, diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas no sentido de obterem-se melhores desempenhos na identificação de causas especiais, principalmente em processos com dados autocorrelacionados. Novas abordagens estão sendo propostas, não somente monitorando os resíduos, mas também utilizando-se os dados originais. Modificações de técnicas para determinar os melhores parâmetros das cartas, e a evolução das formas de detectar alterações do comportamento do processo estão sendo desenvolvidas.

2.1.5 Cartas de controle com modificações nos limites de controle

Para processos com características de qualidade com autocorrelação que exprimem um comportamento cujo nível médio oscila ao longo do tempo, Costa, Epprecht e Carpinetti (2004) recomendam considerar o valor da variável como sendo composta por duas parcelas. A primeira, é responsável pelo nível médio da variável monitorada, a qual oscila gradualmente ao longo do tempo, responsável pela autocorrelação. A segunda parcela é referente ao ruído ou variação aleatória de curto prazo, com média zero e independente no tempo. Os autores propõem alargar os limites de controle do gráfico de médias, levando em consideração a variabilidade total devida à variabilidade do nível da série e do ruído de curto prazo. Os autores sugerem que, no cálculo dos limites de controle, o desvio padrão seja obtido através de medidas diretas, empregando uma quantidade de amostras iniciais conforme equações (16) e (17).

$$\hat{\sigma}_{\bar{X}} = S_{\bar{X}} / c \quad (16)$$

$$S_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\bar{X}_i - \bar{\bar{X}})^2}{m-1}} \quad (17)$$

Em que, c é uma constante determinada pelo número de m amostras iniciais; m é o número de amostras iniciais; \bar{X}_i é a média aritmética da amostra i de tamanho n ;

Os limites de controles para este tipo de carta são determinados pelas equações (18) a (20), nas quais empregam como referencia central a média das médias amostrais iniciais.

$$LSC = \hat{\mu}_0 + K\hat{\sigma}_{\bar{X}} \quad (18)$$

$$LC = \hat{\mu}_0 \quad (19)$$

$$LSC = \hat{\mu}_0 - K\hat{\sigma}_{\bar{X}} \quad (20)$$

Em que, $\hat{\mu}_0$ é a média das médias amostrais $\bar{\bar{X}}$; $\sigma_{\bar{X}}$ é o desvio padrão das médias amostrais \bar{X} (16); K é a distância dos limites de controle a partir da linha central, sugerido $K = 3$.

Mingoti e Yassukawa (2008) estudaram cartas de controle construídas via metodologias de geoestatística para serem utilizadas no monitoramento da média de processos autocorrelacionados. O monitoramento é realizado através da carta de Shewhart aplicada à

variável original de interesse, considerando-se a estimativa de geoestatística para o desvio padrão do processo ao invés do desvio-padrão amostral S ou da estimativa via amplitude amostral. Com esta correção, a autocorrelação é incorporada nos limites de controle LSC e LIC . Concluíram que estes estimadores são melhores que a variância amostral e que os estimadores baseados na amplitude amostral para representar a variabilidade natural dos processos autocorrelacionados.

Em Knoth e Amin (2003) é visto em um estudo sobre a construção dos limites de tolerância das cartas de controle, estando presente a autocorrelação nas variáveis do processo. Com estes limites é assegurado que a produção não estará fora das especificações estabelecidas. Os autores sugerem técnicas para a escolha dos melhores estimadores para a variabilidade do processo e determinação do fator k , estabelecendo os múltiplos do desvio padrão na construção dos limites.

Uma carta de controle para dados autocorrelacionados, que monitora diretamente as observações originais é proposta por Moreira e Caten (2004). A proposta desta carta consiste em combinar a carta de controle ajustada por um modelo ARIMA (causas comuns) com a carta dos resíduos, de onde são adaptados os limites de controle, que são móveis. Para o cálculo destes limites é utilizado o desvio-padrão dos erros. Com este procedimento são acompanhados diretamente os dados de processo dispensando o monitoramento dos resíduos.

Nos trabalhos pesquisados, relacionados às modificações dos limites de controle para monitorar especificamente dados autocorrelacionados, percebe-se variações de abordagens, nas quais procuram explorar características específicas, conforme o tipo de técnica utilizada. Porém, cada um busca, na sua área, uma melhor forma de estimar a variância, de forma a minimizar o surgimento de alarmes falsos, além de melhorar a eficiência na detecção de alterações no processo. São também pesquisados os fatores k , indicando a distância dos limites de controle, a partir da linha central em múltiplos dos desvios-padrão. A busca por trabalhar diretamente com os dados originais, visa uma aplicação mais direta das cartas de controle.

2.1.6 Outras técnicas para monitoramento de dados autocorrelacionados

Além das cartas de controle baseadas em suas versões tradicionais, outras técnicas são sugeridas para se monitorar dados autocorrelacionados. Algumas são adequações às existentes ou mesmo novas versões envolvendo maior complexidade. Algumas destas técnicas são citadas na sequência.

Utilizando Redes Neurais, Balestrassi (2000) implementou um sistema semi-automatizado de CEP para dados autocorrelacionados ou não autocorrelacionados. Os dados obtidos a partir de sensores são modelados e então gerados resíduos. Nos resíduos atua uma rede neural reconhecendo os padrões de uma carta de Controle Estatístico. Consideram o seu desempenho satisfatório. Nesta mesma linha de pesquisa, Arkat, Niaki e Abbasi (2007) desenvolveram um modelo baseado em redes neurais para previsão e construção de uma carta CUSUM multivariada para os resíduos.

Jiang, Tsui e Woodall (2000) propuseram uma nova carta de controle baseada no monitoramento de uma estatística ARMA das observações originais autocorrelacionadas. Segundo os pesquisadores, levando em consideração a estrutura da autocorrelação existente, esta nova carta permite uma grande flexibilidade na escolha dos seus parâmetros. Com a escolha apropriada destes parâmetros, supera em desempenho outras cartas similares. Essa carta foi utilizada por Cheng e Chou (2008) em um sistema de decisão de estoques em tempo real obtendo bons resultados.

Wright, Booth e Hu (2001) propõem um método para detecção de anormalidades através de uma união de estimativas. Este procedimento visa possibilitar o controle estatístico de dados autocorrelacionados no qual não se tem disponível um histórico que possibilite ajustar modelos de séries temporais para a determinação dos resíduos para serem monitorados. Empregando uma linha base para acompanhamento, os autores citam o seu bom desempenho.

No estudo realizado por Jacobi, Souza e Pereira (2002) foi aplicado uma carta de Controle de Regressão para dados autocorrelacionados em que monitorou-se diretamente os valores observados e não os resíduos. Com esse procedimento os autores visam avaliar o efeito do conjunto dessas variáveis.

Uma nova metodologia para o CEP em processos não lineares e dependentes do estado é apresentada por Gal, Morag e Shmilovici (2003). Essa metodologia monitora os atributos estatísticos do processo comparando, a cada período de tempo, duas árvores de contextos. Uma delas é a de referência, representando o comportamento do processo sob controle, e a segunda é a monitorada representando o comportamento do processo a cada instante, gerada periodicamente. A distância entre as duas árvores é monitorada indicando a existência de mudanças significativas no processo requerendo intervenção.

Os resíduos obtidos através de modelos de regressão múltipla ajustados aos dados foram utilizados por Pedrini e Caten (2008) para o monitoramento de observações autocorrelacionadas. Em seu estudo, realizaram um comparativo de desempenho entre

monitorar esses resíduos por meio de carta de controle para medidas individuais e os provenientes de modelos ARIMA. Os autores obtiveram melhores resultados com as cartas de controle de resíduos de regressão destacando-se: em sinalização de causa especial; melhor estimativa de desvio-padrão; não perder as primeiras d informações quando a série não for estacionária e necessitar ser diferenciada. Estudos semelhantes, baseados em ajustes de regressão, são apresentados por Loredó, Jearkpaporn e Borrór (2002) e Shu, Tsung e Tsui (2004). Tais estudos baseiam-se no fato de que os resíduos de modelos de regressão, devidamente ajustados, não são correlacionados. Quando as variáveis de entrada são observáveis e se sabe da existência de relação entre as variáveis de entrada e saída, então o monitoramento dos resíduos, através das cartas de controle (Shewhart, EWMA, CUSUM), é indicado pelos autores como sendo uma boa alternativa para detectar deslocamentos da média das características de qualidade de interesse.

Evoluções das cartas de controle, visando suas aplicações em processos automatizados, com grande número de variáveis envolvidas e autocorrelacionadas, estão sendo desenvolvidas em suas versões multivariadas. Diversos estudos na atualidade têm realizado proposições destas aplicações como: variações da carta EWMA para uma versão multivariada (DYER; CONERLY; ADAMS, 2003; APARISI; DÍAZ, 2004); programa computacional para verificar o desempenho de métodos de controle estatístico de processos multivariados (MASTRANGELO, FORREST, 2002); carta de controle multivariada T^2 de Hotelling como extensão da carta de Shewhart para processos multivariados (APLEY; TSUNG, 2002; TOKATLI; CINAR; SCHLESSER, 2005; CHEN; HSIEH, 2007; WANG, TSUNG, 2008); cartas de controle baseadas e Análise de Componentes Principais visando reduzir o tamanho do problema e interpretando quais variáveis são mais importantes (VENKATASUBRAMANIAN *et al.*, 2003; GAITHER; FRAZIER, 2006; GONZÁLEZ; SÁNCHEZ, 2008); cartas de controle baseadas no método dos Mínimos Quadrados Parciais que procura relacionar as variáveis de entrada, dados do processo, com as de saídas, características de qualidade (UNDEY; TATARA; ÇINAR, 2003; REINIKAINEN, HOSKULDSSON, 2007).

Algumas aplicações do CEP multivariado podem ser vistas em: Albert e Kinley (2001) em um caso da indústria química; Chen *et al.* (2008) na indústria de monitores de cristal líquido (*liquid crystal display* – LCD); Rosa *et al.* (2007) na fabricação e controle de qualidade de remédios; Wu e Makis (2008) propõe gráficos χ^2 para aplicação na manutenção industrial e também Yang e Rahim (2005) em um processo estatístico envolvendo avaliação econômica na determinação dos parâmetros da carta de controle T^2 .

2.2 CONTROLE DE ENGENHARIA DE PROCESSO

O Controle de Engenharia de Processo (CEnP), também conhecido com *Automatic Process Control* (APC) teve origem no século XVIII, quando James Watt construiu um regulador centrífugo para o controle de velocidade de uma máquina a vapor. Em 1922, Minorsky demonstrou que equações diferenciais poderiam ser utilizadas para determinar a estabilidade de sistemas, aplicando-as para em controladores automáticos para pilotagem de embarcações. Nos anos 50, do século XX, Evans desenvolveu o método de “lugar das raízes”, consagrando assim, a teoria clássica de controle. Com os sistemas modernos, muitas entradas e saídas, suas descrições passaram a ser mais difíceis, necessitando um grande número de equações. Porém, com a disseminação dos computadores, na década de 60, do século passado, possibilitou que os problemas complexos pudessem ser analisados diretamente no domínio do tempo com o emprego de variáveis de estado. Desta forma, a teoria de controle moderno pode ser implementada em sistemas atuais com precisão, importância e custo, como em sistemas militares, espaciais e industriais. Ainda no século XX, entre as décadas de 60 e 80, foram pesquisados controladores ótimos de sistemas determinísticos e estocásticos, além de controle adaptativo e de aprendizagem. A partir dos anos 80, passaram a ser pesquisados outros tipos de controle, como o controle robusto e o controle H_∞ (OGATA, 2003).

A engenharia de controle de processos (manufatura, produção e outros), frequentemente chamada de automação, é amplamente utilizada nos mais diversos ramos indústrias da atualidade. Tem permitido a construção de máquinas e processos cada vez mais automatizados, possibilitando o aumento da produtividade, confiabilidade e qualidade dos produtos. A teoria e a prática, combinadas na construção de controles automáticos, constituem um ramo amplo da engenharia, que tem despertado a motivação para inúmeras pesquisas visando o desenvolvimento de sistemas cada vez mais sofisticados e úteis (DORF; BISHOP, 2001).

O Controle de Engenharia de Processo vem desempenhando um papel fundamental nos avanços tecnológicos em diversos ramos da engenharia e ciências. O controle automático tem se integrado aos processos industriais, gerenciando operações como os controles de pressão, temperatura, umidade, viscosidade, vazão e outros. Com o aumento da complexidade dos sistemas de produção, passou-se a empregar em sua modelagem um número crescente de variáveis de entrada e de saída (OGATA, 2003).

2.2.1 Sistemas de controle

Um sistema de controle pode ser definido como uma combinação de componentes que agem em conjunto para alcançar determinado objetivo, agindo de forma integrada com vistas a realizar determinada operação. Pode agir sobre o seu próprio funcionamento ou de outro sistema. Para realização das suas atividades necessita de um modelo matemático composto por um conjunto de equações que representem a dinâmica do sistema (OGATA, 2003).

Os modelos que relacionam as variáveis influentes de entrada às saídas do processo ajudam a determinar a natureza e a grandeza dos ajustes requeridos. Após a determinação da influência e relacionamento entre entradas e saídas, o processo pode ser ajustado de forma sistemática quando necessário. Assim, os valores futuros das características de qualidade pretendidas serão mantidos dentro das especificações. Se forem realizadas correções ou ajustes no processo, baseadas em valores das variáveis de saída, este controle é conhecido como controle de realimentação ou retroação (*feedback*) (MONTGOMERY, 2004).

Os sistemas de controle, quanto ao sistema de ajustamento, divide-se em controles de malha aberta (sem realimentação) e controladores de malha fechada (com realimentação). O sistema de controle de malha aberta é aquele em que o sinal de saída não exerce ação de controle no sistema. Nesse caso, a saída não é medida nem comparada com o sinal de entrada, ver Figura 2 (a). Cada entrada corresponderá uma condição fixa de operação. A precisão deste tipo de controle estará condicionada somente à calibração do sistema. Distúrbios incorridos não serão corrigidos e as operações poderão ser executadas de forma errônea. Este tipo de controle estará sujeito a situações em que a relação de entrada e saída for bem conhecida e não existir distúrbios impactando no modelo. Os sistemas nos quais as operações em sequência são controladas em função do tempo, são geralmente de malha aberta e necessitam de monitoramento periódico de regulagens e calibrações.

Os sistemas de controle de malha fechada, (com realimentação), levam em consideração o sinal de erro envolvido (diferença entre sinal de entrada e o sinal de realimentação ou uma função deste). A realimentação do controlador procura minimizar o erro em relação à saída, valor-alvo. As variações encontradas serão automaticamente corrigidas através do incremento da(s) variável(eis) de entrada, uma vez alterada(s) buscando-se ajustar ao(s) valor(es) alvo determinados. Um sistema de controle de malha fechada pode ser visto na Figura 2 (b).



Figura 2 (a) - Malha Aberta

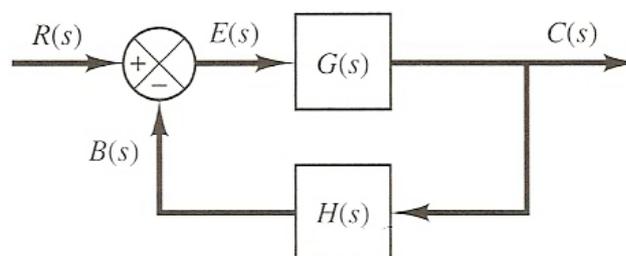


Figura 2 (b) - Malha Fechada

Figura 2 – Sistemas de Controle
[Fonte: Adaptado de Ogata (2003)]

Na comparação entre as duas formas de ajustamento, o de malha fechada possui uma resposta de saída relativamente insensível a distúrbios e variações dos parâmetros. Neste caso, pode-se utilizar componentes mais baratos e menos precisos na construção de um sistema de controle com boa precisão. No quesito estabilidade, o sistema de malha aberta é mais fácil de ser construído, não sendo um problema. O mesmo não acontece com o controle de malha fechada. Neste caso a estabilidade é um problema significativo, uma vez que, pode ocorrer a tendência de correção de erros desnecessariamente impactando no surgimento de oscilações nas variáveis de saída. Para sistemas cuja entrada é previamente conhecida e não sujeitas a distúrbios, Ogata (2003) sugere a utilização de malha aberta. Nos sistemas quando se fizerem presentes distúrbios e alterações não previsíveis nos componentes, recomenda a utilização de malha fechada. Do ponto de vista de custos, o controle de malha fechada geralmente é mais caro e necessita de uma quantidade maior de elementos. Dependendo da aplicação, a combinação dos dois sistemas é recomendada para equilibrar as características econômicas e técnicas.

Para O'Reilly (1987) os controles de processo com realimentação destacam-se, principalmente nas aplicações com um número grande de variáveis. O que impulsionou o crescimento desta teoria foi o avanço tecnológico da capacidade de processamento, permitindo análises antes inviáveis, face a quantidade de variáveis envolvidas, complexidade de cálculos e velocidade necessária de decisão. Um grande leque de aplicações em problemas industriais se abriu e soluções, antes inesperadas, puderam ser observadas.

Uma das partes mais importantes dos controladores é a sua modelagem matemática em que, para um sistema dinâmico (sistema cujo estado evolui com o tempo), é representado por um conjunto de equações, geralmente diferenciais, ligadas ao comportamento e relações físicas das grandezas envolvidas. O conjunto de equações do modelo matemático, buscando representar o sistema físico, em função das dificuldades geralmente envolvidas, faz com que nenhum modelo matemático seja exato. Pode-se melhorar a precisão do modelo aumentando a

complexidade das equações, porém deve-se procurar não tornar o problema excessivamente complexo, o que dificulta a resolução (PHILLIPS; HARBOR, 1996).

Em um sistema dinâmico, quando a causa (dados de entrada) for proporcional ao efeito (saída), o sistema é considerado linear. Nestas situações, é possível aplicar o princípio da superposição, ou seja, na aplicação simultânea de diversas equações do modelo a solução pode ser simplificada considerando as entradas individualmente e somando-se as respostas de cada uma delas. Os sistemas lineares ainda podem ser classificados: (i) em invariantes no tempo, quando os coeficientes das suas equações diferenciais forem constantes, mais especificamente, quando as relações de entrada e saída não se modificam com o tempo, e (ii) sistemas lineares variantes no tempo quando os coeficientes são funções do tempo (SCHWARTZ, 1972).

Como grande parte dos fenômenos físicos que se procura equacionar possui comportamento não linear, geralmente aproximações de linearização são buscadas. O comportamento das variáveis pode ser aproximado como linear dentro de certa faixa de valores ou, mesmo empregando técnicas que permitam considera-lo como tal, assumindo a possibilidade um pequeno erro. Obtendo-se modelos com comportamentos lineares e invariantes no tempo, ou considerados com estas características, técnicas tradicionais e simplificadas podem ser utilizadas na sua resolução, bem como nas verificações de estabilidade e robustez (DORF; BISHOP, 2001). Podendo ser estabelecida também, relação entre a transformada de Laplace da Saída $Y(s)$, com a da entrada, $X(s)$. Esta relação é denominada Função de Transferência $G(s)$, empregada por facilitar e sistematizar a solução de equações diferenciais ordinárias lineares (D'AZZO; HOUPIS, 1981).

Os controladores automáticos com realimentação monitoram o valor real de saída do sistema e realizam uma comparação com um valor desejado de referência (entrada). Caso se observe algum desvio, um sinal de controle é gerado para minimizá-lo, produzindo uma ação de controle. A Figura 3 representa, em formato de diagrama de blocos, um sistema típico de controle industrial com controle automático.

Na Figura 3, o controlador monitora o ponto de ajuste e o sinal de realimentação com informações da saída recebido do sensor. O desvio encontrado é repassado ao atuador que irá interferir diretamente no processo, corrigindo desvios para manter a variável de saída no valor especificado. Como o sinal do controlador geralmente é de baixa intensidade (potência), existe a necessidade do emprego de amplificadores para se conseguir manipular o atuador. O sinal obtido do sensor deve ser na mesma unidade em que o controlador monitora o sinal de referência.

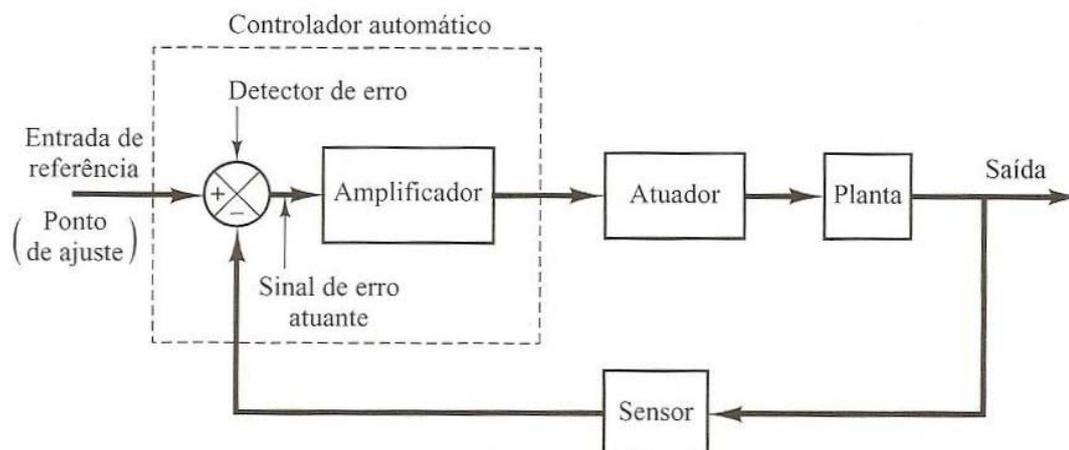


Figura 3 – Diagrama de blocos de um controlador automático industrial típico
 [Fonte: Adaptado de Ogata (2003)]

Em função dos objetivos pretendidos, neste estudo serão abordados somente os controladores em malha fechada (retroação), apropriados para sistemas industriais onde distúrbios são inerentes ao processo. Quanto ao comportamento do processo e seu controle, o interesse desta tese recai sobre os sistemas lineares invariantes no tempo, os quais são representados por equações diferenciais com seus coeficientes constantes, situações frequentemente buscadas na prática industrial (DORF; BISHOP, 2001).

2.2.2 Sistema de controle PID

O controlador Proporcional Integral e Derivativo (PID) é composto de três termos, os quais estão relacionados ao cálculo do erro entre a variável de saída e o um valor-alvo a ser buscado. A saída do controlador é igual à soma de um termo proporcional, de um termo integral e de um termo diferencial, com um ganho ajustável para cada termo. A popularidade dos controladores PID pode ser atribuída ao seu desempenho robusto (baixa sensibilidade na presença de perturbações) em um grande faixa de condições operacionais, e à sua simplicidade funcional, permitindo ser operado de maneira simples e correta (DORF; BISHOP, 2001).

Ogata (2003) classifica os controladores industriais de acordo com as suas funções de controle:

- Controladores Proporcionais (P);
- Controladores Integrais (I);
- Controladores Proporcionais – Integrais (PI);
- Controladores Proporcionais – Derivativos (PD);

- Controladores Proporcionais – Integrais e Derivativos (PID).

Na escolha do tipo de controlador a ser empregado, devem ser levados em consideração a natureza da planta industrial, condições de operação e também de segurança, disponibilidade, confiabilidade, precisão, peso e tamanho dos componentes.

O Controlador com ação de Controle Proporcional estabelece uma relação entre o erro atuante ($e(t)$) e o sinal de saída do controlador ($u(t)$), tendo uma constante de ganho envolvida conforme equação (21). Independente do mecanismo real e o tipo de energia utilizada na operação, o Controlador Proporcional é um amplificador com ganho ajustável.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (21)$$

Em que, $u(t)$ é o sinal de saída do controlador; $e(t)$ é o sinal de erro detectado; K_p é uma constante de ajuste, ganho proporcional.

No Controlador Integral, o sinal de saída é uma função cuja taxa de variação é proporcional ao sinal do erro detectado, considerando-se uma constante de ajuste, o comportamento do sinal de saída é expresso pela equação (22).

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t) \quad \text{ou} \quad u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (22)$$

Em que, $u(t)$ é o sinal de saída do controlador; $e(t)$ é o sinal de erro detectado; K_i é uma constante de ajuste, ganho integral.

Já o Controlador de ação Proporcional-Integral engloba as duas últimas funções. É o somatório das duas funções Proporcional e Integral, sendo o sinal de saída expresso pela relação (23).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad \text{ou} \quad u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (23)$$

Quando, $u(t)$ é o sinal de saída do controlador; $e(t)$ é o sinal de erro detectado; K_p é uma constante de ajuste, ganho proporcional; K_i é uma constante de ajuste, ganho integral; T_i é o tempo integrativo.

Souza, Samohyl e Malavé (2004a, 2004b) utilizaram um Controlador Proporcional-Integral ao erro para determinar o ajuste a ser empregado na correção de variáveis de processo

(temperaturas). Para ajustar o controlador, empregaram técnicas de regressão multivariadas para determinar o distúrbio (erro) e a constante de ganho. Como se tratava de um sistema multivariado, técnicas de controle estatístico sinalizavam quais variáveis deveriam ser ajustadas.

Outro tipo de controlador, o Controlador Proporcional Derivativo tem a sua saída dependente de dois termos. O primeiro termo de ação proporcional e o segundo dependente da taxa de variação do erro, a equação (24) representa o sinal de saída deste tipo de controlador.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{ou} \quad u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (24)$$

No qual, $u(t)$ é o sinal de saída do controlador; $e(t)$ é o sinal de erro detectado; K_p é uma constante de ajuste, ganho proporcional; K_d é uma constante de ajuste, ganho derivativo; T_d é o tempo derivativo.

Por fim, o Controlador de ação Proporcional – Integral - Derivativo agrega as ações de cada um dos três controladores. Portanto, o sinal de saída é composto por três termos apresentados anteriormente e conforme apresentado na equação (25).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{ou} \quad u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (25)$$

Os sistemas de controle geralmente são testados com sinais de entrada simples, em função do tempo t , permitindo análise experimental e matemática. Os sinais de entrada empregados mais comumente são as funções degrau, rampa, impulso, senoidais. Neste estudo, como serão empregados os recursos de simulação numérica, o sistema de controle poderá ser diretamente avaliado e testado com o comportamento das variáveis geradas.

Em um sistema de controle a resposta temporal é constituída de uma parte transitória e de outra estacionária, conforme pode-se observar na expressão (26). A resposta transitória é a resposta de um sistema com uma função do tempo indo de um estado inicial ao estado final (é aquela que desaparece com o tempo). A resposta em regime estacionário possui um mesmo comportamento do sinal de saída à medida que t tende ao infinito (é a parte da resposta que corre muito tempo depois da aplicação de um sinal de entrada).

$$C(t) = C_{transit.}(t) + C_{estac.}(t) \quad (26)$$

No projeto de um sistema de controle deve ser possível prever o seu comportamento dinâmico, baseado em seus componentes. Neste sentido, um dos problemas mais importantes é a análise da estabilidade absoluta (sistema estável ou instável). Em um sistema dito em equilíbrio, os sinais de entrada e de saída permanecem no mesmo estado, logo, este não possui distúrbios. Em um sistema considerado estável, quando submetido a uma condição inicial, possui condições de retornar ao estado de equilíbrio. Um sistema instável quando submetido a uma condição inicial, a partir de um estado de equilíbrio, a saída irá divergir da entrada, sem limites. Um indicador da precisão do sistema é o erro estacionário que mensura a divergência entre o sinal de saída com o de entrada (OGATA, 2003).

Para Phillips e Harbor (1996) antes de qualquer outra verificação, um sistema de controle precisa ser estável. Sendo assim, pode-se então especificar condições em que o mesmo poderá ser insensível às variações de certos parâmetros do processo que saberá apresentar alterações durante a operação do sistema. Na presença de distúrbios significativos, pode-se especificar limites de resposta a estes distúrbios. Conhecendo-se as informações de entrada, pode-se especificar a resposta de forma a acompanhá-la em regime estacionário com certa precisão. Neste sentido, o controlador PID é considerado robusto, sendo versátil em seus ajustes quando da presença de distúrbios, sendo aplicado em sistemas de controle em que se necessita a melhora tanto da resposta transitória quanto da resposta em regime estacionário (PHILLIPS; HARBOR, 1996).

Moro (2003) aborda a questão do controle de processo avançado em indústrias de refino de petróleo. Cita que a maioria das refinarias utiliza uma combinação dos controladores de ação proporcional, integral e derivativo com outros controladores de processo de comportamento linear para solucionar problemas de regulação dinâmica. Considera esta configuração adequada para finalidade, e que as atenções agora estão se voltando para se assegurar um correto uso e um melhor desempenho das aplicações já instaladas.

A versatilidade do controlador PID e sua flexibilidade proporcionaram que fosse muito difundido no meio industrial. Mais da metade dos controladores industriais, em uso na atualidade, emprega este esquema de controle (OGATA, 2003).

Na sequência, são apresentados alguns outros métodos de análise e controle, os quais podem ser empregados em conjuntos com os já abordados. Com isso, é permitido o projeto de sistemas de controle mais precisos com melhores desempenhos.

2.2.3 Outros sistemas de controle

Diversos sistemas de controle vêm sendo propostos, buscando maiores eficiências no gerenciamento dos processos industriais. Alguns são mais antigos, porém ainda em uso, e outros mais recentes. Os principais identificados na literatura são abordados na sequência como: método do lugar das raízes, método de resposta em frequência, sistemas de controle de espaço de estados e modelos de controles preditivos.

2.2.3.1 Método do lugar das raízes

O método do lugar das raízes foi apresentado por Evans, em 1948, e tem sido muito utilizado nas práticas de controle de engenharia. O fato de poder ser empregado em conjunto com outras técnicas permitiu sua grande divulgação (DORF; BISHOP, 2001).

A equação característica de um sistema de malha fechada corresponde ao denominador da sua equação de transferência, igualado a zero. Equação de transferência esta, que foi aplicada previamente à Transformada de Laplace. A relação entre os termos gera um polinômio no espaço complexo em s ($\tau + j\omega$). O estudo das raízes deste polinômio possibilita análise dos pólos (valores que fazem a equação característica tender a infinito) e zeros (valores que anulam a equação característica).

Para Phillips e Harbor (1996) o “lugar das raízes” de um sistema é a representação gráfica das raízes da equação característica do sistema, significando que os pólos da função de transferência em malha fechada, para algum parâmetro do sistema que é variado. O lugar das raízes de um sistema é o lugar dos pólos de malha fechada quando o ganho K , inserido na equação, varia de zero a infinito.

No projeto de controladores, estes são especificados para realizar determinadas tarefas. Para seu correto funcionamento são estabelecidas especificações de desempenho como requisitos de funcionamento em resposta transitória e em regime permanente. Para isso, são necessárias compensações nos sistemas de controle lineares, invariantes no tempo, sendo então, modificações dinâmicas visando atender às especificações pré-estabelecidas. Este método do “lugar das raízes” visa justamente redesenhar o lugar das raízes do sistema pela adição de pólos e zeros na função de transferência permitindo, assim, melhorar a estabilidade e desempenho do sistema, buscando atingir os quesitos estabelecidos (OGATA, 2003).

A localização das raízes da equação característica de um sistema de controle de malha fechada está relacionada, diretamente, com a estabilidade relativa e desempenho da resposta

transitória. Com o “método do lugar das raízes”, os deslocamentos das raízes da equação característica no plano s devem ser averiguados, conforme os parâmetros do sistema possam ser variados. Baseia-se em uma técnica gráfica para encontrar o esboço inicial do projeto e de determinar alterações na estrutura do sistema e valores de parâmetros. Com o auxílio de ferramentas computacionais, a precisão de cálculo é aumentada, inclusive indicando locais importantes de onde devem estar posicionadas as raízes. A partir do lugar das raízes os parâmetros podem ser ajustados, caso a localização inicial não seja satisfatória (DORF; BISHOP, 2001).

2.2.3.2 Método de resposta em frequência

Este método está baseado na resposta em regime permanente de um sistema, considerando uma entrada senoidal. Com a variação da frequência do sinal de entrada é verificado o comportamento da resposta resultante na saída. Este é um método que pode complementar o controlador, desenvolvido pelo método “lugar das raízes”. Foi desenvolvido no período de 1930 e 1940 por Nyquist, Bode, Nichols e outros, e é considerado um dos mais poderosos na teoria de controle convencional. No projeto de um controlador de malha fechada, baseado em resposta em frequência, procura-se ajustar as características da resposta da função de transferência de malha aberta, empregando critérios de projeto, obtendo-se comportamentos aceitáveis da resposta transitória do sistema (OGATA, 2003).

Uma das vantagens do método de resposta em frequência é o de poder projetar um sistema de controle sem necessitar desenvolver a função de transferência. Pode ser desenvolvido diretamente pelas de medições do sistema físico. Para um sistema em regime permanente, a resposta da função de transferência pode ser obtida diretamente a partir da função de transferência senoidal, que é uma função na qual o plano complexo s é substituído por $j\omega$, em que ω é a frequência. Considerando um sistema com função de transferência $G(s)$, entrada $(x(t))$ e saída $(y(t))$, tem-se que se a entrada é um sinal senoidal, a saída em regime permanente também o será com a mesma frequência, mas com módulo e ângulo de fase diferente (PHILLIPS; HARBOR, 1996).

Métodos gráficos são utilizados para representar o número complexo $G(j\omega)$ em relação à variação de ω . Ferramentas gráficas muito eficientes para estas análises e projetos de controladores são os diagramas de Bode (módulo de $G(j\omega)$ pelo ângulo de fase). Outros

diagramas, bastante empregados nestas verificações, são os polares, os de magnitude e de fase (DORF; BISHOP, 2001).

O método de resposta em frequência utiliza os gráficos de pólos, diagrama de Nyquist e de Magnitude, utilizados para o critério de estabilidade absoluta e relativa. Os critérios de desempenho do método para estabilidade e velocidade de resposta estão correlacionados com os de análises de transientes. A análise e projeto dos controladores, baseados neste método, foram favorecidos com o desenvolvimento computacional, uma vez que ficaram mais acurados os gráficos dos pólos para seleção de compensadores dinâmicos. Na análise e projeto de controladores, baseados na resposta em frequência, utilizam como uma das principais ferramentas o gráfico de Bode, devido a sua simplicidade de traçado e facilidade de identificação de falhas de desempenho (VAN DE VEGTE, 1986).

Segundo Ogata (2003), no projeto de um controlador, o mais importante é o desempenho da resposta transitória. No método de resposta em frequência, esta é feita de maneira indireta, especificada em termos de margem de fase, margem de ganho, amplitude do pico de ressonância, frequência de cruzamento de ganho, frequência de ressonância, banda passante e constantes de erro estático.

No domínio da frequência, através de diagramas, é possível indicar com clareza o modo pelo qual o sistema deve ser modificado, apesar de que a resposta transitória não seja possível prever com precisão. Entre duas técnicas principais, a do diagrama de Bode e do diagrama polar, em função de maiores facilidades de adição de compensadores e de visualização do comportamento na alteração do ganho. Com esta técnica, inicialmente ajusta-se o ganho de malha aberta, visando atender ao requisito de precisão em regime permanente. Na sequência, são traçadas curvas de módulo e de fase não compensadas. Se as especificações de margem de fase (diferença entre o ângulo de fase ϕ e -180°) e de ganho não estiverem sendo atendidas, especifica-se um compensador apropriado que venha a alterar a função de transferência.

2.2.3.3 Sistemas de controle no espaço de estados

Em função do aumento da complexidade dos sistemas de engenharia devido às exigências das tarefas mais elaboradas e precisas, os sistemas com múltiplas entradas e saídas e variantes no tempo são cada vez mais empregados. Assim, a teoria utilizada para análise e desenvolvimento de sistemas de controle, baseada no domínio do tempo e utilizando variáveis de estado, foi aprimorada para solucionar estas necessidades. Esta forma de análise é

considerada, pelos especialistas, como um dos marcos do controle de engenharia. O sistema de controle no espaço de estados, um dos sistemas modernos de controle, pode ter diversas variáveis de entrada e de saída além delas poderem ser interrelacionadas de forma complexa. A teoria do controle convencional é fundamentada na relação entrada-saída (função de transferência), enquanto a teoria moderna é baseada na descrição de um sistema com equações diferenciais de primeira ordem, que podem ser escritas na forma vetor-matricial (OGATA, 2003).

Este método é utilizado na simulação e análise de projetos de controladores cujo objetivo é desenvolver uma representação que preserve a relação entrada-saída, expressa por n equações diferenciais de primeira ordem, representando, assim, as características internas do sistema, empregando técnicas no domínio do tempo. Podem ser utilizadas para sistemas não-lineares, variantes no tempo e multivariáveis (DORF; BISHOP, 2001).

Para Phillips e Harbor (1996) o estado de um sistema, em qualquer tempo t_0 , é a quantidade de informação das suas variáveis em t_0 que, em conjunto com todas as entradas para $t \geq t_0$, determinam o comportamento do sistema para qualquer instante $t \geq t_0$. Os autores destacam, como vantagens sobre a abordagem da função de transferência, que este método possui maior facilidade de análise e projeto de sistemas de ordem elevada, principalmente pela facilidade de implementação computacional, possibilitando a realimentação de um maior número de informações (variáveis internas).

Dorf e Bishop (2001) definem as variáveis de estado como sendo as que determinam o comportamento futuro de um sistema, dado o estado presente, as excitações de entrada e as equações que descrevem a dinâmica desse sistema. Podem ser utilizadas como variáveis de estado até mesmo variáveis que não representem diretamente grandezas físicas mensuráveis.

A análise de espaço de estados envolve três tipos de variáveis, as de entrada, as de saída e as de estado. A representação de um dado sistema no espaço de estado não é única, mas o número de variáveis de estado é o mesmo para qualquer uma das representações do mesmo sistema. Um sistema dinâmico, baseado neste método, deve conter elementos que memorizem os valores de entrada para $t \geq t_1$.

A forma padrão das equações de estado e de saída dos sistemas analógicos lineares é dada pelas expressões (27).

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t)\end{aligned}\tag{27}$$

Em que, $\dot{\mathbf{x}}(t)$ é a equação diferencial denominada de equação de estado do sistema, $\mathbf{A}(t)$ corresponde a matriz de estado ou do sistema ($n \times n$); $\mathbf{x}(t)$ é o vetor de estado ($n \times 1$) contendo as n variáveis de estado; $\mathbf{B}(t)$ a matriz de entrada ($n \times r$); $\mathbf{u}(t)$ é o vetor com as r entradas ($r \times 1$); $\mathbf{y}(t)$ o vetor de saída ($p \times 1$); $\mathbf{C}(t)$ a matriz de saída ($p \times n$); $\mathbf{D}(t)$ é a matriz de transmissão direta ($p \times r$).

Quando da análise de um sistema invariante no tempo, as matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} , anteriormente citadas, não envolverão o tempo (t) explicitamente. A Figura 4 ilustra as funções dos elementos das equações (27).

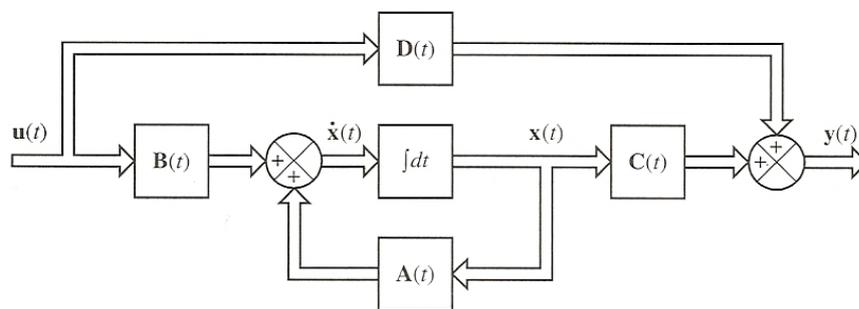


Figura 4 – Diagrama de um sistema de controle linear no espaço de estados
[Fonte: Adaptado de Ogata (2003)]

Nos projetos de controladores em que se utilizarem técnicas de identificação, para se conseguir o modelo do sistema, geralmente obtém-se diretamente a função de transferência. Nestas situações, é necessário empregar um método para transformar funções de transferência em modelo de estado, como o baseado em diagramas de simulação. Com esta transformação, as variáveis de estado, normalmente não correspondem a variáveis físicas (PHILLIPS; HARBOR, 1996). Os diagramas de simulação são representações em blocos traçados a partir dos elementos da equação de transferência. Com este diagrama de simulação, pode-se determinar as variáveis de estado a partir dos seus elementos básicos que são os integradores.

Os projetos de controladores no espaço de estado são baseados nos métodos de alocação de pólos e no regulador quadrático ótimo. O primeiro visa alocar todos os pólos de malha fechada nas posições desejadas, similar ao método do lugar das raízes, sendo que neste apenas os pólos dominantes eram alocados. Baseado no método do lugar das raízes os primeiros pólos dominantes são alocados e os outros são posicionados de forma que eles fiquem distantes, à esquerda destes, no plano. Pode ser combinado com a técnica do observador para estimar as variáveis de estado não mensuráveis. Os pólos de malha fechada podem ser alocados desde que o modelo seja controlável. Vários conjuntos diferentes de pólos devem ser considerados e comparados, sendo escolhido o que tiver melhor característica de

resposta (OGATA, 2003).

O método do regulador quadrático ótimo, ou também controle ótimo, possui a vantagem de fornecer um modo sistemático de cálculo da matriz de ganho de controle por realimentação de estado. Está relacionado com a determinação de uma matriz de ganho \mathbf{K} do vetor de controle, minimizando o índice de desempenho, conforme equação (28), para o qual o controlador deva ser projetado.

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}'\mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}'\mathbf{R}\mathbf{u})dt \quad (28)$$

Na qual, \mathbf{Q} é a matriz que determina a importância do erro do sistema; \mathbf{R} é a matriz que determina o consumo de energia dos sinais de controle; \mathbf{x} é o vetor de estado; \mathbf{u} é o vetor de controle.

O controle ótimo pode ser esperado em termos de desempenho operacional do sistema elaborado. Pode ser formulado em termos de índices de desempenho no domínio do tempo, como valor máximo de ultrapassagem e o tempo de subida da resposta para uma entrada em degrau (DORF; BISHOP, 2001).

2.2.3.4 Modelos de controles preditivos

Os modelos de controle preditivo (*model predictive control* – MPC), ou também conhecido como controle preditivo baseado em modelos, fazem parte de uma classe de algoritmos que calculam uma sequência de ajustes de variáveis manipuladas, visando otimizar o comportamento futuro de um sistema a ser controlado. Desenvolvido originalmente para o controle usinas elétricas e refinarias de petróleo, evoluiu para aplicações em indústrias químicas, processamento de alimentos, automotiva, metalúrgica e outras (QIN; BADGWELL, 1997).

Souza (2004) considera que os controles preditivos possuem uma abordagem diferente dos modelos tradicionais. No enfoque deste controlador, existe a perspectiva de antever o comportamento do processo, assim busca minimizar os desvios em relação a uma trajetória pré-definida. Estes controladores necessitam da determinação do modelo do processo, da função objetivo e da obtenção de uma lei de controle.

Os controladores preditivos utilizam, em suas estratégias de controle, os valores das saídas do processo e ações de controle passadas em que, a cada tempo de amostragem t são realizadas previsões das saídas, em um horizonte definido. Operam, também, em função do

modelo do processo assumido, dos vetores de ações de controle e saídas passadas além de considerar potenciais ações futuras de ajustes. Uma trajetória de referência é definida em malha fechada, o vetor de ações de controle futuras é definido de forma a minimizar a diferença entre o valor de saída predito e a trajetória de referência. Visando compensar e evitar erros de modelagem e perturbações, geralmente só a primeira ação de controle calculada é implementada pelo controlador. No instante seguinte, o procedimento completo é recalculado e os dados são atualizados. Desta forma, a ação de controle estará embasada nas últimas medidas e informações (SANTOS, 2006).

Segundo Bosco (2008), os controladores preditivos multivariáveis estão sendo empregados em refinarias em todo o mundo, inclusive no Brasil, com grande sucesso. A sua facilidade de implementação, em conjunto com outros sistemas de automação, proporciona bons resultados gerando retorno financeiro significativo. As plantas industriais podem operar perto de sua condição ideal de controle, bem como possuir flexibilidade de adaptação a novas situações de produção. Bezzo *et al.* (2005) utilizaram os modelos de controle preditivo, obtendo melhores resultados em vez de controladores tradicionais. Uma revisão sobre estes controladores e suas origens pode ser visto no trabalho de Morari e Lee (1999).

O método empregado no MPC referencia-se em um controle ótimo, selecionando as entradas de controle, tendo como meta a minimização de uma função objetivo. Para isso, consideram-se os valores atuais de saídas e também os valores preditos por um modelo do processo. Na equação (29) é apresentada a função objetivo a ser minimizada (SOUZA, 2004).

$$J(N_1 N_2 N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) (\hat{y}(t+j) - w(t+j))^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) (\Delta u(t+j-1))^2 \quad (29)$$

Nos quais, N_1 e N_2 limites do intervalo em que os valores serão confrontados com a trajetória de referência; N_u é o horizonte cuja ação de controle irá atuar; $\hat{y}(t+j)$ é a previsão de saída estando no instante t ; $\delta(j)$ e $\lambda(j)$ fatores de ponderação da influência do desvio em relação à trajetória e das ações de controle; Δu são os incrementos das variáveis manipuladas; $y(t)$ os valores de saída do processo; $w(t)$ os valores da trajetória de referência.

Apesar de serem calculados N movimentos de controle que minimizam a função objetivo dado pela equação (29), apenas o primeiro é implementado. A cada nova medição das variáveis de saída, os parâmetros do problema são atualizados e um novo problema de otimização é formulado; desta forma, o próximo movimento de controle é alcançado.

Segundo Souza (2004) a trajetória $w(t)$ a ser seguida pelo controlador necessariamente não precisa ser a real, mas um modelo matemático indicando a dinâmica do processo. Apresenta uma possibilidade encontrada na literatura, conforme visto na equação (30).

$$w(t+k) = r(t+k) - \alpha^k (y(t) - r(t)) \quad (30)$$

Em que, $r(t)$ é a função de referência, podendo ser inclusive um valor de *set point* da variável; α e k são parâmetros responsáveis pela suavidade da ação de controle.

Como resultados do procedimento de controle, são estabelecidas ações que o controlador deve executar no processo. Algumas das estratégias de controle baseada nos controladores preditivos como: Matriz Dinâmica de Controle (DMC), Matriz Dinâmica Quadrática de Controle (QDMC), *Generalized Predictive Control* (GPC) são apresentadas na sequência.

A Matriz Dinâmica de Controle (*Dynamic Matrix Control* – DMC) é um dos métodos mais utilizados de controle preditivo, inclusive para sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO). O algoritmo DMC e suas variações básicas proporcionam um bom controle de processos univariáveis e multivariáveis, sem restrição. É um algoritmo de controle multivariado que proporciona bons resultados para o controle de processos, proposto por Cutler e Ramaker (1979 apud SANTOS, 2006). O objetivo do controlador é conduzir a saída o mais próximo possível dos valores de referência, considerando os mínimos quadrados com um termo de penalidade das variáveis manipuladas, proporcionando menores cálculos de deslocamento da entrada e respostas de saída menos agressivas. Fatores de supressão de movimentos também podem proporcionar benefícios numéricos importantes que podem ser utilizados para melhorar as condições de solução. As referências ótimas de entradas e saídas são consideradas no algoritmo. Assim que o controlador mover uma unidade para um novo espaço de estado, o ciclo de otimização é repetido. O algoritmo move o sistema de um espaço de estado ótimo para outro (QIN; BADGWELL, 1997).

O DMC é baseado em um modelo de resposta em tempo discreto, sendo calculado o valor desejado de uma variável manipulada cujo valor se mantém inalterado no período seguinte. O novo valor da variável manipulada será o que fornece a menor soma do erro quadrático entre o valor de referência e o predito desta (NIPPERT, 2002).

Para Morari e Lee (1999) o que contribuiu para uma maior difusão do algoritmo DMC foi a simplicidade da formulação matemática e os programas computacionais que surgiram e que são aprimorados constantemente. Desta forma, sua implementação em processos

industriais tem sido muito facilitada e vantajosa.

A matriz dinâmica quadrática de controle (*quadratic dynamic matrix control* - QDMC) é considerada uma segunda geração dos modelos de controle preditivos, compreendendo algoritmos que proporcionam uma forma sistemática de implementar restrições de entrada e saída (QIN; BADGWELL, 1997).

O QDMC pode ser utilizado como um controlador linear externo ou no entorno de um sistema linearizado. Na dificuldade do algoritmo DMC conduzir o processo com restrições, este geralmente é implementado como um programa quadrático no qual as restrições de entrada e saída aparecem explicitamente (JANA; SAMANTA; GANGULY 2005).

A programação quadrática (QP) é utilizada para resolver um problema de otimização, quando serão determinadas as ações do controlador para um determinado horizonte de controle, sendo este menor ou igual ao de predição. Assim, o algoritmo QDMC pode prever o desempenho das variáveis controladas. Para prever o comportamento das variáveis, utiliza-se um modelo do processo. Os erros encontrados entre as respostas preditas e as desejadas são utilizados para novos ajustes do controlador. A cada período subsequente, os valores reais são incorporados e o modelo pode ser corrigido e nova otimização é realizada para obtenção de uma nova solução de controle ótima. Devido ao aumento da complexidade, o esforço computacional exigido pelo algoritmo do QDMC é maior que o do DMC. Desta forma, o seu emprego deve levar em consideração estas necessidades no momento da escolha do algoritmo (SANTOS, 2006).

Com o desenvolvimento dos ambientes de redes e equipamentos microprocessados, a área de controle recebeu um grande impulso. Neste ambiente, o *Generalized Predictive Control* (GPC) tornou-se um dos métodos de controle preditivo bastante utilizado tanto na indústria quanto no meio acadêmico. A concepção básica do GPC é de calcular uma sequência de sinais de controle futuros de maneira a minimizar uma função de custo definida sobre o horizonte de predição (NORMEY-RICO *et al.*, 2005).

Segundo Souza (2004), a estratégia de controle GPC também está estruturada em modelos preditivos lineares, possuindo função objetivo e ações de controle. Difere dos demais por considerar o modelo preditivo baseado em funções de transferência, quando se dispõe de um modelo matemático com capacidade de representar bem a dinâmica do processo. Para otimização e determinação das alterações de controle, também busca a minimização da função objetivo apresentada da em (29).

Dentre os modelos paramétricos que podem representar os sistemas a serem controlados, pode-se utilizar o tipo linear ARMAX, cuja versão incremental é denominada de

modelo CARIMA (*Controlled Auto-Regressive Integrating Moving-Average*) (MONTENEGRO *et al.*, 2006).

Gaoa *et al.* (2003) realizaram um estudo comparativo em uma planta química, em que analisaram o desempenho da mesma, antes e depois da implementação de controladores preditivos GPC. Em seu estudo, eles mostram que foi possível reduzir a variabilidade e o consumo de alguns insumos. Os autores também fazem um alerta com relação a problemas de formulação, uma vez que, em uma de suas aplicações, os resultados não foram satisfatórios e concluíram que os mesmos ocorreram devido a este tipo de falha.

2.2.3.5 Controlador multivariável EWMA

Este controlador multivariável, empregado em trabalhos de pesquisa encontrados na literatura atual, é abordado em função da sua recente aplicação e desenvolvimento. Inclusive foge às abordagens mais tradicionais do desenvolvimento de controladores de processos industriais.

Considerando os casos de sistemas que necessitem do controle de múltiplas variáveis de entrada e múltiplas de saída (MIMO), Tseng, Chou e Lee (2002) propõem um controlador, linear, denominado de Controlador Multivariado de Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas (*Multivariate Exponentially Weight Moving Average – MWMA*). Esse controlador utiliza um fator de redução (ω) o qual minimiza o erro quadrático médio total da saída do processo, considerando que os distúrbios envolvidos têm o comportamento de um ruído branco ou mesmo de uma série ARIMA (0,1,1). Citam os autores do trabalho que os controles de realimentação MIMO não estão bem explorados na literatura. Citam alguns trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores, porém abordam uma única entrada e única saída (SISO) ou mesmo, múltiplas entradas, mas apenas uma única saída (MISO).

A descrição do controlador linear MIMO proposto por Tseng, Chou e Lee (2002), com m entradas e n variáveis de saída (com $m > n$), é apresentado pela expressão (31).

$$\mathbf{y}_t = \boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\kappa}(t-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}_{t-1} + \boldsymbol{\varepsilon}_t \quad (31)$$

Sendo, \mathbf{y}_t o vetor da n saídas ($n \times 1$); $\boldsymbol{\alpha}$ e $\boldsymbol{\kappa}$ são vetores desconhecidos a serem estimados ($n \times 1$); \mathbf{B} é uma matriz também a ser estimada $(\beta_{ij})_{n \times m}$; \mathbf{u}_{t-1} representa o vetor das m entradas ($m \times 1$); $\boldsymbol{\varepsilon}_t$ é um vetor que representa o distúrbio do processo ($n \times 1$).

No estudo de Tseng, Chou e Lee (2002), a combinação deste controlador com uma técnica multivariada, proporcionou melhores desempenhos, em termos de identificação de causas especiais e redução de variabilidade das variáveis. Além deste estudo, o controlador MEWMA foi utilizado por Yang e Sheu (2006) que propuseram a integração entre CEP e CEnP e com o uso de simulação concluíram seu bom funcionamento.

2.3 INTEGRAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO E DE ENGENHARIA DE PROCESSO

Os responsáveis pelo Controle Estatístico de Processo e pelo Controle de Engenharia de Processo, geralmente pertencem a departamentos diferentes da empresa e também com formações e experiências técnicas distintas. Em função deste distanciamento, estas técnicas foram desenvolvidas separadamente no meio industrial. O CEP em indústrias de partes e peças e o CEnP, na indústria de processo contínuo. A linha tênue de separação das duas técnicas tem desaparecido com a evolução dos processos (híbridos ou distintos em uma mesma organização) e com a revolução da qualidade (BOX; KRAMER, 1992).

Os trabalhos envolvendo a integração do controle estatístico e de engenharia geralmente atuam em três estágios de melhoria do processo. O primeiro visa detectar efetivamente o distúrbio. O segundo se concentra em identificar o distúrbio e remover a causa especial geradora do sinal de anormalidade. O terceiro estágio visa controlar o processo realizando compensações no sistema. O CEP atua especificamente nas duas primeiras enquanto que o CEnP na última (CHIU; SHAO; LEE, 2003).

Para Crowder *et al.* (1997) a expressão “controle de processo” por vezes tem causado um problema de comunicação entre os profissionais que atuam diretamente na engenharia de controle nas empresas e os ligados ao controle estatístico de processo. Para os profissionais da engenharia de controle, o termo está associado com formas de controle, retroalimentação, controladores PID e outros controladores. Para os estatísticos e os profissionais ligados ao CEP, tem significado de monitoramento e cartas de controle.

O objetivo final de ambos os princípios de controle é o mesmo, conduzir todos os níveis do processo para seus valores-alvo com a menor variabilidade. Crowder *et al.* (1997) lembram que, em um processo submetido a um comportamento estocástico tanto quanto na ocorrência de eventos abruptos, as ferramentas de CEP e CEnP podem facilmente se complementarem.

O CEP visa reduzir a variabilidade do processo pela monitoração e eliminação de

causas especiais que possam vir a ser detectadas. O CEnP, por sua vez, busca minimizar a variabilidade pelo ajuste das variáveis de processo para manter os valores das características de qualidade de saída na meta pretendida (YANG; SHEU, 2006; REYNOLDS; PARK, 2009). Para Mason e Young (1998) o CEnP mantém as variáveis de controle dentro de uma região (faixa de trabalho) que poderão não ser a ótima. O CEP por sua vez monitora e sinaliza se os valores estão nesta área mais restrita de otimização, além de auxiliar no controle de variáveis correlacionadas em processos multivariados.

A integração das duas técnicas de controle, visando unir suas características para melhoria dos sistemas produtivos é relatada por diversos autores como por exemplo, Box e Kramer (1992), Souza (2000), Montgomery (2004). Com a integração, a variabilidade dos processos pode ser melhor detectada e controlada reduzindo-se perdas e melhorando o seu desempenho. Stuart, Mullins e Drew (1996), em seu levantamento, perceberam também que as duas áreas podem ser complementares podendo contribuir significativamente para a melhoria da qualidade nos processos. Nessa visão o CEP pode ser empregado não só para monitorar diretamente o processo, mas também orientar um sistema de controle automático de processo, proporcionando, assim, uma melhor forma de solucionar problemas reais.

Box e Kramer (1992) promoveram uma discussão sobre críticas que eram atribuídas tanto ao CEnP quanto ao CEP. Demonstram que, na sua maioria, os impasses existentes são devidos a problemas de escolha adequada de modelos e parâmetros de ajustes. Os sistemas, empregados para os fins a que foram desenvolvidos, apresentam bons resultados. A forma de sua utilização, escolha de modelos e parametrização é que proporcionam problemas de desempenho e eficiência. Tucker (1992) comenta as questões apresentadas por Box e Kramer (1992) fazendo algumas colocações e críticas e complementos, concluindo com sua manifestação da necessidade da integração das duas abordagens. Wiel e Vardeman (1992) lembram que os distúrbios do processo podem ser removidos pelo Controle Estatístico ou compensados pelo Controle de Engenharia. Sugerem o uso de projeto de experimentos para melhor identificar os ajustes e parametrizações auxiliando o processo tornar-se mais robusto.

Wardrop e Garcia (1992), baseados na discussão promovida por Box e Kramer (1992), comentam que o controle automático de processo tem evoluído para métodos mais sofisticados, envolvendo casos multivariados e buscando incorporar restrições das variáveis de controle dentro dos próprios controladores e como também a incerteza do modelo. Apesar da modelagem do ruído apresentado em Box e Kramer (1992), Wardrop e Garcia (1992) citam que é grande a dificuldade em se obter um modelo que represente os distúrbios encontrados nos processos reais. Defendem que, para melhorar a integração entre CEP e

CEnP, os pesquisadores de ambas as partes devem melhor conhecer as pesquisas desenvolvidas pela outra. Concordam que existe um substancial sombreamento entre as duas metodologias que, frequentemente, não são discutidas. Para contribuir com o CEnP, sugerem algumas ferramentas estatísticas como projeto de experimentos para identificação do processo, controles adaptativos, métodos de estimação com restrições.

Para Hoerl e Palm (1992) a diferença entre a modelagem de processo e gráficos de controle promove divergências devido à desinformação. O controle de engenharia ajusta o modelo ao processo enquanto a abordagem dos gráficos de controle ajusta o processo ao modelo. Sugerem que a integração CEP e CEnP faz com que a visão do processo se altere. Uma microvisão do comportamento é obtida via medições contínuas enquanto uma visão macro de comportamento do processo é obtida, via monitoramento, pelos gráficos de controle. Com o controle *on-line* desejam-se reações rápidas em função de qualquer fonte de variação, geralmente com dados autocorrelacionados. Por outro lado, os gráficos de controle visam estudar e entender as variações naturais do processo. Indicam a aplicação do CEP e CEnP para o mesmo sistema procurando monitorar a efetividade do processo, a longo prazo, detectando causas especiais e monitorando o sistema de medição *on-line*.

MacGregor (1992) lembra que o Controle Estatístico busca melhorar o processo a longo prazo eliminando causas por trás das variações. Por outro lado, o Controle de realimentação é uma abordagem de curto prazo que minimiza a variação, não removendo a sua causa, mas transferindo-a para a variável manipulada, utilizada para compensações e ajustes. Considera a integração uma boa oportunidade para combinar as características de cada um dos métodos. O controle de realimentação possibilita um processo mais ágil, porém a longo prazo não prevê melhorias, sendo assim bem complementado com o CEP.

O Controle Estatístico é empregado em situações em que se supõe a possibilidade de trazer e manter o processo sob controle, monitorando as variações aleatórias estáveis de suas características de qualidade. Atuando na ocorrência de causas especiais. O Controle de Engenharia, por sua vez, é utilizado nos processos onde existe a necessidade de correções sistemáticas, no qual flutuações ou oscilações necessitam ser compensadas, pois sem interferências, as variáveis de saída (monitoradas) tendem a se distanciar do alvo. O Controle de Engenharia necessita dispor de variáveis que possam ser ajustadas, manipulando o processo de forma a manter as variáveis de saída próximas aos seus alvos. Assim, as compensações realizadas pelo CEnP, não fazem distinção de atuação entre causas comuns ou especiais. O CEnP busca regular o processo levando em consideração fontes de variabilidades que não podem ser removidas pelo CEP. O processo sob controle estatístico é uma das

premissas para realizar a sua análise de capacidade, o que muitas vezes só é possível obtê-lo com o auxílio do CEnP. Assim, o Controle de Engenharia tem boa atuação em processos originalmente não capazes, permitindo que seja viabilizado o CEP e conseqüentemente a avaliação quanto a sua capacidade (MONTGOMERY, 2004).

Para Stoumbos *et al* (2000) a filosofia básica do CEP para melhoria da qualidade é a de detectar mudanças no processo e investigá-las. Também buscando a melhoria da qualidade, o CEnP é utilizado em situações em que existam autocorrelações entre os dados. Deve possuir mecanismos de controle disponíveis que promovam o ajuste, quando na presença de desvios. A determinação dos melhores ajuste do CEnP necessitam de um modelo matemático que represente o comportamento do processo. Na mudança do processo que não esteja contemplada no modelo, não irá operar adequadamente. A filosofia básica do CEnP é a de compensar mudanças indesejáveis do processo, enquanto que detectá-la e removê-las está a cargo do CEP. Alertam que novas bases teóricas e pesquisas aplicadas são necessárias em procedimentos que integrem o CEP e CEnP.

Bij e Ekert (1999) realizaram estudo empírico, dentro de diversas empresas, relacionado às integrações existentes. Com o levantamento, baseado nos consultores envolvidos, os autores perceberam que as integrações eram bem aceitas, apesar de algumas restrições encontradas e de algumas áreas não serem muito familiarizadas com estas junções.

Percebeu-se através da pesquisa bibliográfica realizada que, nos anos 90, foi despertada a atenção sobre a integração CEP e CEnP. Esta iniciativa partiu dos pesquisadores ligados ao Controle Estatístico de Processo. Os primeiros trabalhos, publicados na época, relatam as melhorias obtidas e as dificuldades desta integração. Destaca-se, neste contexto, a discussão promovida por Box e Kramer (1992), e que norteou diversos estudos posteriores.

2.3.1 Integrações de sistemas univariados

Os sistemas univariados referem-se às operações de controle e monitoração envolvendo apenas uma variável de processo. Estudos visando à integração do Controle de Engenharia e o Controle Estatístico de Processo univariados, presentes na literatura, foram pesquisados. Na sequência são apresentados vários estudos que procuraram esta integração.

Um algoritmo é proposto por Wiel *et al.* (1992), visando reduzir as variações de qualidade previsíveis, utilizando técnicas de realimentação, buscando obter ganhos de qualidade através de ajustes adequados do processo, e monitorar todo sistema visando detectar e remover fontes de inesperadas de variação, eliminando as variabilidades provenientes de

causas especiais a serem sinalizadas. Como base da metodologia, integraram o controle automático de processo e o controle estatístico. O controle do catalisador em um processo de polimerização é a variável a ser controlada em função do custo envolvido. Wiel *et al.* (1992) desenvolveram um modelo de função de transferência, baseado em séries temporais para o processo, estimando parâmetros, identificando ordem e atrasos. Uma regra de controle, baseada em custos, foi determinada. Para o controle de processo um algoritmo de minimização do erro quadrático médio foi desenvolvido para aquele processo e a saída do sistema de realimentação era monitorada por uma carta de controle CUSUM. Na ocorrência de uma sinalização da carta de controle, a causa especial era removida. Caso não fosse encontrada ou não fosse possível removê-la, os parâmetros do controlador deveriam ser revistos, ou mesmo ajustes no próprio modelo utilizado. Segundo os autores, com a utilização do algoritmo integrando as técnicas, obtiveram 35% de redução da variabilidade da viscosidade na etapa de reação do processo.

Box, Coleman e Baxley (1997) citam que em algumas aplicações de controle de realimentação (*feedback*), ajustes não podem ser realizados de forma automática por questões de viabilidade econômica. Nestas situações, sugerem o ajuste no controlador do processo quando um gráfico de controle estatístico, como o EWMA, sinalizar causas especiais. Citam que o gráfico de controle de Shewhart não é apropriado para indicar estes ajustes por somente testar situações sob controle e não estimar a magnitude dos deslocamentos necessários. Caso utilizados para controles de realimentação podem causar aumento de variação no processo.

Uma forma de combinação entre o controlador PI e o controle estatístico é apresentada por Box e Luceño (1997). Reforçam a questão do gráfico de Shewhart possuir a possibilidade de identificar as causas especiais e, com isso, serem removidas. O controle estatístico se faz necessário uma vez que um processo, supostamente em condição de estabilidade, com o passar do tempo, problemas potencialmente removíveis podem ocorrer. Consideram os sistemas de realimentação (*feedback*) mais apropriados para processos que forem considerados instáveis e as causas não forem possíveis de serem removidas. A instabilidade pode ser proveniente de alimentação de matérias-primas (óleo, madeira, gases e outros) ou devido a variáveis ambientais não controláveis (temperatura ambiente, umidade relativa e outras). Estas causas geralmente são conhecidas, porém economicamente pode não ser vantajoso eliminá-las. Desta forma, compensações precisam ser realizadas por meio de controladores de engenharia de processo para as devidas correções e ajustes.

Um estudo envolvendo o processo de polimerização em escala comercial foi desenvolvido por Capilla *et al.* (1999). Inicialmente, os ajustes de processo eram manuais e

baseados na experiência dos operadores. As estratégias de controle CEP e CEnP para este processo foram desenvolvidas independentemente. Uma tentativa de utilizar somente cartas de controle univariadas não teve sucesso, pois os intervalos de amostragem eram menores que os necessários para o processo estabilizar. Compararam algumas estratégias de controle e a que proporcionou melhores resultados foi aquela que utilizou o denominado Controlador Restrito de Clarke, testado independente e, posteriormente, combinado com CEP. Relatam os pesquisadores que o controle de engenharia melhorou o desempenho do processo, porém a variável de controle teve sua variabilidade muito alterada e o sistema, na presença de causas especiais, não atingia os ajustes necessários. As cartas de controle de Shewhart e EWMA foram implementadas possibilitando melhorar o monitoramento no qual as causas de instabilidade eram removidas assim que identificadas, permitindo, tão logo, um melhor desempenho do sistema.

Jiang (1999) cita as dificuldades das cartas de controle tradicionais em monitorar processos nos quais existam controladores de engenharia em operação. Aí, dados das variáveis passam a ter um comportamento e um grau de correlação que dificultam sua análise. Propôs uma nova família de cartas de controle baseadas nos modelos autorregressivos de médias móveis (ARMA) para monitorar estes processos.

Um modelo, envolvendo a parte econômica, é analisado através da integração do CEP e do CEnP no estudo apresentado por Jiang e Tsui (2000). Um controlador univariado denominado de Mínimo Erro Quadrático Médio (MMSE) é utilizado juntamente com as cartas de controle de Shewhart, EWMA e uma combinação das duas. Para a análise de desempenho, além do tradicional Comprimento Médio de Sequência (ARL), propuseram um critério baseado na perda econômica denominado de Custo Médio da Qualidade (*Average Quality Cost – AQC*), que apresentou bons resultados.

Schippers (2001) apresenta um controle integrado de processo que busca englobar o Controle Estatístico de Processo, Manutenção Produtiva Total e o Controle de Engenharia de Processo. Cita que, geralmente, estas técnicas são separadas nas instituições e empresas, respectivamente, nos departamentos de qualidade e produção, no de manutenção e no de engenharia. Relaciona como características do CEP: o de estar ligado à qualidade, o de identificação rápida de deslocamentos e tendências em termos de posição e dispersão. Quando os resultados são muito dependentes e podem ser descritos adequadamente por um modelo determinístico, o controle de engenharia deve ser utilizado. Complementa como características do CEnP: as de estar ligado também à qualidade e de estar associado a decisões de curto prazo, proporciona menores distúrbios em valores individuais autocorrelacionados e

controla os ajustes de processo cujas medições são muito frequentes e contínuas (segundo, minutos) ou mesmo *on-line*. A integração proposta é justificada para utilização em processos que têm as suas características alteradas durante o seu ciclo de operação no qual cada uma das três técnicas englobadas melhor se adapta a uma parte dele. O autor verificou a interrelação existente entre as técnicas, seus sombreamentos e suas melhores características para cada situação abordada, visando o controle de processo. Conclui que não existe uma melhor forma para controlar o processo, pois o conjunto ótimo depende da situação encontrada.

Um método para controlar a qualidade de saída dos produtos é descrito por Venkatesan (2003), o qual emprega as técnicas de controle de engenharia e de controle estatístico de processo. Um modelo de séries temporais é utilizado para caracterizar e prever o comportamento de tendência dos distúrbios envolvidos. O autor desenvolveu um algoritmo de realimentação, a partir de modelos de séries temporais e do processo. Sinais indicados como fora de controle, obtidos por previsões através de gráficos de controle EWMA, indicam quando o controle de entrada do processo deverá ser atualizado. Os benefícios obtidos foram: a redução dos custos de manufatura, de energia, material empregado e retrabalho, além de aumento da produção e eficiência das operações, bem como melhor controle da qualidade de saída dos produtos. Ainda segundo Venkatesan (2003), o método proposto pode ser aplicado para reduzir a variância do controle de saída e com conseqüente melhoria do controle de qualidade do produto.

Outras integrações entre CEP e CEnP podem ser observadas em Tsung, Shi e Wu (1999) monitorando, simultaneamente, a saída de um controlador PID e a variável manipulada de entrada com carta de controle bivariada de Hotelling; Tsung e Shi (1999) projetando um controlador PID e sua associação a cartas de controle para rejeição de distúrbios; Tsung (2001) discutindo vantagens e desvantagem de diversas estratégias de monitoramento estatístico; Jiang e Tsui (2002) com a monitoração do desempenho de controladores de Mínimo Erro Quadrático Médio e PI; Pan e Castillo (2003) detectando mudanças da média do processo e indicando ajustes progressivo do controlador EWMA através da combinação de ajustes com a carta de controle CUSUM; Tsung e Tsui (2003) investigando como o controlador automático de processo compensa os efeitos de deslocamentos da média, através da monitoração da saída e da ação de controle.

Perce-se que a integração entre o Controle Estatístico Univariado e o Controle de Engenharia de Processo foi motivo de diversas pesquisas em um período aproximado entre 1990 a 2003. Após este intervalo, estudos continuaram a ser realizados em casos específicos, envolvendo dados autocorrelacionados. Permeando com o final deste período, houve uma

tendência de gradativamente direcionar o foco das atenções para integrações utilizando técnicas multivariadas, tanto estatísticas quanto de controle de engenharia.

2.3.2 Integrações de sistemas com diversas variáveis

Visando atender às exigências dos modernos e cada vez mais complexos processos de fabricação, nos quais diversas variáveis de entrada e de saída devem ser monitoradas e controladas, técnicas multivariadas têm sido buscadas. Neste sentido, estudos estão sendo desenvolvidos procurando melhorar a eficiência de processos e máquinas (SOUZA, 2000; YANG; SHEU, 2006).

Visando identificar o desempenho de controladores preditivos, Loquasto e Seborgt (2003) buscaram comparar os dados de operação do processo com situações de anormalidades previamente simuladas. Diversas situações de distúrbios de um processo, operando com um Modelo Preditivo de Controle, foram criadas e armazenadas. Os padrões de comportamento registrados foram utilizados em análises posteriores para identificar se o mesmo estava operando normalmente ou se anormalidades eram provenientes da presença de distúrbios ou deficiências do próprio modelo. Na identificação, empregaram, os autores, a Análise de Componentes Principais baseada em fatores de similaridades. ACP foi utilizada para compor fatores com os dados correntes do processo e de grupos de dados, previamente treinados que contêm grande variedade de respostas em diversos comportamentos. Analisando a similaridade entre estes fatores foi possível monitorar o comportamento do processo de forma mais rápida.

Souza (2000) buscou a integração do controle estatístico multivariado com o controle de processo. Propôs uma metodologia para o controle de sistemas multivariados com variáveis interrelacionadas. A estabilidade é monitorada por meio de cartas de controle T^2 de Hotelling. Na indicação de instabilidade, o emprego de análise de componentes principais é utilizada para identificar as componentes responsáveis pela instabilidade. Por meio das contribuições individuais, as variáveis mais correlacionadas com as Componentes Principais causadoras da instabilidade, são identificadas. Para estas, propostas de correções individuais são indicadas empregando-se Controladores Proporcional-Integrais ao erro (PI) (SOUZA; SAMOHYL; MALAVÉ, 2004 b). Para ajustar o controlador, utilizaram técnicas de regressão multivariadas determinando o ganho e o distúrbio. O gráfico EWMA foi empregado para determinar a constante de ponderação λ . Na proposição deste estudo, o controlador somente é acionado quando o controle estatístico identificar uma causa especial, não determinada ou

removida.

Em função da crescente necessidade de monitorar os ambientes controlados por sistemas de realimentação, Tsung e Apley (2002) propuseram um método que melhora a detecção de causas especiais nestes processos. Uma carta de controle dinâmica baseada na estatística T^2 é utilizada, e considera os efeitos dinâmicos e de autocorrelação atribuíveis ao controle de realimentação. Monitoram, simultaneamente, a entrada e saída do controlador. Com isso, o vetor de dados é composto pelas observações, deslocadas no tempo, da entrada e da saída. Utilizaram controladores univariados PI e PID, dependendo dos parâmetros de processo. Quando uma causa especial é sinalizada pela carta dinâmica T^2 , uma análise em termos de escala da matriz de covariância e rotação das estatísticas obtidas, permite detectar a ocorrência de deslocamento da média ou de mudanças nos parâmetros do modelo do processo. Ocorrendo o deslocamento, ações corretivas deverão ser utilizadas para eliminar a causa especial, caso tenham sido detectadas alterações no modelo, este deve ser revisto. Demonstraram sua teoria através de simulações.

Kourti (2006) relata as vantagens de utilização da integração do Controle de Engenharia de Processo e o Controle Estatístico de Processo Multivariado (MSPC) na indústria farmacêutica. Enfatiza a utilização do MSPC após o APC já estar em operação e completamente implementado. O Controle Automático do Processo estando em operação e intervindo em qualquer desvio de variável, o Controle Estatístico irá monitorar o processo em busca de situações imprevistas (anormais). A pesquisadora cita que, com a utilização destas ferramentas de controle nos processos farmacêuticos e em geral, podem proporcionar excelentes níveis de qualidade de seus produtos.

Yang e Sheu (2006) integraram o controle de engenharia de processo multivariado, utilizando o controlador multivariado EWMA proposto por Tseng, Chou e Lee (2002), com o controle estatístico de processo multivariado. Através da simulação de dados, estudaram o desempenho de identificação de distúrbios entre algumas combinações realizadas. Em um momento específico, introduziram, propositadamente, no modelo um distúrbio para avaliar em quantos períodos posteriores os sistemas iriam identificar esta causa especial. Os autores compararam o controlador multivariado EWMA, operando isoladamente, e este combinado com as cartas de controle T^2 de Hotelling, médias móveis exponencialmente ponderadas multivariadas (MEWMA) e médias móveis geralmente ponderadas multivariadas (MGWMA). Verificaram, com as simulações, que o controlador operando isoladamente obteve o pior desempenho. As combinações com o controle estatístico multivariado, principalmente o MGWMA, proporcionou uma identificação mais rápida de causas especiais,

fazendo com que variáveis de controle fossem corrigidas mais cedo, principalmente quando o controlador não conseguia mais o ajuste satisfatório devido ao distúrbio criado.

Utilizando o modelo matemático de um tanque químico, com um fluxo de entrada e um de saída, Wang e Tsung (2008) simularam um processo dinâmico a ser monitorado por uma carta de controle T^2 , adaptativa proposta. Esta carta de controle possui o objetivo de prever os deslocamentos dinâmicos da média das variáveis do processo e ajustar a carta T^2 de forma adaptativa, para aumentar a sua capacidade de identificar anormalidades. Para tal, a estatística da carta de controle é obtida por um vetor composto pelos últimos valores das variáveis de entrada e de saída observados e também de valores de instantes anteriores.

Khan, Moyne e Tilbury (2008) desenvolveram um sistema denominado de Metrologia Virtual, que trabalha com a predição de variáveis de metrologia, utilizando o estado do processo e informações do produto. Este sistema é utilizado na verificação das metrologias existentes com a finalidade de melhorar o controle de processo em termos de precisão e velocidade. Empregado em processos MIMO, nos quais os dados de medição não são disponibilizados a todo instante, apenas em estações metrológicas em algumas etapas do mesmo. Os Mínimos Quadrados Parciais (PLS) são utilizados na elaboração de um modelo de regressão linear possibilitando acomodar tendências, variações rápidas de tendência e retardos da metrologia. Como o comportamento do processo pode ser alterado por distúrbios externos e internos, o modelo PLS é, recursivamente, atualizado quando novos dados de medições estiverem disponíveis, capturando tendências, porventura, existentes. Citam os pesquisadores que foram obtidos melhores resultados com o PLS recursivo do que com o não recursivo. Os dados foram simulados e os controladores utilizados no estudo foram o EWMA e o EWMA duplo.

Utilizando dados reais, obtidos de um processo de complexo de refino multivariado, já monitorado por um controlador baseado nos modelos de controle preditivos, Alghazzawi e Lennox (2008) propuseram um monitoramento em tempo real para identificar, de forma mais rápida e simplificada, as fontes de anormalidades do processo. Utilizaram a Análise de Componentes Principais e suas variações como: ACP Multiblocos, ACP Recursiva. Em função da complexidade e dinâmica do processo, concluíram que a ACP Recursiva obteve o melhor resultado, identificando de forma mais rápida e clara as anormalidades encontradas. Os dados reais foram utilizados para parametrização e avaliação das técnicas de controle estatístico de processo. O controlador preditivo não foi objeto de estudo por parte dos pesquisadores.

Utilizando a mesma base de dados da pesquisa anterior, Alghazzawi e Lennox (2009)

investigaram a capacidade das técnicas de controle estatístico multivariado em monitorar o desempenho de controladores preditivos em operação em sistemas industriais, no caso, petroquímicos. Com o controlador existente operando na planta, os dados históricos foram utilizados para ajustar as cartas de controle multivariadas que, posteriormente, também foram analisados para identificação de anormalidades que ocorreram, mesmo com o controlador preditivo operando. Com esta análise, puderam identificar problemas havidos devido a: falhas de parametrização do controlador, com matérias-primas, falhas de válvulas operando fora de faixas de trabalho recomendadas, e outros. No estudo, utilizaram a Análise de Componentes Principais e Mínimos Quadrados Parciais, inclusive em suas versões recursivas por serem mais adequadas ao processo variante no tempo e não estacionário. Concluem que, na avaliação do controlador existente, obtiveram bons resultados. A verificação de falhas operacionais ficou mais fácil de ser realizada e investigada.

2.3.3 Considerações

Neste Capítulo, foram abordadas as técnicas utilizadas no Controle Estatístico de Processo, com ênfase em dados autocorrelacionados e os sistemas de Controle de Engenharia de Processo. As integrações destas duas metodologias, identificadas na literatura no âmbito univariado e multivariado, também estão apresentadas. Ao longo da evolução das duas áreas, estas foram desenvolvidas de forma independente por estudiosos com formações específicas em cada uma delas (YANG; SHEU, 2006). O controle de processo tem sido alvo cada vez maior por parte de pesquisadores, uma vez que o cenário de competições globalizadas está se tornando cada vez mais competitivo. Um controle mais efetivo, preciso e robusto (imunidade a ruídos) é a necessidade atual de sistemas industriais, nos quais desvios e falhas resultam em grandes quantidades de material fora de especificação gerando retrabalhos e perdas (MONTGOMERY, 2004). Tais desperdícios devem ser minimizados pois, em alguns casos, influenciam diretamente nas margens de lucro dos produtos em concorrência acirrada.

Mesmo com sistemas sofisticados de controle de engenharia, os processos ainda enfrentam problemas e falhas. Situações não previstas no modelo de controle podem fazer com que este não identifique, ou não consiga realizar determinados ajustes e correções necessárias para manter o processo dentro da especificação. Uma forma rápida de identificação de falha é de grande importância, preferencialmente antes dos produtos processados saírem da especificação. Integrando as duas áreas busca-se que seja minimizado, ou até mesmo eliminado, este tipo de situação.

Analisando as pesquisas desenvolvidas, percebe-se que a integração propondo sistemas com autoajustes, utilizando o CEP para interferir diretamente na lógica do controlador, gerenciando o processo, foi pouco explorada, mesmo com técnicas mais avançadas como as multivariadas. Nesta direção, é que se buscou desenvolver um caminho, com caráter prático de aplicação, mantendo a autonomia operacional de cada uma das metodologias, para que se pudesse observar além das melhorias já atribuídas à integração, a possibilidade de maior interação quando da presença de anormalidades.

3 PROPOSIÇÃO DE INTEGRAÇÃO

O CEP e o CEnP, historicamente, foram desenvolvidos e empregados de forma independente. Estudos observados na literatura sinalizam a importância e necessidade da aproximação destas áreas, o que está ainda sendo buscado e necessitando ser aprimorado. Cada técnica com seus objetivos, o CEP buscando reduzir as variações do processo, utilizando as cartas de controle para detectar as causas especiais e, assim, facilitar a remoção delas. Já o CEnP procura reduzir as variações utilizando rotinas de ajustes para manter as variáveis de saída próximas aos seus valores-alvo. Por questões de simplificação, o sistema de controle responsável pelo Controle de Engenharia de Processo (CEnP) será referenciado no texto simplesmente por “controlador” e o Controle Estatístico de Processo (CEP) por “controle estatístico”.

Nos estudos realizados envolvendo a integração das duas técnicas, têm-se as seguintes situações: (i) os controladores já estão implementados em plantas industriais, não sendo possível sua manipulação de forma intencional para testes ou maiores verificações, tendo apenas o seu desempenho avaliado por cartas de controle (ALGHAZZAWI; LENNOX, 2008; ALGHAZZAWI; LENNOX 2009), ou (ii) são empregados controladores com modelos simplificados, nos quais somente parâmetros mais simples são ajustados. Em alguns, apenas o erro (parte estocástica) é manipulado para efeito de simulação, não correspondendo diretamente aos encontrados no chão de fábrica (REYNOLDS; PARK, 2009; YANG; SHEU, 2006; TSUNG; SHI, 1999).

Grande parte dos trabalhos, envolvendo a integração das duas técnicas, considera casos particulares de cartas de controle designadas para detectar uma mudança específica do processo, que são os focos dos seus interesses, bem como situações nas quais os controladores são muito específicos. Buscou-se, então, uma situação prática em que essa teoria pudesse ser visualizada e aplicada, possibilitando uma melhoria de um processo industrial real corriqueiramente encontrado.

Este estudo apresenta a integração das duas áreas, nas quais o Controle de Engenharia do Processo e o Controle Estatístico de Processo operam em conjunto, identificando falhas e corrigindo as variáveis de processo de forma rápida. Este estudo também possibilita avaliar o desempenho das combinações do controlador com as cartas de controle na ocorrência de anormalidades e efetuando as correções e sinalizações necessárias, avaliando mais de um tipo de comportamento de processo. A integração, ora proposta, permite avaliar o desempenho das

cartas de controle em identificar, em diferentes condições do processo, a presença de causas especiais. Com as possibilidades de alterações do comportamento das variáveis, é permitido avaliar o desempenho individual do controlador de engenharia e este, integrado ao controle estatístico.

Para facilitar o entendimento, as ações tomadas são apresentadas em três módulos. Nas duas primeiras seções, são descritos os módulos necessários à especificação e as determinações da integração proposta, apresentando as considerações necessárias ao seu desenvolvimento. O primeiro módulo é relacionado à modelagem matemática do processo, com a definição do controlador e das cartas de controle. No segundo, é apresentada a operação conjunta das duas áreas e as simulações a serem realizadas. No terceiro módulo, são introduzidas alterações intencionais no processo para testar o comportamento da integração na presença destas anormalidades.

3.1 MÓDULO 1 - ESPECIFICAÇÕES DO PROCESSO E DETERMINAÇÃO DO CEnP E CEP

Para a integração entre o CEnP e CEP, são necessárias algumas definições, tanto do processo quanto do controlador, e do controle estatístico. Estas definições e parametrizações iniciais são necessárias para especificação de como cada uma das áreas será implementada.

Com a análise do processo, obtêm-se as informações que permitem elaborar o equacionamento matemático que melhor descreve a forma do seu comportamento. Assim, as variáveis envolvidas podem ser determinadas, observando-se as suas relações. Podendo-se, então, especificar um controlador adequado, com suas leis de controle, e também as variáveis a serem monitoradas pelo controle estatístico. A Figura 5 apresenta um fluxograma das atividades envolvidas na elaboração deste módulo, que se encerra com as determinações necessárias destas duas áreas para se iniciar as simulações no módulo seguinte (seção 3.2). Cada uma das etapas do fluxograma é detalhada nas subseções que seguem.

3.1.1 Características do processo a ser estudado

Para implantação de um sistema no qual as técnicas CEnP e CEP possam demonstrar o seu potencial, estas devem estar relacionadas a um processo industrial, ou parte dele. As características a serem observadas neste processo, para que se justifique a sua utilização na determinação deste estudo, são descritas na sequência.

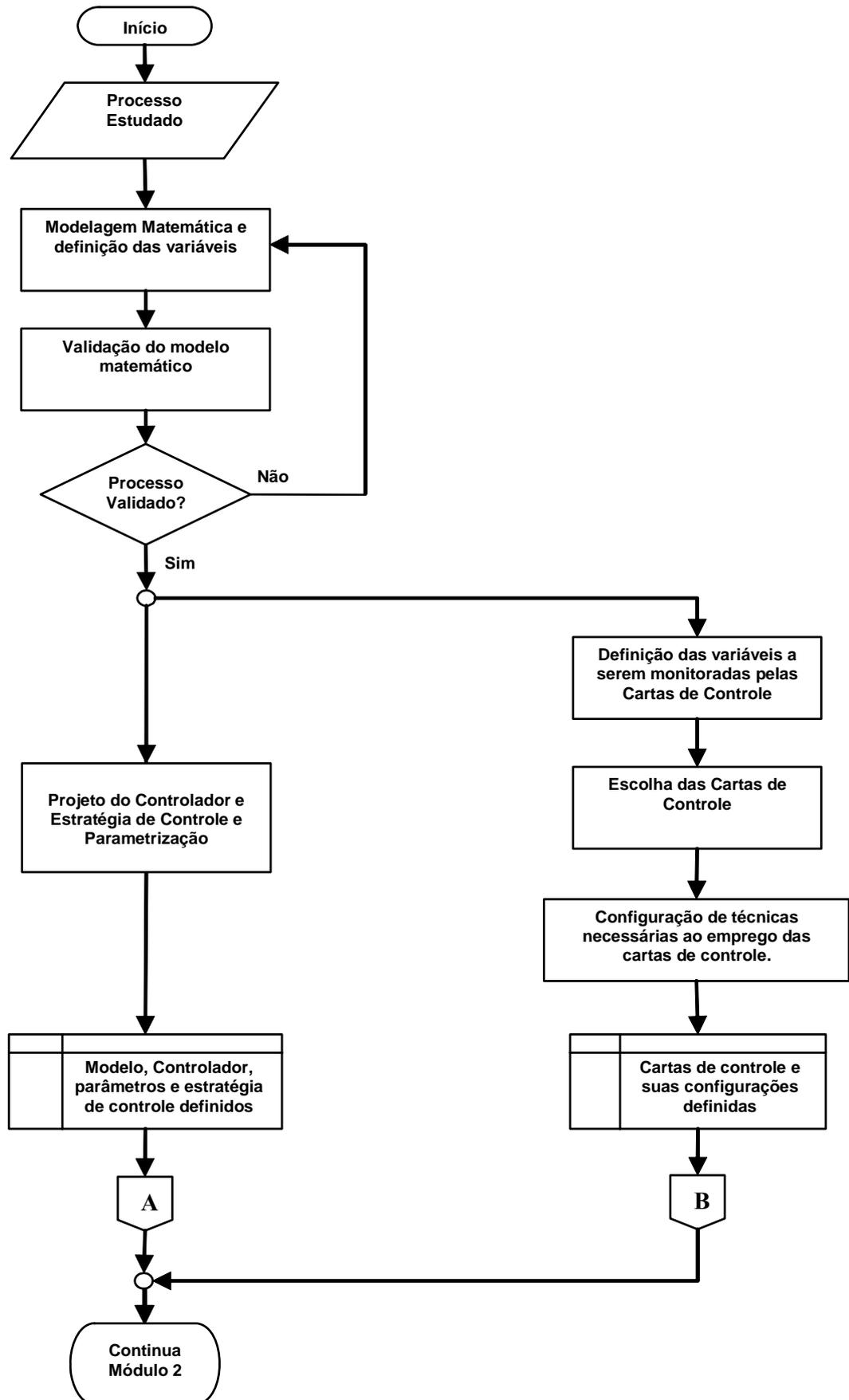


Figura 5 – Fluxograma Módulo 1 - modelagem e especificação do CEnP e CEP
[Fonte: Elaborado pelo Autor]

Deve-se contemplar um número mínimo de variáveis que se relacionem e que possam ser monitoradas, mensuradas, manipuladas e controladas através da ação de outras. Neste sistema, devem existir variáveis que precisam atender especificações do processo, não podendo sair de controle, em função de desperdícios de materiais, de tempo ou problemas de qualidade.

Uma relação de dependência deve ser observada entre as variáveis, de forma que um sistema de controle de retroação ou malha fechada (*feedback*) seja utilizado. O controle deverá permitir que, as diferenças entre as variáveis de saída e seus valores-alvo sejam constantemente reduzidas através da manipulação das variáveis de entrada.

O processo a ser estudado considerará a sua mudança de estado de forma contínua com a evolução do tempo, possibilitando acompanhar e controlar o seu comportamento em todos os instantes. Desta forma, será permitido que o controlador e as cartas de controle monitorem as suas variáveis, que podem alterar os seus valores a qualquer momento. Dentre as formas de equacionamento do processo, utilizam-se equações diferenciais para a descrição das relações e comportamento entre as variáveis, visando uma melhor representação da sua dinâmica (CHWIF; MEDINA, 2006).

As relações físicas apresentadas entre as diversas variáveis são respeitadas, considerando-se inclusive que estas variáveis são designadas conforme suas funções e objetivos. São classificadas como: variáveis de saída ou controladas (VC), as quais são determinantes da qualidade do produto e monitoradas pelas cartas de controle; variáveis manipuladas (VM), ajustadas para manter as variáveis de saída sob controle e as variáveis de processo (VP) não possuindo controle sobre as mesmas, representando as variações naturais inerentes ao processo.

Algumas considerações são observadas na obtenção do modelo matemático do processo a ser avaliado, abordadas na sequência.

3.1.2 Modelagem matemática e definição de variáveis

Partindo-se das relações físicas existentes entre as variáveis e as relações destas com as etapas do processo, constrói-se o modelo matemático que represente os efeitos encontrados na situação real. A obtenção deste modelo é necessária para determinar e parametrizar o controlador, definir as variáveis monitoradas pelas cartas de controle, bem como permitir o emprego de simulação numérica em pacote computacional. A simulação numérica é utilizada, desde o projeto do sistema de controle até a operação da planta estudada.

A modelagem matemática empregada na simulação deste trabalho é do tipo dinâmica, em que as variáveis podem sofrer alterações em relação ao tempo e as variações nos dados e influenciam o sistema em instantes subsequentes (GARCIA, 2005 e AGUIRRE, 2004). Quanto à relação entre as variáveis de entrada e saída, enquadra-se no tipo linear, nas quais as variáveis possuem uma relação de dependência linear. O modelo é constituído de equações diferenciais de primeira ordem. Em situações em que tal relação não o seja, técnicas e considerações de linearização são consideradas.

O equacionamento do processo é apresentado por meio de equações diferenciais, quando são utilizados parâmetros que não sofrem variações com o decorrer do tempo, e concentrado (não considera variações espaciais). A modelagem visa à simulação em tempo contínuo no domínio do tempo, utilizando o modelo de espaço de estados, obtido através de uma combinação entre relações teóricas e princípios físicos, envolvidos no processo. Na formulação, existe a consideração de variáveis com comportamento estocástico relacionadas a ruídos e perturbações.

Para gerar analiticamente o modelo matemático, são seguidos os três estágios propostos por Garcia (2005):

- Idealização de um modelo físico. Especificação e visualização de um sistema que se ajuste suficientemente bem ao comportamento do sistema real. Variáveis são escolhidas, simplificações que não comprometam o modelo e que facilitem a sua construção podem ser assumidas;
- Obtenção das equações de movimento do modelo. Aplicação das leis físicas na geração de um conjunto de equações diferenciais ordinárias com as variáveis de entrada, saídas e de estado do sistema. Descrever as relações de equilíbrio, balanço de forças, energia e outras;
- Análise do comportamento dinâmico. Obtido o modelo matemático de forma analítica, estuda-se o seu comportamento através de excitações adequadas das variáveis de entrada, analisando-se as de saída e observando-se as demais.

Após a obtenção de um modelo, o mesmo precisa, na sequência, ser validado. Desta forma, verifica-se sua adequação ao sistema real. Caso contrário, necessita ser alterado.

3.1.3 Validação do modelo matemático

Com a definição do modelo matemático, a etapa seguinte é a sua validação quando é analisado se o modelo obtido é adequado. A validação do modelo tem por objetivo a

comprovação se ele representa o sistema real, com fidelidade suficiente para garantir a obtenção de soluções satisfatórias para o problema original.

Não é possível garantir a validade do modelo em sua totalidade. O que será buscado é o aumento da confiança de que o modelo represente o sistema de forma satisfatória. Portanto, cuidados são tomados para evitarem-se os erros de rejeitar o modelo quando ele, na verdade, é válido, ou de se aceitar um modelo inválido, ou mesmo o de um modelo válido quando não se consegue obter as respostas almejadas. Como validações adotadas, as técnicas são sugeridas por Chwif e Medina (2006) de Análise de Sensibilidade e Validação Face a Face. No primeiro procura-se determinar as influências das variações dos parâmetros de entrada nos resultados a partir do modelo. Assim, analisando-se as alterações nestes parâmetros, pode-se observar a coerência com os resultados. Maior atenção deve ser dada aos parâmetros mais influentes e críticos. O segundo, faz com que os comportamentos e resultados sejam apresentados a um especialista que entenda do processo simulado e, com este, sejam analisados os resultados, verificando assim o grau de adequação do modelo (PORTUGAL, 2005).

Com a detecção de problemas nas condições operacionais do modelo, não é adequado validar o mesmo. Sendo assim, retorna-se à etapa anterior de modelagem para correções e alterações. Com a validação do modelo têm-se duas linhas paralelas de atuação: uma segue a sequência de atividades de projeto do controlador e suas leis de controle e parametrização e a outra, inicia-se pela definição das variáveis monitoradas pelas cartas de controle. Estas linhas de atuação são apresentadas na sequência.

3.1.4 Projeto do controlador e estratégia de controle e parametrização

Com o modelo matemático definido e validado, o mesmo é apresentado na forma de equações de espaço de estados. As relações e comportamento do processo estando estabelecidas, pode-se projetar o sistema de controle.

Como ponto de partida, as especificações técnicas a serem seguidas e atingidas pelo sistema de controle são determinadas antecipadamente. É explicitamente estabelecido o que os dispositivos devem ser e fazer. O projeto do sistema de controle busca atender às especificações, considerando-se os aspectos de: complexidade quanto a uso de ferramentas e recursos; custo-benefício na escolha entre critérios desejáveis e conflitantes; desvios do projeto entre a sua concepção inicial até sua efetiva realização e os riscos dos dispositivos reais em não poder desempenhar o comportamento projetado (DORF; BISHOP, 2001).

Os procedimentos propostos por Dorf e Bishop (2001) são seguidos para o projeto do

sistema de controle. Na Figura 6, são apresentadas as etapas seguidas deste desenvolvimento.

A primeira etapa proposta é o de estabelecer a finalidade a que se pretende alcançar com o sistema de controle. Na sequência, as variáveis a serem controladas devem ser identificadas. Na terceira etapa, são especificados os valores e a exatidão que cada variável controlada deve alcançar, estando relacionada também com a escolha posterior de sensores a serem utilizados nas suas medições.

De forma preliminar, na quarta etapa, é realizada uma primeira proposição de configurar o sistema de forma a ser conduzido ao desempenho de controle desejado. Estando relacionadas ao processo estudado, nesta etapa, são configuradas e avaliadas as necessidades de sensores, atuadores e do controlador. Atuadores são elementos que comandam diretamente a variável manipulada, adequando a informação recebida do controlador à grandeza física da variável (exemplificando, bombas dosadoras, cilindros pneumáticos). Na Figura 3, esses elementos estão representados em um sistema de realimentação (ou retroação).

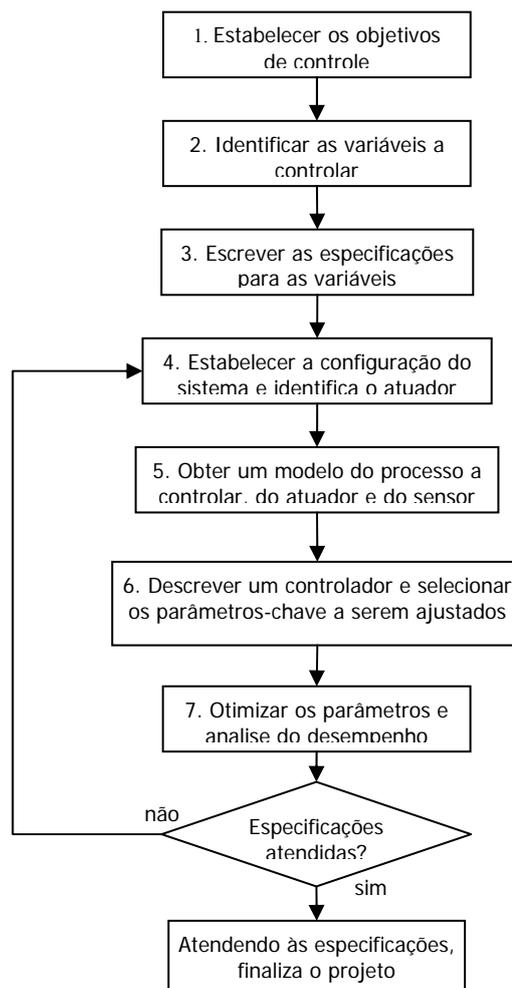


Figura 6 – Procedimentos de Projeto de Sistemas de Controle
[Fonte: Dorf e Bishop (2001)]

Na quinta etapa, em função das características do processo, são avaliados candidatos a atuadores, os quais devem proporcionar o desempenho desejado. Os modelos dos sensores e atuadores são considerados de forma a possibilitar o atendimento às especificações.

O projeto do controlador é definido na sexta etapa. Sendo um controlador de realimentação que, basicamente, compara a resposta desejada com a resposta real, a diferença (erro) é encaminhada a um amplificador para atuar na variável manipulada. Neste estudo, esta concepção também é válida, porém estarão sendo controladas mais de uma variável de saída. É realizada a combinação de controladores univariados, respeitando-se as relações entre as variáveis estabelecidas pelo modelo matemático do processo. O projeto do controlador é relacionado ao tipo e comportamento desejado e aos elementos existentes no processo avaliado. No projeto, são selecionados parâmetros adequados de forma a permitir sua operação dentro das atribuições e especificações previamente concebidas.

Ainda na sexta etapa, são estabelecidas regras a serem utilizadas na determinação dos comandos que deverão ser enviados ao sistema. Estas regras compõem a estratégia de controle que busca o estado desejado para o mesmo. Na estratégia de controle, são elaboradas as chamadas “leis de controle” utilizadas para ditar como um processo deve se comportar dentro do ambiente estabelecido, e, posteriormente, enviando comandos para os atuadores de forma a atingir os objetivos estabelecidos. Os objetivos geralmente são os de manter o processo dentro das especificações, observando-se as características de qualidade .

Ao final do projeto, na sétima etapa, os parâmetros do sistema são ajustados a fim de se obter o desempenho desejado. Se os ajustes são suficientes para que o sistema de controle possa atender às especificações, o projeto do controlador é finalizado e sua configuração é registrada e documentada. Não sendo os ajustes satisfatórios, retorna-se à quarta etapa, na qual se podem especificar novos atuadores e sensores mais eficientes e, na sequência, os demais passos são repetidos até que o desempenho almejado seja verificado.

Nesta fase de projeto do controlador e definição de estratégias de controle, o pacote computacional MATLAB, desenvolvido pela Mathworks Inc., é utilizado como ferramenta auxiliar. O projeto do controlador, a determinação dos parâmetros da lei de controle é específica para cada processo avaliado.

Conforme abordado na sétima etapa dos procedimentos de projeto de sistemas de controle, existe a necessidade de se avaliar o desempenho do controlador proposto no sentido de verificar se sua operação está condizente com os objetivos traçados e quanto ao seu comportamento.

As especificações de desempenho que descrevem como o sistema deve se comportar

são analisadas quanto a: (i) regulação contra perturbações; (ii) respostas desejadas aos comandos; (iii) sinais dos atuadores; (iv) baixa sensibilidade às variações inerentes ao processo.

O sistema de controle também será analisado quanto a sua capacidade de se ajustar quando em regime transitório e em estado estacionário. Para tal, o desempenho é verificado em relação às especificações previamente estabelecidas em função do tempo. Estas especificações são relacionadas à ultrapassagem percentual de valores-alvo, tempo de acomodação, tempo de pico e tempo de subida.

A operação de avaliação de desempenho de um controlador é efetivada na prática por meio de critérios subjetivos. A avaliação, assim realizada, fundamenta-se em bases experimentais sendo dependente da experiência pessoal de cada projetista. As avaliações sobre o desempenho de controladores podem variar de acordo com o interesse e o objetivo de quem está analisando. Exemplificando: em uma situação, o projetista pode priorizar esforços na manutenção da variável no seu valor-alvo, enquanto em outra, pode buscar a economia de energia dos atuadores como prioridade.

Enquanto o controlador não atender aos desempenhos almejados, este deve retornar à etapa de projeto e definição das estratégias de controle e parametrização. Os passos são retomados até que se obtenha uma configuração tal que atenda às especificações estabelecidas.

Com os testes operacionais do controlador, tendo sido considerado satisfatório o seu desempenho, este é finalizado e passa-se para a próxima atividade em que parâmetros e configurações são registrados.

3.1.5 Registro dos parâmetros e configurações do controlador

Após cumprir todas as etapas de avaliações tem-se a definição do controlador mais adequado ao processo em estudo. Tendo o controlador sido aprovado nos quesitos estabelecidos e nas avaliações de desempenho, este estará pronto para ser utilizado no gerenciamento do processo.

As suas configurações, parâmetros e estratégia de controle são armazenados para serem empregados no módulo 2. Estas informações são necessárias para que o controlador possa desempenhar suas funções, nos ambientes simulados, de forma satisfatória.

3.1.6 Definição das variáveis monitoradas pelas cartas de controle

Em paralelo com o projeto e definições do controlador, as cartas de controle também são especificadas. Para início da avaliação, as variáveis do processo são identificadas e selecionadas as que serão monitoradas.

Através do estudo do processo, do levantamento do seu modelo matemático, bem como das determinações constantes nas especificações a serem seguidas, são conhecidas as variáveis envolvidas e também as associadas às características de qualidade. Como a coleta de dados é uma atividade primordial, são selecionadas variáveis que possuam relação direta com os objetivos do processo em estudo. Miletic et al. (2004) recomendam cuidados nesta etapa de seleção, uma vez que variáveis importantes podem não ser consideradas se a seleção for realizada preliminarmente sem maiores cuidados.

Na implementação prática, existem dificuldades que devem ser contornadas para o emprego de algumas variáveis. Compatibilidades de escala de valores, tempos de obtenção de medidas, filtragem de dados, *outliers*, e outros ajustes são necessários para compatibilizar as informações e para serem efetivamente utilizados de forma confiável.

3.1.7 Definições das cartas de controle

As cartas de controle, que monitoram as características de qualidade, variáveis de saída do processo (Y_t), são utilizadas para auxiliar na identificação de anormalidades do mesmo. Desta forma, são avaliadas as diferenças entre as variáveis monitoradas (controladas) e os valores-alvo (erros de controle), após ajustes do controlador (MONTGOMERY, 2004). Assim, as cartas de controle estarão contribuindo para o aumento da robustez do sistema, suprimindo possíveis deficiências do controlador, mantendo as características de qualidade exigidas para o processo.

Trata-se de um processo envolvendo mais de uma variável de entrada e de saída, além de outras relacionadas ao controle. É empregado um CEP múltiplo no qual cartas de controle univariadas são necessárias para o monitoramento e controle estatístico das características de qualidade em foco. Como no estudo são avaliados cenários diferentes e onde os comportamentos das variáveis são afetados pela correlação dos dados, as cartas de controle utilizadas devem ser apropriadas para esta característica. A correlação é introduzida pela própria ação do controlador sobre as variáveis do processo, realizando a sua atividade fim: manter as variáveis de saída (controladas/monitoradas) próximas ao alvo. A seleção da carta

de controle busca atender à situação encontrada com o comportamento dos dados, possibilitando identificar anormalidades em diferentes situações.

Com base no referencial teórico, foram definidas as cartas de controle a serem utilizadas na operação conjunta com o controlador, através de suas peculiaridades. O critério foi o de buscar características que viessem a atribuir maior sensibilidade ao sistema proposto identificando situações de anormalidades de forma mais eficiente e minimizando alarmes falsos.

As cartas de controle selecionadas para a monitoração do processo seguem a abordagem baseada em modelos de autocorrelação. Especificamente, as baseadas em séries temporais ajustadas por modelos ARIMA, na qual monitoram-se os resíduos de ajuste. Estas cartas foram escolhidas por serem umas das mais utilizadas para o controle estatístico de dados correlacionados, possuindo grande flexibilidade de ajustes de seus parâmetros (APLEY; SHI, 1999 e MONTGOMERY, 2004). São utilizadas cartas de controle univariadas para cada uma das características de qualidade, monitoradas e controladas, específicas do processo.

Os períodos monitorados pelas cartas de controle correspondem somente aos períodos de produção efetiva. Os demais intervalos entre jornadas de trabalho e mesmo finais de semana não são avaliados pelo CEP.

3.1.8 Configuração de técnicas necessárias ao emprego das cartas de controle

Com a escolha das cartas de controle, são necessárias definições que devem ser consideradas no sentido de operacionalizar as suas atividades. São informações consideradas nas suas configurações, e que só podem ser determinadas com a especificação do processo e suas características de operação.

Como são consideradas inspeções automáticas, em que as leituras e registros são realizados na monitoração de um processo contínuo, as amostras são unitárias ($n=1$). A cada tomada de leitura são registradas p características de qualidade ou medidas relacionadas a elas.

A frequência de amostragem é estabelecida em conjunto com o comportamento do processo. Para tal, é considerada como sendo a mesma frequência estabelecida pelo controlador para realizar seus ajustes periódicos, uma vez que estarão operando de forma concomitante, facilitando inclusive verificações e identificações posteriores. Os intervalos são regulares, não sendo consideradas variações ao longo do decorrer do tempo da simulação.

Cartas de controle de Shewhart e EWMA, para observações individuais, são empregadas para monitorarem, simultaneamente, os resíduos provenientes dos modelos ARIMA, estes, devidamente ajustados a cada uma das variáveis monitoradas.

3.1.9 Registro das cartas de controle e suas configurações

Com as cartas de controle definidas e suas configurações determinadas, estas estarão aptas a serem utilizadas na monitoração do processo em estudo. Desta forma, as informações obtidas são armazenadas para serem utilizadas na próxima fase de simulação do processo.

No módulo 2, as informações registradas das cartas de controle estarão disponíveis para serem resgatadas e empregadas na operação integrada ao CEnP.

3.2 MÓDULO 2 - OPERAÇÃO INTEGRADA CEnP E CEP

Com as definições obtidas no primeiro módulo, pode-se, então, avaliar a ação do CEnP e CEP operando conjuntamente. Na Figura 7, estão representadas as atividades que são desenvolvidas visando à avaliação de suas ações em diferentes ambientes, cujos comportamentos das variáveis são alterados em cada um deles. Na sequência, são descritas as ações necessárias à operação seguindo a ordem apresentada.

3.2.1 Determinação de cenários

No contexto de aproximar a simulação da realidade, restrições e comportamentos impostos pelo ambiente e pelo comportamento das variáveis, são levados em consideração. Diferentes alternativas são criadas, que configurando as exigências, que o modelo a ser simulado deve enfrentar, possibilitam estudar o seu desempenho em diversos aspectos. A observação e o acompanhamento do comportamento do modelo, operando com uma determinada condição, permitirão, em etapa posterior, avaliar se as restrições estão sendo satisfeitas e se os objetivos estão sendo alcançados.

Um cenário é considerado como a representação das relações e dos comportamentos das variáveis envolvidas no processo (modelo matemático), recriando, da forma mais próxima possível, o sistema real. Os cenários são compostos por conjuntos de dados, cujas combinações de diferentes comportamentos das variáveis, solicitam diferentes ações por parte do modelo avaliado, possibilitando testar o desempenho do sistema em diversos ambientes.

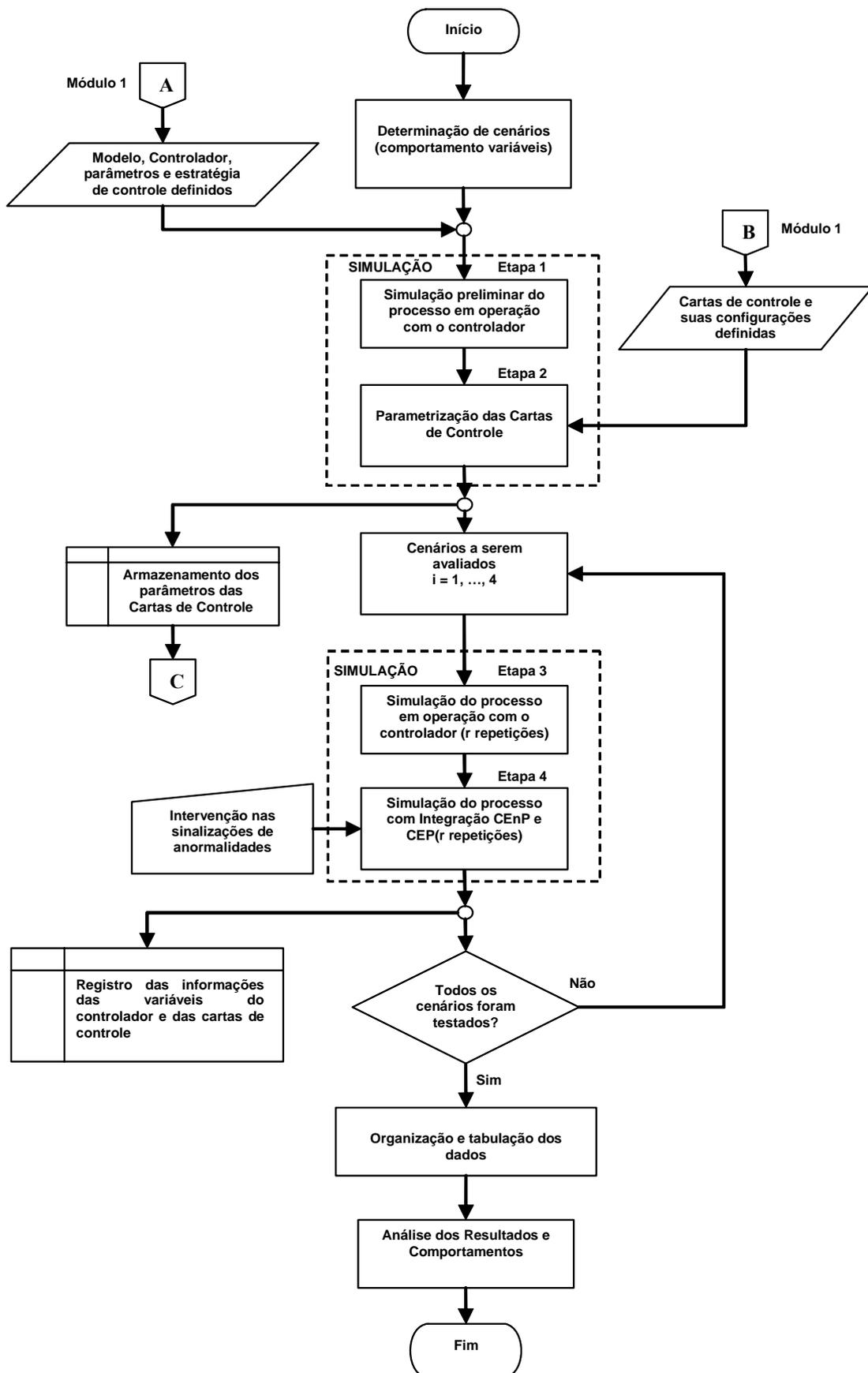


Figura 7 – Fluxograma Módulo 2 - Integração CENP - CEP
[Fonte: Elaborado pelo Autor]

Cenários são estabelecidos para que se possa simular a atuação isolada do CEnP e, deste, em conjunto com o CEP. Com o conhecimento prévio do sistema, já modelado, as variáveis de entrada, bem como as interações entre os elementos, são passíveis de serem trabalhados. Na geração dos valores das variáveis de entrada, e nas interações (influências) entre as demais variáveis que compõem o processo estudado, alterações permitem que os sistemas de controle e monitoramento possam ser exigidos de formas diferentes.

Será analisada a atuação das técnicas em duas condições de comportamentos dos dados de entrada do sistema. São simulados dados de entrada com características de menor e maior variabilidade. Além destes níveis de comportamento, também são verificadas as influências no desempenho do modelo estudado quanto variações de alguma característica técnica do produto envolvido no processo. Duas situações relacionadas a uma característica técnica são verificadas, como por exemplo, produtos processados com menor e maior dimensão.

Através do equacionamento obtido para elaboração do modelo matemático, módulo 1, são observadas as principais relações de dependência existentes entre as variáveis. Com este conhecimento, relações poderão ser alteradas procurando observar diferentes comportamentos.

Combinando as especificações, previamente almeçadas, os níveis de comportamento e características, tem-se os cenários a serem avaliados, que se encontram representados na Figura 8. Ao todo são quatro cenários em que irão ser simuladas a operação do CEnP de forma isolada e as combinações (CEnP e CEP) estabelecidas. A geração dos comportamentos das variáveis e as interações manipuladas são definidas com o detalhamento do processo implantado.

Cenário	Relações Estudadas	
	Comportamento (variabilidade)	Característica Técnica
C ₁	Menor	Menor
C ₂	Menor	Maior
C ₃	Maior	Menor
C ₄	Maior	Maior

Figura 8 – Cenários avaliados
[Fonte: Elaborado pelo Autor]

3.2.2 Simulação do processo

Com o modelo, controlador, parâmetros e estratégia de controle e os cenários

determinados, é possível passar para a simulação dinâmica do processo em estudo. Com as condições de contorno estabelecidas pode-se analisar o comportamento da simulação em situações semelhantes às que o sistema real enfrenta.

Como a avaliação de interesse está baseada em um processo contínuo, no qual sua mudança de estado ao longo do tempo é considerada, a simulação contínua é empregada por melhor representar esta dinâmica. Consultas a especialistas e à literatura técnica específica, foram utilizadas para definir os comportamentos típicos de cada uma das variáveis de processo. Com estas informações, é possível identificar quais distribuições de probabilidade melhor se ajustam a estes comportamentos. Com esta identificação, podem-se gerar os dados incluindo um comportamento estocástico nos mesmos.

As simulações são realizadas utilizando-se o pacote computacional MATLAB. Visando a verificação do modelo de simulação, o mesmo é implementado computacionalmente em seções, em que, cada uma delas é conferida gradualmente quanto a sua funcionalidade, à medida que é programado. Desta forma, falhas na transcrição e programações são evitadas.

A simulação é composta por quatro etapas. A primeira é a simulação do processo em rodada preliminar, apenas com o controlador operando para obtenção do histórico das variáveis a serem monitoradas pelo CEP e determinação do melhor modelo ARIMA, ajustado ao comportamento de cada uma das variáveis monitoradas (controladas). A segunda, com o controlador e o controle estatístico em uma outra rodada, determinando os parâmetros das cartas de controle. A terceira, com o controlador realizando todas as r repetições programadas. A quarta, com o controlador em conjunto controle estatístico, simulando as mesmas r repetições. Cada uma das etapas será descritas nas subseções na sequência. Os cenários são alterados apenas nas etapas três e quatro.

São entendidas como anormalidades do sistema proposto, com o controlador operando isoladamente ou em conjunto com as cartas de controle, as situações em que alguma das variáveis controladas (características de qualidade monitoradas) atinja valores fora de sua especificação ou situações que levem à sinalização de causas especiais pelo CEP, quando for o caso.

3.2.2.1 Simulação preliminar do processo em operação com o controlador

Em uma etapa inicial, com o controlador devidamente sintonizado e operando de forma isolada, utilizando-se um dos cenários, é gerada uma rodada preliminar visando obter o

comportamento das variáveis a serem monitoradas pelas cartas de controle. Nesta primeira rodada, antes de iniciar as repetições, o padrão de comportamento dos dados das variáveis de saída é capturado, servindo como conjunto de dados para ajuste e parametrização dos modelos ARIMA.

Com as informações obtidas, procede-se à análise para identificação dos melhores modelos ARIMA que se ajustem a esses dados, utilizando-se os critérios AIC, HQC e SBIC. É ajustado um modelo para cada variável de saída. Após a identificação, estes melhores modelos são incorporados ao programa para que se calcule os erros de ajuste a serem monitorados pelo CEP.

3.2.2.2 Parametrização das cartas de controle

Na segunda etapa da simulação, o controlador opera em conjunto com as cartas de controle dos resíduos. Estes resíduos são calculados com a determinação dos melhores modelos ARIMA, ajustados a cada uma das variáveis monitoradas, e devidamente inseridos no programa. Nesta atividade, são consideradas as especificações definidas no módulo 1.

Com esta primeira rodada conjunta, são determinados os parâmetros de cada uma das cartas de controle. Uma rotina programada determina as estimativas de variabilidades, bem como, providencia os cálculos dos limites de controle. Estes parâmetros são armazenados para serem utilizados na quarta etapa de simulação. Como se trata de simulações, considerou-se que o processo já se encontra mantido em estado de controle (Fase II do CEP).

Os parâmetros somente são armazenados caso não sejam constatadas sinalizações nas cartas de controle utilizadas neste período. Na presença de sinalizações ou de qualquer outro comportamento que indique anormalidade, a simulação deverá ser refeita para obtenção de novos valores.

3.2.2.3 Simulação do processo em operação com o controlador

Nesta etapa, são utilizados todos os desenvolvimentos e critérios de simulação, aplicados na primeira etapa de simulação. A simulação ocorre com o controlador operando de forma isolada, buscando o gerenciamento do processo, sem contribuições das cartas de controle, mesmo que anormalidades (causas especiais) sejam percebidas. São geradas r repetições de cada cenário.

A quantidade de repetições estará vinculada ao desempenho do ambiente de

simulação. Estima-se uma quantidade inicial de 1000 repetições (replicações), quantidade esta que pode ser alterada dependendo do tempo computacional envolvido por ocasião da implementação e do comportamento do processo em estudo.

Durante o período de simulação, os dados gerados para cada uma das variáveis do processo, em cada repetição, são armazenados em um banco de dados. Desta forma, é possível analisar posteriormente as anormalidades e também proporcionar a reutilização dos dados para recriar as mesmas condições operacionais, quando da simulação da integração com CEP, permitindo-se, assim, a comparação direta das duas situações estudadas.

3.2.2.4 Simulação do processo com integração CEnP e CEP

Nesta quarta etapa, todos os cenários são avaliados utilizando-se os desenvolvimentos empregados no módulo 1 e também nas etapas 1 e 2 anteriores. Conta-se então com os melhores modelos ARIMA ajustados aos comportamentos dos dados para as variáveis em estudo, computando-se os resíduos a serem monitorados pelas cartas de controle. Os parâmetros de cada uma das cartas de controle, já armazenados, são utilizados para avaliação do controle estatístico em todas as repetições.

As variações naturais inerentes ao processo são recriadas com o resgate dos valores das respectivas variáveis, armazenadas em um banco de dados a cada repetição na terceira etapa, no qual o controlador operou isoladamente. Assim, recriam-se os mesmos ambientes para avaliar a atuação conjunta CEnP e CEP, reproduzindo as r repetições de cada cenário, possibilitando a comparação de desempenhos entre atuações.

3.2.3 Intervenções nas sinalizações de anormalidades

Nas simulações em que o controlador estará operando de forma combinada com as cartas de controle, quando ocorrerem sinalizações de anormalidade, o controlador para suas atividades normais, entrando em uma situação especial de operação. Nesta nova situação o controlador recebe uma contribuição em sua lei de controle, partindo das cartas de controle, que auxilia no seu gerenciamento, sendo uma forma de autoajuste.

Em função da variável geradora de sinalização e da magnitude do seu desvio em relação ao alvo, uma forma de operação “emergencial” é adotada, interferindo na lei de controle específica daquela variável onde houve a ocorrência. Esta condição de operação é mantida enquanto houver sinalizações de causas especiais.

A ação de autoajuste é automaticamente acionada sem análise imediata da causa geradora. Com a sinalização é emitida uma medida de correção para o controlador. As indicações de causas especiais são analisadas individualmente, porém como se tratam de simulações - apesar de ser uma etapa importante do CEP - estas são analisadas posteriormente ao final das repetições. Todas as sinalizações são investigadas.

Em um processo real, procura-se investigar, e se possível, remover os efeitos causadores de anormalidades, após sua sinalização. Com o sistema de autoajuste, o controlador do processo recebe um auxílio, enquanto não forem devidamente identificadas e removidas as anormalidades, procurando reduzir-se os efeitos sobre a variável de saída monitorada. Cessando as sinalizações, o controlador retorna à sua operação normal e continua atuando até nova sinalização. O controlador encerra sua atuação, de forma isolada, ao atingir as repetições programadas.

3.2.4 Registro das informações das variáveis do controlador e das cartas de controle

Para que os estudos e análises possam ser elaborados em momento oportuno, são registradas as informações relativas a cada uma das r repetições de cada cenário dos comportamentos das variáveis do processo, das manipuladas pelo controlador e as de saída. As duas partes da simulação (controlador e controlador em conjunto com as cartas) são armazenadas de forma independente. As sinalizações das cartas de controle, em que momento e condições sinalizaram, também são armazenadas.

As intervenções realizadas no controlador, quando das sinalizações ocorridas, também são anotadas. Os comportamentos das variáveis são guardados para análises e confrontações, podendo relacioná-los com as sinalizações e, com isso, identificando-se as anormalidades ocorridas.

No pacote computacional utilizado, é criado um banco de dados com todas as informações disponíveis. Esse armazenamento possibilita o resgate dos dados para avaliações e comprovações, além de permitir o rastreamento de informações.

Estas informações são avaliadas após o encerramento deste módulo, quando conclusões são obtidas através de análises específicas, levando também em consideração as variáveis e os cenários envolvidos.

3.2.5 Todos os cenários foram testados?

No sistema computacional é estabelecida uma sequência para que sejam testadas as combinações de todos os cenários. No caso de ainda existirem cenários a serem avaliados (decisão não), a fase de simulações deste módulo não é encerrada e passa-se a simular o próximo cenário. Não possuindo mais cenários (decisão sim), a sequência é encerrada. Somente quando todos forem simulados, em todas e repetições, é possível passar para a etapa seguinte. A sequência de simulação garante que todos os cenários são testados e todas as combinações são simuladas para que seus dados sejam registrados.

3.2.6 Organização e tabulação dos dados

Partindo-se dos dados registrados, estes são tratados para extração de informações do ocorrido nas simulações. Os comportamentos das variáveis de processo, das manipuladas e das controladas (monitoradas) também são acessados no referido banco de dados.

As seguintes tabulações de dados são realizadas visando favorecer a atividade de avaliação:

- Sinalizações de anormalidades ocorridas por tipo de cartas de controle;
- Sinalizações de anormalidades das cartas de controle por tipo de cenário;
- Sinalizações de anormalidades das cartas de controle, cujas causas não foram explicadas;
- Sinalizações de anormalidades das cartas de controle relacionadas às variações consideradas naturais do processo (alarmes falsos);
- Registro de falhas do controlador ao manter as especificações do processo, quando operando de forma isolada;

Os dados das variáveis controladas (monitoradas) são verificados quanto aos seus comportamentos ligados aos cenários e o seu relacionamento com anormalidades identificadas pelo CEP. As possíveis informações e relações que favoreçam as avaliações são estabelecidas.

3.2.7 Análise dos resultados e comportamentos

Com os dados tabulados é analisada cada combinação simulada envolvendo controlador, cartas de controle e cenários. Os comportamentos das variáveis manipuladas e

controladas (monitoradas) também possuem grande importância na avaliação.

Com a operação isolada do controlador é possível analisar onde este não atuou de forma adequada, quando confrontado com as sinalizações obtidas pelas cartas de controle e os comportamentos das variáveis de saída. É possível localizar situações que não foram devidamente consideradas no seu projeto, ou alterações de comportamentos posteriores que resultam em falhas de gerenciamento. As investigações das anormalidades constatadas possibilitam a comprovação se o controlador isoladamente possui, ou não, condições de operar sem comprometimentos de resultados (características de qualidade dentro das especificações).

Com os dados das combinações, através das sinalizações, identificam-se onde as cartas foram mais sensíveis em sinalizar anormalidades. São também relacionadas com o tipo de cenário das ocorrências. Esta sensibilidade é constatada pelo número de sinalizações observadas em relação aos mesmos cenários por cada tipo de carta. Relações são estabelecidas entre as sinalizações das cartas, os eventos do processo ou do controlador e os cenários apresentados. O desempenho das combinações entre o controlador com as cartas de controle também é avaliado quanto à manutenção dos valores das características de qualidade o mais próximo de seus valores-alvo.

Com o objetivo do sistema de controle é manter as variáveis controladas (monitoradas) o mais próximo aos seus valores-alvo, utilizou-se como medida de desempenho o Desvio Quadrático Médio do Alvo e a Distância Média em relação ao Alvo (SHAO, 1998). Estas duas medidas são calculadas somente para os períodos de produção, uma vez que os demais períodos não são monitorados pelas cartas de controle.

3.3 MÓDULO 3 - INTEGRAÇÃO DO CEnP E DO CEP COM A INSERÇÃO DE ANORMALIDADES

Partindo das definições do controlador e de seus parâmetros, e também das cartas de controle e suas configurações, obtidas nos dois primeiros módulos da metodologia proposta, são criadas situações que permitem a avaliação específica das atuações da integração CEnP e CEP. Na Figura 9, estão representadas as atividades desenvolvidas visando essa avaliação, na qual anormalidades são inseridas intencionalmente no modelo (processo). A Figura 9 é similar ao fluxograma apresentado na Figura 7, com algumas etapas adicionais para introdução das anormalidades e verificação do comportamento da integração na presença de anormalidades conhecidas. As ações são descritas a seguir, na mesma ordem apresentada no fluxograma.

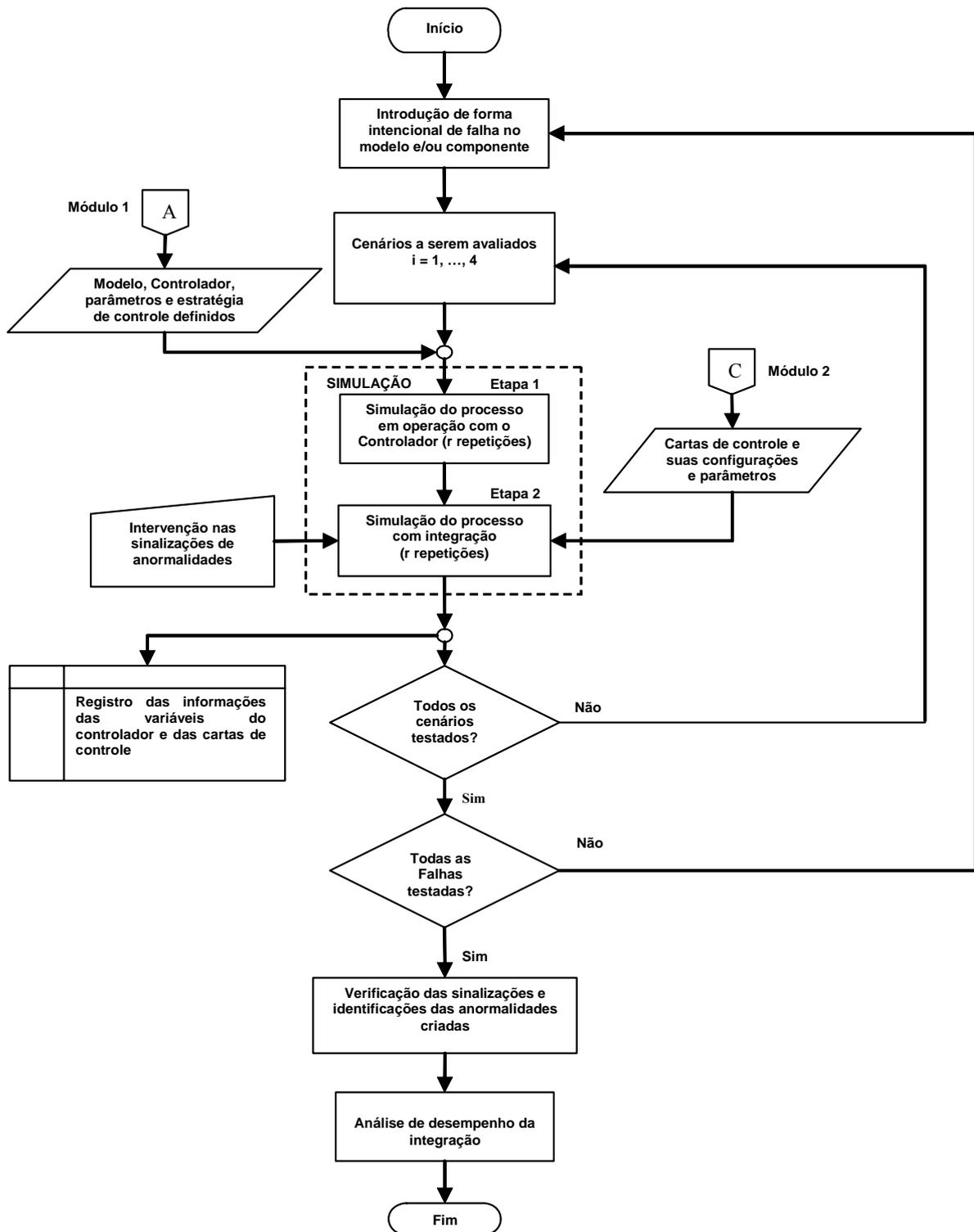


Figura 9 – Fluxograma Módulo 3 – Operação integrada e inserção de anormalidades
[Fonte: Elaborado pelo Autor]

3.3.1 Introdução de forma intencional de falha no processo e/ou componente

Uma vez que as relações entre as variáveis do processo são conhecidas e já modeladas, tem-se conhecimento sobre o seu comportamento dinâmico. Com a simulação em andamento, após um período de treinamento, em determinado instante arbitrado, uma alteração proposital e identificada é inserida no sistema.

Estas alterações inseridas buscam representar situações reais, como falhas de funcionamento ou de leituras de sensores, anormalidades dos elementos atuadores das variáveis manipuladas, comportamentos atípicos de variáveis, ou mesmo problemas de especificação com matérias-primas. Como no projeto do controlador existem limites de variações nas quais este possa operar, alterações além destes limites fazem com que ele não possua condições satisfatórias de gerenciar o processo. Desta forma, são forçadas situações que podem levar às sinalizações das cartas de controle. Nestas condições o comportamento do conjunto CEnP e CEP são testados em condições adversas.

O sistema de autoajuste poderá ser verificado quanto a sua efetividade em manter as variáveis de saída (características de qualidade) o mais próximo de seus valores-alvo. As anormalidades não são inseridas simultaneamente no programa de simulação

3.3.2 Cenários a serem avaliados

Para a análise da integração frente às falhas propositalis, são recriados os mesmos cenários estabelecidos no módulo 2 como ambientes a serem simulados, sendo uma combinação dos comportamentos (menor e maior variabilidade) e de variação de característica técnica do produto processado (maior e menor).

Os cenários são utilizados na avaliação do comportamento da integração em reagir à anormalidade proposital criada. Todas as anormalidades são avaliadas utilizando todos os cenários.

Por questões de comparação, são recriadas as mesmas situações para cada repetição da simulação, dentro de uma mesma rodada (conjunto de r repetições). Somente a geração das variações naturais inerentes ao processo e à operação do controlador e das cartas e controle, relativas a cada cenário, são responsáveis pelas alterações nos comportamentos de ajustes e identificação.

3.3.3 Simulação do processo

De forma análoga ao exposto na subseção 3.2.2, com o controlador e suas leis de controle especificadas, as cartas de controle definidas e os cenários determinados, a simulação dinâmica do processo pode ser realizada. Tratando-se de uma variação do módulo 2, são mantidos os modelos ARIMA ajustados e demais parâmetros das cartas de controle determinados e registrados naquele módulo.

Sendo utilizados os mesmos cenários do módulo 2, os comportamentos das variáveis envolvidas na simulação têm as mesmas características já empregadas, baseadas na simulação contínua de seus valores. As variações naturais inerentes ao processo são recriadas utilizando-se os parâmetros e distribuições de probabilidade já empregadas no módulo anterior.

As situações a serem avaliadas ocorrem em duas etapas. A primeira, com o controlador operando isoladamente, sendo realizado r repetições. A segunda, com a operação combinada com as cartas de controle, também realizando as mesmas r repetições, recriadas através das variações naturais, inerentes ao processo, armazenadas no banco de dados da primeira etapa. Desta forma é permitida a comparação de resultados.

A simulação ocorre de forma que o controlador opera, realizando seus ajustes automáticos e as cartas de controle monitorando o processo. Todos os cenários são avaliados nessa oportunidade. O pacote computacional MATLAB também será empregado nessa atividade, com as simulações sendo realizadas em sequência de 1000 repetições, como no módulo anterior.

3.3.4 Intervenções nas sinalizações de anormalidades

Neste módulo, quando o controlador estiver operando isoladamente, não são realizadas interferências. Será permitido que o mesmo busque suas correções de forma autônoma até o final de cada período simulado.

Quando da operação combinada, com as sinalizações das anormalidades, o sistema de autoajuste interferirá no controlador e, parâmetros especiais temporários são assumidos enquanto existirem sinalizações. É seguido o mesmo critério do módulo 2.

Procurando recriar situações práticas, em um período fixo, preestabelecido após a primeira sinalização de alguma carta de controle, supondo que a falha foi identificada e removida, a anormalidade propositalmente inserida deixa de existir, continuando a simulação com a anomalia sanada. As intervenções realizadas são de forma análoga ao exposto na

subseção 3.2.3, sendo que deverá ser confirmada a correspondência entre a sinalização e a falha criada intencionalmente.

3.3.5 Registro das informações das variáveis do controlador e das cartas de controle

Os dados provenientes das simulações, cenários, comportamentos das variáveis e sinalizações são armazenados. Os ajustes realizados pelo controlador e o comportamento de suas variáveis manipuladas e controladas (monitoradas), são registradas. As duas partes da simulação (controlador e controlador em conjunto com as cartas de controle) são armazenadas de forma independente.

Cada uma das r repetições de cada cenário tem os seus dados armazenados. As principais informações são as referentes aos instantes de sinalização da anormalidade de cada carta. Os dados necessários à comprovação das identificações das falhas também são armazenados, acompanhando os registros de sua sinalização.

As informações são guardadas em um banco de dados, criado no pacote computacional utilizado. Com as informações armazenadas é possível posterior avaliação das sinalizações realizadas pelas cartas de controle, bem como a análise de seu desempenho na identificação.

3.3.6 Todos os cenários testados?

De forma análoga ao apresentado no módulo anterior, uma sequência é estabelecida para garantir que todos os s cenários são avaliados por todas as combinações. Enquanto existir cenários que necessitem ser avaliados (decisão não), prossegue-se com as simulações.

Os cenários são avaliados considerando-se todas as suas repetições. Não existindo mais cenários (decisão sim), esta rotina é encerrada, passando-se para próxima atividade. Esta rotina visa conferir se todas as combinações são simuladas em todos os cenários para registro dos seus dados.

3.3.7 Todas as falhas testadas?

Uma sequência também é estabelecida de forma a garantir que todas as falhas sejam testadas em todos os cenários e, conseqüentemente, por todas as opções de combinações. Desta forma, todas as opções são testadas quanto às identificações das diferentes

anormalidades criadas e em diferentes ambientes.

Enquanto existirem falhas a serem testadas (opção não), não é permitido o avanço das atividades. Somente quando todas já tiverem sido avaliadas (opção sim), esta rotina será encerrada, passando-se à fase de verificação das sinalizações e identificação das anormalidades.

3.3.8 Verificação das sinalizações e identificações das anormalidades criadas

Utilizando-se os dados armazenados das simulações, são avaliadas as características dos comportamentos do controlador e das sinalizações das cartas de controle. Resgatam-se os instantes de sinalização, os registros de anormalidades com suas comprovações de causas geradoras dos eventos.

São tabulados os dados, estabelecendo-se as relações entre as cartas de controle, os cenários avaliados e os tipos de eventos inseridos propositalmente como anormalidades a serem identificadas. Como a falha e o momento em que esta foi causada são conhecidos, monitoram-se os momentos de sinalizações e os comportamentos da integração.

São realizadas as seguintes relações, visando favorecer a avaliação posterior dos dados:

- Sinalizações ocorridas por carta de controle;
- Sinalizações por tipo de cenário;
- Sinalizações cujas causas não foram explicadas, caso ocorram;
- Sinalizações e causas de anormalidades constatadas;
- Instantes de sinalizações e os níveis das variáveis de qualidade em relação às suas especificações;
- Comportamento das variáveis de saída quando dos ajustes temporários do controlador;
- Outras relações, observadas por ocasião da implementação computacional.

3.3.9 Análise de desempenho

Utilizando-se os dados armazenados e tabulados, são analisados os desempenhos da integração na presença de anormalidades. A avaliação consistirá em confrontar os valores das variáveis de saída, obtidas com o controlador operando isoladamente, com os valores das mesmas variáveis da operação combinada.

São averiguados os valores das variáveis que saíram da especificação, relacionando-as aos cenários avaliados e às anormalidades criadas. São constatadas as sensibilidades em relação aos ajustes propostos e sinalizações das anormalidades relacionadas às falhas que podem ocorrer em sistemas reais. A criação dos distúrbios intencionais, em instantes estabelecidos, permite averiguar e comprovar esta operação e como o sistema correspondeu. A simulação em pacote computacional (Matlab) possibilita esta avaliação que, muitas vezes, não é possível de ser testada na prática.

Os desempenhos são comprovados através de análises gráficas e dos resultados obtidos com os mesmos indicadores do módulo 2 (subseção 3.2.7), o Desvio Quadrático Médio do Alvo e a Distância Média em relação ao Alvo. Assim é mensurada qual das alternativas possibilita manter cada variável de saída o mais perto do seu valor-alvo. Estes indicadores permitem comparar os resultados da integração proposta em relação ao controlador operando isoladamente.

Em outra avaliação a ser realizada, é possível verificar até que condições o controlador conseguirá gerenciar as variáveis de processo, na presença das anormalidades criadas, mantendo as características de qualidade dentro de suas especificações. Com este comportamento não previsto no projeto inicial do controlador, a partir de um determinado instante, existe a possibilidade deste não conseguir mais realizar os ajustes necessários de forma satisfatória, caso as anormalidades não sejam identificadas pelos operadores. Também existe a possibilidade do controlador realizar o ajuste baseado em diversas alterações sucessivas e alterara o nível médio das variáveis.

4 APLICAÇÃO

Neste capítulo, é apresentada a implementação da integração proposta através de simulações baseadas em um processo real. Demonstrando a teoria abordada, integrando o CEnP e o CEP, seguiram-se os fluxogramas elaborados na parte metodológica, Capítulo 3. Almejando uma melhor compreensão, as etapas desenvolvidas seguem as mesmas ordens nas quais foram apresentadas nos fluxogramas referentes aos módulos 1, 2 e 3.

4.1 MÓDULO 1 - ESPECIFICAÇÕES DO PROCESSO E DETERMINAÇÃO DO CEnP E CEP

Como ponto de partida para a aplicação, foi escolhido um processo de galvanoplastia em uma empresa que fabrica grades para fogões e outros utilitários domésticos. Este processo será controlado e monitorado e servirá de base para obtenção dos dados operacionais e será estabelecido o seu equacionamento matemático. Tendo este conhecimento, é possível especificar um controlador de engenharia e cartas de controle para o monitoramento do referido processo.

4.1.1 Características e Descrição do processo estudado

O processo escolhido para aplicar a teoria apresentada é parte de um sistema de revestimentos metálicos (galvanoplastia) de uma empresa, localizada no sudoeste do Paraná, especializada em acabamentos superficiais em bases metálicas. Especificamente, no controle do banho do setor de cromagem. Como já citado, seus principais produtos são grades para fogões a gás, grades para linha utilitária como: grelhas de peixes, escorredores de louça, fruteiras, e outros utilitários domésticos. Possui uma estrutura montada com uma linha de eletrodeposição de níquel e cromo (hexavalente), além de uma linha de pré-tratamento. Processa, diariamente, mais de 10.000 peças recobrindo aproximadamente 40.000 decímetros quadrados neste período.

Sendo a empresa uma prestadora de serviços, seu principal cliente pertence à linha branca de eletrodomésticos (fogões); com isso, a sua maior demanda é dependente deste setor, porém com grande exigência ligada à qualidade. Nos processos de revestimentos metálicos, a qualidade do recobrimento é fortemente influenciada pela manutenção dos parâmetros dentro da especificação do banho (eletrolito).

Os revestimentos metálicos consistem em metais aplicados sobre materiais utilizados como base metálica ou não metálica (substratos), com espessuras consideravelmente mais baixas do que as do substrato. Dentre os tratamentos superficiais, destaca-se a eletrodeposição (ou galvanoplastia), uma boa opção de revestir as superfícies metálicas em aplicações industriais técnicas ou estéticas. A eletrodeposição é um processo comumente utilizado no qual se consegue obter um revestimento muito fino e, relativamente, livre de poros utilizando-se um material mais nobre e caro. Evita-se o excesso de metal depositado, geralmente por problemas econômicos. O revestimento metálico é realizado sobre uma superfície através da aplicação de uma corrente elétrica, geralmente contínua, operação denominada de eletrodeposição. Os elementos devem estar imersos em um banho, apropriadamente preparado, para poder ocorrer a deposição (recobrimento).

No processo de eletrodeposição, que é baseado nos princípios da eletrólise - uso da corrente elétrica em processos químicos – (eletroquímica) - os componentes principais são: eletrólito, catodo e anodo. O eletrólito, comumente denominado de banho, geralmente é uma solução aquosa concentrada que contém íons do metal que se deseja depositar (revestimento). Na eletrodeposição o material a ser protegido é colocado como catodo (base a recobrir) de uma cuba eletrolítica, onde o eletrólito contém sal do metal utilizado no revestimento podendo o anodo (revestimento) ser também do metal a ser depositado.

No processo de eletrodeposição, são realizadas três etapas principais: pré-tratamento – preparação da superfície do substrato para se obter depósitos aderentes e uniformes; eletrodeposição propriamente dita – imersão do substrato no banho para receber o revestimento; pós-tratamento - processo de lavagem e secagem das peças, sendo que dependendo do acabamento pode receber um banho adicional de soluções inibidoras para proteção adicional. Para uma maior compreensão dos processos de eletrodeposição, consultar Wolynech (2003), Santana *et al.* (2007).

O processo a ser estudado, consiste em seis etapas básicas, conforme apresentado na Figura 10. Na primeira, os produtos (aramados) passam por banhos com ácidos e ativadores para removerem graxas e resíduos superficiais e melhorarem a aderência da deposição. Na segunda etapa, os produtos passam por um processo de deposição de níquel, no qual a eletrólise deste metal faz um primeiro recobrimento, conferindo um acabamento superficial satisfatório, com uma resistência mecânica e também contra corrosão. Na terceira, um banho de enxágue com água retira os resíduos provenientes do revestimento de níquel evitando a contaminação da próxima operação. Na quarta etapa, é realizado o banho com a deposição do cromo, sendo um metal mais duro, nobre e caro, é utilizado para um melhor acabamento

superficial (mais brilhoso) e aumentar ainda mais a resistência mecânica das peças. Na quinta, um banho de enxágue final retira os resíduos da cromagem, disponibilizando as peças para secagem. Na sexta e última etapa, é realizado o controle de qualidade e embalagem. Após esta sequência, as peças estão prontas para serem enviadas aos clientes.

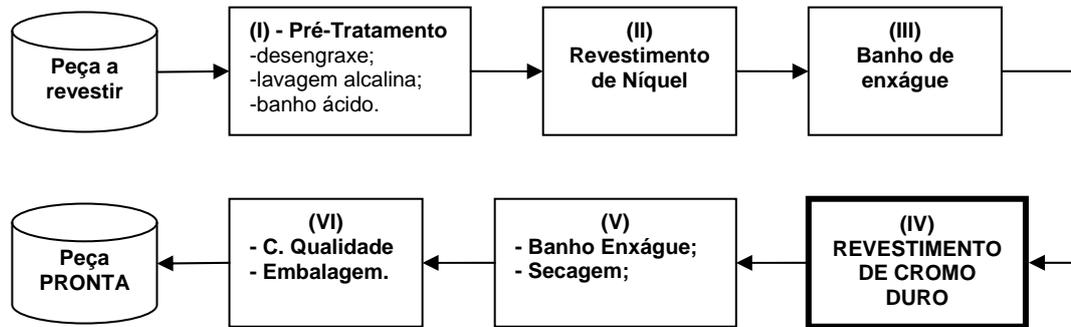


Figura 10 – Sequência do processo de revestimento
[Fonte – empresa estudada]

Por ser a parte que mais exige atenção dos responsáveis pela planta industrial, a quarta etapa foi utilizada para o desenvolvimento deste estudo. Devido ao curto tempo de cada carregamento (aproximadamente 30 segundos em deposição), os controles dos parâmetros desta parte do processo precisam ser monitorados para que não ocorram falhas gerando retrabalhos.

Caso haja necessidade de retrabalhar peças, o custo envolvido de matéria-prima é alto (a deposição deverá ser removida), além de todo o rejeito do processo, pelo fato de que os produtos químicos e metais utilizados precisam ser tratados de forma especial, em lagoas apropriadas para descarte. A empresa utiliza um tipo de cromo denominado de hexavalente, o qual permite melhorar o acabamento superficial, e, por conseguinte, a estética dos produtos. Porém, este produto é possuidor de maior grau de contaminação ambiental, existindo o envolvimento de custos ambientais e monetários.

Os produtos quando saem da etapa de recobrimento de níquel e após o banho de enxágue, aguardam em um estoque de processamento. São penduradas em suportes (gancheiras) para então serem mergulhadas na solução de ácido crômico (banho). As gancheiras são suspensas dentro do tanque pelo barramento de cobre por onde passa corrente elétrica (ver Figura 11). Após o carregamento completo do tanque, o retificador é acionado fazendo com que circule a corrente elétrica entre as peças a serem recobertas (catodos) e placas de chumbo (anodos). A circulação desta corrente no banho força a deposição do cromo. Atualmente o processo e seu controle são manuais.



Figura 11 – Tanque de Cromagem
[Fonte – empresa estudada]

Conforme levantamento realizado junto aos responsáveis pelo processo, o recobrimento de cromo é diretamente influenciado pela concentração, temperatura e pelo nível do banho. A composição do banho é de ácido crômico, um sal adquirido comercialmente, e diluído com água. Para concentrações abaixo de um limite especificado (218 g/cm^3) a deposição é deficiente ou necessita de um maior tempo das peças no banho circulando corrente elétrica (baixando a produtividade). Acima de um limite máximo (250 g/cm^3), a concentração provoca o surgimento de partes queimadas nos produtos. A concentração é monitorada por medições diárias de densidade do banho e é alterada adicionando-se solução concentrada de ácido crômico (soluto) ou água (solvente). A temperatura deve ser mantida em 40°C para que se possa melhorar a ativação da solução, bem como manter a densidade do banho em um patamar ideal de deposição, sendo tolerada uma variação entre 39°C e 43°C . A temperatura, atualmente, é controlada por um termostato acionando um banco de resistências. O nível do banho é mantido dentro de uma faixa de variação estreita. Abaixo do limite inferior (93 cm), o volume de líquido exigido para uma boa deposição na parte superior das peças pode ficar comprometida (parte superior da peça mergulhada a dez centímetros). Acima do limite superior (97 cm), além de disponibilizar um volume desnecessário de matéria-prima cara, facilita o transbordamento do tanque, seja pela agitação da manipulação das peças, na colocação ou na retirada das gancheiras. O nível é controlado de forma visual pelo encarregado do setor, o qual indica a necessidade de reposição do volume. Um laboratorista realiza a medição da densidade do banho e, indica uma proporção de reposição de soluto e solvente, de forma a manter a especificação.

A densidade de corrente é outro fator que pode interferir na qualidade da deposição. A sua variação pode estar ligada à capacidade e características técnicas do retificador, variações da rede de energia elétrica, pelos contatos elétricos entre as peças e as gancheiras e, entre

estas e os barramentos de cobre de fixação; além das geometrias e áreas das peças de cada carga. Devido à variabilidade estar ligada a questões operacionais, de manutenção e também da qualidade da mão de obra dos operadores, estes itens não foram incluídos na modelagem, sendo considerado como itens de variação inerentes ao processo.

A etapa de cromagem é composta por um tanque de polipropileno com 0,80m de largura, 3,00m de comprimento e 1,00m de altura. A alimentação de corrente contínua nos barramentos é fornecida por um retificador de até 12V, no qual o valor da corrente depende da área e geometria das peças, podendo atingir valores de até 1900 Ampéres. A operação de colocação e retirada das gancheiras com peças no tanque é realizada manualmente.

4.1.2 Modelagem matemática e definições de variáveis

As grandezas físicas e químicas, envolvidas no processo estudado, permitem que sejam obtidas equações diferenciais de primeira ordem, estabelecendo relações lineares entre as variáveis envolvidas. Com o andamento do processo, as variáveis assumem valores que variam em relação à evolução do tempo, permitindo sua análise dinâmica.

Visando obter a idealização do modelo físico, foram realizadas visitas à empresa para observação do processo, bem como entrevistas com os responsáveis, encarregados e operadores. A Figura 12 apresenta a idealização do modelo físico do tanque de cromagem correspondente à quarta etapa do processo pela Figura 10. Após a obtenção de informações de sua dinâmica de funcionamento pôde-se estabelecer as relações envolvidas. As equações obtidas são descritas na sequência.

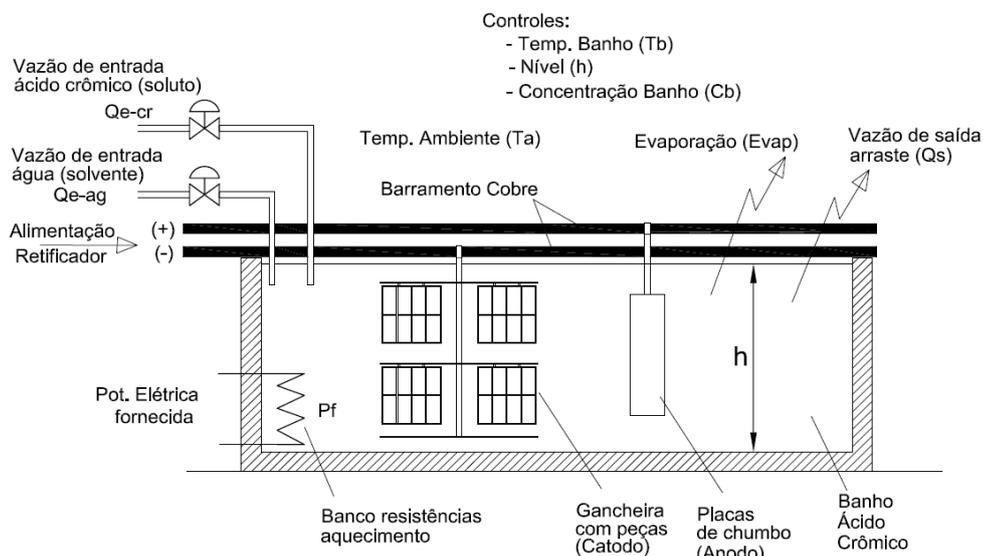


Figura 12 – Idealização do Modelo Físico do Processo
[Fonte – próprio autor]

4.1.2.1 Controle de temperatura

Para o bom desempenho do processo de recobrimento, a temperatura do banho deve ser mantida próxima a uma temperatura fixa (40°C). Este aquecimento é obtido através de bancos de resistências, sendo controlados através de sua alimentação elétrica.

A obtenção da equação que melhor representa a dinâmica desse sistema segue a Primeira Lei da Termodinâmica: A variação de energia interna de um sistema é igual a diferença entre o calor trocado com o meio externo e o trabalho por ele realizado durante uma transformação (conservação de energia) (SHAPIRO *et al*, 2005). A equação (32) representa o equilíbrio do sistema, levando em consideração as trocas térmicas identificadas no modelo físico. Já a expressão (33) apresenta esta relação na forma diferencial, relacionando diretamente as variáveis envolvidas, levando em consideração as transformações de unidades necessárias e substituições de relações físico-químicas pertinentes.

$$\Delta U = P + Ac - Pq - Pa \quad (32)$$

Em que, ΔU é a variação de energia do sistema; P é o calor fornecido ao sistema pelo banco de resistências de aquecimento mergulhadas no banho; Ac é o aquecimento proporcionado pela circulação da corrente no banho; Pq é o calor retirado em função das vazões de entrada e saída do banho; Pa corresponde às perdas para o ambiente, uma vez que o sistema não é isolado.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{14,33Pf}{\rho_e C_p V} + \left(\alpha + \frac{Q}{V} \right) T_a - \left(\alpha + \frac{Q}{V} \right) T_b + \frac{14,33Pc}{\rho_e C_p V} \quad (33)$$

Em que, $\frac{dT}{dt}$ é a variação incremental da temperatura no tempo [°C/min]; Pf é a potência fornecida pelo sistema de aquecimento [w]; T_a é a temperatura ambiente [°C]; T_b é a temperatura do banho [°C]; Pc é a potência fornecida pela passagem de corrente pelo banho [w]; Q é a vazão de reposição do banho na concentração recomendada [cm³/min]; α é a taxa média de variação da temperatura do banho em relação ambiente [1/min]; V é o volume do banho [cm³]; ρ_e é a massa específica do banho [g/cm³]; C_p é o calor específico do banho [cal/(g. °C)].

No desenvolvimento da equação (33) assumiu-se que o volume do banho será mantido constante e, neste caso, a vazão de entrada será igual à reposição da saída. Considerou-se

também que a reposição será controlada de forma a manter a concentração próxima à recomendada para o processo.

4.1.2.2 Controle da concentração

A quantidade de soluto (ácido crômico) dissolvido em uma quantidade de solvente (água) determina a concentração da solução. A concentração de uma solução é tanto maior quanto mais soluto estiver dissolvido em um mesmo volume de solvente. Pode ser determinada a partir de medições da densidade do banho. Desta forma, controlando-se a densidade do banho também se estará controlando a concentração do mesmo. Determinada a densidade, uma conversão determina a concentração da solução. No caso do processo avaliado, as medições de densidade são realizadas por instrumentos simples, obtendo-se leituras em graus Baumé ($^{\circ}\text{Bé}$) e convertidas para concentração (g/cm^3).

Considerando-se a convenção da massa específica da água como $1 \text{ g}/\text{cm}^3$, é possível adotar a massa específica dos componentes do banho como sendo numericamente igual à sua densidade. Desta forma, é possível utilizar as equações de balanço de massa para representar a dinâmica deste comportamento.

Não sendo uma reação do tipo endotérmica ou exotérmica, pode-se estabelecer uma relação de balanço global de massa, conforme equação (34) já na sua forma diferencial (GARCIA, 2005).

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho_e Q_e - \rho Q \quad (34)$$

No qual, ρ é a massa específica do banho; V é o volume do banho; ρ_e é a massa específica do fluido que entra; Q_e é a vazão de entrada do reservatório; Q é a vazão de saída do reservatório.

Com o desenvolvimento apresentado pela equação (34) e realizando as substituições pertinentes, obtém-se a equação (35) que representa o comportamento da concentração da composição do tanque.

$$\frac{d(\rho)}{dt} = \frac{\rho_{cr}}{V} Q_{Ecr} - \frac{\rho_a}{V} Q_{Ea} - \frac{\rho}{\rho_{padr\tilde{a}o-cr}} \frac{mdc}{V} + \frac{\rho_a}{V} Q_{Evap.A} \quad (35)$$

Quando então, ρ é a massa específica do banho [g/cm^3]; V é o volume do banho [cm^3]; ρ_{cr} é a massa específica do ácido crômico [g/cm^3]; ρ_a é a massa específica da água [g/cm^3];

$\rho_{\text{padrão-cr}}$ é a massa específica ideal para deposição do cromo [g/cm^3]; Q_{Ecr} é a vazão de entrada de cromo [cm^3/min]; Q_{Ea} é a vazão de entrada de água [cm^3/min]; $Q_{\text{Evap.A}}$ é a vazão de evaporação de água [cm^3/min]; mdc é a massa de cromo depositada [g/min].

Na obtenção da equação (35) algumas determinações foram feitas, tais como: o volume do tanque (V) é considerado constante; admitiu-se que a massa depositada é proporcional à concentração do banho inserido-se uma relação entre as massas específicas do banho e a ideal para a deposição do cromo. A vazão de saída causada pela movimentação das peças (arraste) não influencia na concentração, por retirar ambos os produtos diluídos, refletindo apenas em variações do nível.

A massa de cromo depositada nas peças (mdc) durante os banhos é obtida através da relação (36) cujos parâmetros são determinados conforme a especificação das peças. Como a produção não segue um padrão, a cada instante de simulação o mdc é recalculado.

$$mdc = \frac{EQ.i.A.t.RC}{6000} \quad (36)$$

Em que, EQ é o equivalente eletroquímico [g/Ah]; i é densidade de corrente que circula entre o banho e as peças [A/dm^2]; A é a área superficial depositada das peças [dm^2]; t é o tempo de deposição [min]; RC é o rendimento da corrente [%].

Para se determinar a densidade de líquidos, em sistemas automatizados, utilizam-se os instrumentos: densímetro ou um transdutor de densidade, medidores de condutividade elétrica e ultrassônicos. Por conversões e relações apresentadas na literatura, se podem obter as respectivas concentrações de matérias dissolvidas (SURTEC, 2009; BEGA *et al.*, 2006).

4.1.2.3 Controle de nível

O controle de nível busca mantê-lo entre os seus limites mínimo - menor volume tecnicamente aceitável sobre as peças para melhor eficiência de deposição - e máximo, limite que permita manipular as peças no tanque sem extravasar (desperdício de material e problemas de tratamento ambiental).

Admitindo-se o fluido como incompressível, quando as pressões envolvidas não ocasionam variações no volume do banho, a equação (37) pode ser utilizada para representar a dinâmica de processos envolvendo a capacitância fluídica de tanques (GARCIA, 2005).

$$Q = A \frac{dH}{dt} \quad (37)$$

Em que, Q é a vazão de entrada no reservatório; A é a área do reservatório; dH/dt é a variação incremental do nível no tempo.

Com o desenvolvimento (37), obtém-se a expressão (38) a qual relaciona as grandezas envolvidas no processo estudado. As reposições de ácido crômico e água devem atender também à prescrição do controle de concentração.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A} Q_{ECr} + \frac{1}{A} Q_{Ea} - \frac{1}{A} Q_{S_arraste} - \frac{1}{A} Q_{Evap.A} \quad (38)$$

Em que, dH/dt é a variação incremental do nível no tempo [cm/min]; Q_{ECr} é a vazão de reposição de ácido crômico [cm³/min]; Q_{Ea} é a vazão de reposição de água [cm³/min]; $Q_{S_arraste}$ é a vazão de saída do banho por arraste [cm³/min]; $Q_{Evap.A}$ é a vazão de evaporação de água [cm³/min]; A é a área do reservatório [cm²].

4.1.2.4 Variações inerentes ao processo

Na sequência, são descritas as considerações tomadas para identificar e gerar os comportamentos das variáveis responsáveis pelas variações naturais do processo. Sendo um ambiente agressivo (produtos químicos fortes) e, por isto controlado, os acessos e permanências no local para coleta de dados pormenorizada foram limitados, bem como medições de algumas variáveis foram dificultadas pela impossibilidade de acesso com equipamentos em operação.

Os dados do processo, inseridos na simulação, foram obtidos em visitas à empresa para observação do referido processo, entrevistas com os operadores e responsáveis pela planta industrial e por medições realizadas pelo próprio autor junto aos operadores. Algumas divergências foram percebidas nas informações repassadas, comprometendo o comportamento resultante desta etapa, o que refletiu na não reprodução da situação real. Para confirmar esses dados, principalmente nas medições de densidade, foi necessário coletar amostras do banho, as quais foram realizadas durante uma semana, em dois períodos (início e término da jornada de trabalho), sendo analisadas em laboratório externo à empresa. Em laboratório externo

também foram analisados a solubilidade (verificar a maior concentração possível a ser utilizada do ácido crômico) e estimativa de evaporação.

Para realização do estudo, foram coletados dados de variáveis e confirmações do processo, tais como: medições de corrente e tensão do barramento de cobre (saída do retificador), verificação das densidades de corrente, tempos dos banhos de cromagem (confirmação), verificação dos ciclos de operação.

4.1.2.4.1 *Temperatura ambiente*

Junto ao Instituto Ambiental do Paraná (IAPAR, 2010), foram obtidos os dados de temperaturas (máxima, mínima e média) diárias registradas no período de primeiro de janeiro a trinta de dezembro de dois mil e nove. Valores medidos em sua estação agrometeorológica, localizada em região próxima à empresa estudada.

A partir dos dados foram calculadas as Temperaturas médias semanais, com as quais foi possível obter uma distribuição de probabilidade Normal com os parâmetros de média igual 18,8°C e desvio-padrão 3,9°C, sendo o p-valor superior a 0,05. Os valores médios e os testes estatísticos pertinentes se encontram no apêndice A.

Empregou-se a distribuição Normal para a geração dos valores de temperatura média para cada uma das semanas simuladas. Com esta geração de dados, cada semana simulada terá um diferente nível médio de temperatura (o mesmo para toda a semana). Assim poderá ser verificada a atuação do controlador, em condições climáticas adversas, ao controlar a temperatura do banho. Desta forma, serão geradas semanas com temperaturas mais baixas, exigindo maior e mais rápida resposta do sistema de controle, e também temperaturas mais altas, com menor exigência de atuação.

Procurando atribuir um caráter mais realista, optou-se por procurar reproduzir variações aproximadas da temperatura ambiente ao longo do dia, internas ao barracão da empresa. Como esta grandeza física é altamente autocorrelacionada, desenvolveu-se a equação (39) buscando esta aproximação, gerando dados para cada minuto. Foi admitido que a temperatura diária oscila em torno de um valor médio semanal.

$$t_a = t_{m\u00e9dia} + A \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{C_H C_m} \cdot n_{\text{iteração}} + \pi\right) \quad (39)$$

Em que, t_a é a temperatura ambiente variando ao longo do dia (a cada minuto), no local de trabalho; $t_{média}$ é a temperatura média semanal gerada pela distribuição normal; A é a amplitude estimada para variação diária em função dos valores médios de temperatura máxima e mínima e quem estabelece a diferença de variação climática (ex. verão, inverno) é a geração do valor médio da Temperatura para cada semana (ver apêndice A); C_H conversão do período em frações de horas, correspondendo a 24 horas; C_m conversão de horas para minutos (valor = 60); $n_{iteração}$ sequência do ciclo iterativo utilizado na simulação.

Os ciclos de temperatura são reproduzidos em intervalos regulares, correspondendo o início do semiciclo negativo com o início do período de simulação ($t=1$, 19:00 de domingo). A geração dos valores de temperatura ambiente, aqui proposta, não teve a pretensão de ser um modelo que buscasse a reprodução fiel deste efeito climático, ou mesmo a finalidade de previsão. Almejou-se a obtenção de uma variação, criando situações que proporcionassem maiores exigências de atuação do sistema de controle, diferindo a cada semana simulada e em oscilações dentro dos dias avaliados.

4.1.2.4.2 Vazão de saída e evaporação

Como a empresa estudada não possui um registro formal das reposições diárias dos produtos para completar o nível, ou mesmo a concentração, em entrevista com os responsáveis por esta atividade foram buscadas as informações de como é realizado este procedimento. Pelo levantamento, não é possível realizar a distinção entre o que é removido pelo arraste das peças, quando da sua retirada do tanque após a cromagem, e a evaporação do tanque. A variação significativa que se teve conhecimento está relacionada ao tamanho das peças processadas (pequenas ou grandes). Variações de reposições diárias quanto ao ritmo de produção são sentidas, porém com impacto menor.

Como não se tem informações de como seria a reposição ao longo da jornada de trabalho, empregou-se a Distribuição Uniforme, conforme recomendado por Schwif e Medina (2006). Os valores diários de reposição foram estabelecidos junto aos operadores e responsáveis técnicos pela planta industrial. Valores de reposição diários (máximo e mínimo) foram estabelecidos conforme a classificação de peças quanto ao seu tamanho, considerando o ritmo normal (padrão) de produção. A vazão de reposição, em litros por dia, foi convertida para centímetros cúbicos por minuto.

Com relação à evaporação, foram realizados testes em laboratório para determinar uma taxa de evaporação do material do banho (ácido crômico) quando mantido à temperatura de trabalho (40°C). De posse deste dado, foram estabelecidas relações de proporções de área superficial e volume com o tanque real de trabalho. Estabeleceu-se uma taxa de evaporação média de 19,24 cm³/min, mantida constante ao longo do período de operação. Para tal, não se consideraram as variações de umidade relativa do ar (ambiente fechado) e de pressões na superfície da água e do ar em função da circulação de ventilação. Para o período em que o sistema de aquecimento está desligado (final de semana), sob orientação do profissional da área de química, estipulou-se uma taxa correspondente a um terço da estabelecida para o banho aquecido.

Para efeito de simulação, os valores de vazão de saída (arraste) são gerados com parâmetros, já descontada a parcela de evaporação, e considerados somente os períodos de produção. Estas variáveis (vazão de saída e evaporação) são consideradas independentes no modelo matemático. Para uma geração de dados mais precisa, adotou-se este procedimento, uma vez que a referência quantitativa obtida junto a empresa (ocorrência real) não as separa. Os valores apurados para a vazão de arraste após contextualização do desempenho do processo em um ritmo normal de produção e adotados na simulação encontram-se na Tabela 1. A descrição do comportamento do processo para estabelecer os valores de simulação encontra-se no apêndice B.

Tabela 1 – Vazão de arraste – ritmo normal de produção

Vazão de arraste	Peças Pequenas	Peças Grandes
Mínimo (cm ³ /min)	44,9	31
Máximo (cm ³ /min)	72,6	58,8

[Fonte – próprio autor]

4.1.2.4.3 *Aquecimento pela corrente de deposição*

O aquecimento do banho pela circulação da corrente de deposição, tem efeito no momento em que as peças são efetivamente processadas (cromadas). O seu valor está ligado diretamente ao tamanho das peças (área superficial), o qual determina o valor da corrente elétrica de deposição que circula no banho, com a respectiva tensão elétrica aplicada.

Devido ao local da instalação houve a dificuldade de se realizarem medições de corrente e tensão elétrica na saída do retificador. Com espaço limitado entre retificador e

tanque, bem como a sua proximidade com o banho altamente ácido, necessitava-se de equipamentos especiais de medições contínuas, apropriados ao ambiente agressivo, não disponíveis. Os tempos curtos dos banhos, quando o retificador opera, também foi um limitador.

Optou-se, então, por utilizar informações de projeto das peças da empresa. Estes dados foram confrontados com a realização de algumas medições em cada um dos tamanhos característicos de peças. Estes valores foram considerados coerentes com os resultados encontrados no processo. Não foi possível um número de medições que possibilitasse determinar, de forma confiável, uma Distribuição e Probabilidade que pudesse representar o comportamento desta variável. Assim, optou-se por utilizar a Distribuição Uniforme com os parâmetros estabelecidos com os responsáveis pelo processo.

Com os dados de tensão e corrente elétricas (provenientes do retificador), considerados no projeto do processo de deposição, foram determinadas as potências elétricas fornecidas durante cada banho de aproximadamente trinta segundos. Posteriormente, transformadas para potências médias para cada minuto. Os parâmetros utilizados para geração dos dados da simulação, para cada um dos tamanhos de peças, estão disponibilizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Aquecimento banho pela corrente de deposição – ritmo normal de produção

Vazão de arraste	Peças Pequenas	Peças Grandes
Mínimo (W)	5000	7000
Máximo (W)	8000	9500

[Fonte – próprio autor]

4.1.2.4.4 *Densidade de corrente*

A densidade de corrente é uma relação entre a corrente elétrica utilizada na galvanoplastia pela área superficial das peças a serem recobertas (Ampéres/dm²), influenciando na quantidade e qualidade da deposição. Quando do planejamento da entrada em produção de um produto novo, as gancheiras são projetadas para acomodar uma quantidade de peças, procurando equilibrar esta relação. Isso evita ajustes no retificador a cada banho. Apesar do planejamento realizado, variações ocorrem devido a: oscilações da rede de energia elétrica, contatos elétricos entre gancheiras e barramento de cobre de sustentação e circulação de corrente, contatos elétricos entre as peças e a própria gancheira,

dificuldade de equilibrar a área total do banho em relação às áreas individuais das peças, dentre outros motivos.

Em função do grande número de situações que influenciam nesta variável, sua variação é elevada. Os próprios responsáveis técnicos pelo processo encontram dificuldades em estabelecer um padrão de comportamento, não sendo possível realizar medições diretas, apenas estimativas. Pela experiência de seus operadores, a empresa definiu empiricamente os limites (máximo e mínimo) passíveis de ocorrerem nos banhos, os quais são utilizados como base para o dimensionamento de seus projetos.

A Distribuição Uniforme foi escolhida devido à falta de maiores informações, sobre o comportamento desta variável, e disponibilidade de dados. Os parâmetros estimados pelos projetistas, quando do planejamento das cargas dos banhos, foram utilizados na simulação para geração dos dados de densidade de correntes conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Densidade de Corrente

Densidade de Corrente	Parâmetros
Mínimo (A/dm²)	20
Máximo (A/dm²)	40

[Fonte – próprio autor]

4.1.2.4.5 Área de peças depositada por banho

Na etapa de cromagem, a área superficial das peças depositadas além de influenciar outras variáveis, está diretamente ligada à quantidade de material depositado, retirado da solução dissolvida no banho e, com isso, na densidade (concentração) do mesmo.

No sistema de produção, as peças são diversificadas, classificadas como pequenas e grandes. Dentro destes agrupamentos existe uma grande variedade de formatos e ainda variações de área superficial. Nas etapas de produção, as gancheiras passam na sequência de banhos sendo que a ordem destas, pode ser alterada, do trajeto do início até a chegada ao banho de cromo.

Como não se constatou um padrão de repetição, durante o período de produção os mais variados formatos de peças são cromados, optou-se pela geração dos dados através da distribuição Uniforme. Com o auxílio dos responsáveis pelo planejamento e controle da produção do processo estudado, estabeleceram-se os parâmetros mínimos e máximos

apresentados na Tabela 4. Considerou-se o carregamento dos banhos em ritmo normal de produção.

Tabela 4 – Área de peças depositada por banho – ritmo normal de produção

Parâmetro	Peças Pequenas	Peças Grandes
Mínimo (dm ²)	80	91
Máximo (dm ²)	90	100

[Fonte – próprio autor]

4.1.2.4.6 Valores iniciais

Para iniciar a simulação, existe a necessidade de se determinarem valores iniciais para as variáveis controladas (monitoradas) do processo. Como se estipulou o início da simulação em período anterior ao da produção efetiva, ver subseção 4.1.3 subsequente, o controlador possui tempo hábil para realizar correções necessárias para que essas variáveis estejam dentro das suas especificações, no início da jornada de produção.

Devido à influência constante do controlador, optou-se por iniciar a simulação com as variáveis controladas em seus valores-alvo, exceto a variável Temperatura do banho que se encontra à temperatura média semanal (gerada a cada repetição). Os valores de inicialização ($t=1$) de cada uma das variáveis controladas (monitoradas) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores Iniciais – Variáveis Controladas

Variável Controlada	Temp. Banho - Tb (°C)	Nível Banho -H (cm)	Densidade - ρ (g/cm ³)
Valor inicial ($t = 0$)	Temp. média semanal gerada	95	1,161

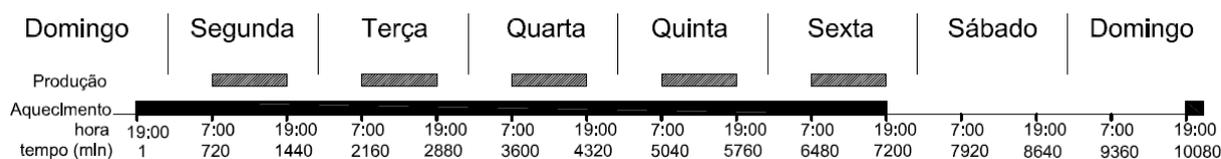
[Fonte – próprio autor]

As variáveis responsáveis pelas variações naturais do processo são geradas a partir do início da jornada de trabalho, ou de forma contínua ao longo do período simulado, conforme sua influência na reprodução da realidade. Os comportamentos estão descritos nas subseções anteriores.

4.1.3 Validação do modelo matemático

Visando a validação do modelo matemático buscou-se comprovar a proximidade do modelo ao processo real. Inicialmente, as equações foram implementadas na linguagem de

programação MatLab. Sua dinâmica foi testada e os comportamentos das variáveis avaliados. Com a comparação com o processo real percebeu-se a necessidade de ajustes, principalmente a adição de variáveis responsáveis por variações naturais no processo (exemplificando, massa depositada e variação da temperatura em relação ao ambiente), os quais foram gradativamente inseridos. Visando facilitar o entendimento, comparações e também pelos tempos envolvidos no processo de cromagem, o período considerado na simulação de teste foi o de uma semana típica de trabalho, com a unidade de tempo em minutos, ver Figura 13. O período inicia no domingo às 19:00 ($t=1$) com o acionamento do sistema de aquecimento do banho e encerra o ciclo no domingo 19:00 ($t=10080$). O período diário típico de produção é de 12 horas (7:00 às 19:00), sendo que na sexta-feira ($t=7200$) é desligado o sistema de aquecimento com o encerramento da produção. Após este período o banho fica em repouso onde o sistema de aquecimento permanece desligado até o próximo reinício, porém o controle de nível e densidade continuam ativos.



Nas Figuras 14 a 16, é apresentada a simulação de uma semana típica na qual os comportamentos das três variáveis controladas (monitoradas) do banho, (temperatura, densidade e nível) podem ser verificadas. Para estabelecer o comportamento apresentado, o controlador está em operação e, com isso, pode-se perceber que os ciclos dos períodos de produção, e fora de produção, se repetem ao longo da semana. Na simulação, os valores das variáveis respeitam a ocorrência de situações operacionais ligadas aos períodos de operação e fora de operação do processo (exemplificando, vazão de arraste, contribuição de aquecimento do banho pela circulação de corrente, massa depositada e área das peças, além de outras). Ações naturais também foram recriadas como a evaporação e oscilações da temperatura ambiente.

Na Figura 14, percebe-se que a temperatura, inicialmente, encontra-se em um valor baixo (ambiente) e é elevada à condição de trabalho. Ao final dos ciclos de produção, após o instante 7200, inicia-se o resfriamento do tanque que passa a variar sua temperatura apenas em função da temperatura ambiente.

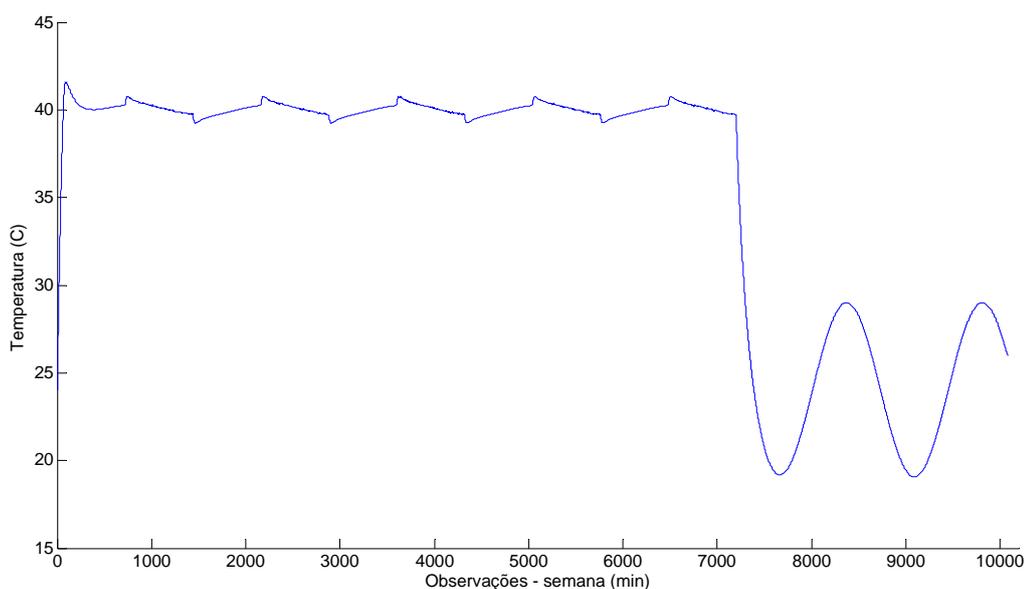


Figura 14 – Comportamento da variável controlada Temperatura
[Fonte – próprio autor]

Nas Figuras 15 e 16, também estão reproduzidas as alternâncias entre os períodos da semana para as variáveis: Densidade e Nível. Pode ser verificado que, nos períodos fora de produção, o sistema de controle continua em operação visando manter o sistema em condições para a próxima jornada produtiva. Após o encerramento da jornada de produção semanal, a densidade aumenta devido à evaporação da água, e o nível é corrigido em pequena quantidade, também em função da evaporação, procurando aproximar o valor-alvo (95 cm).

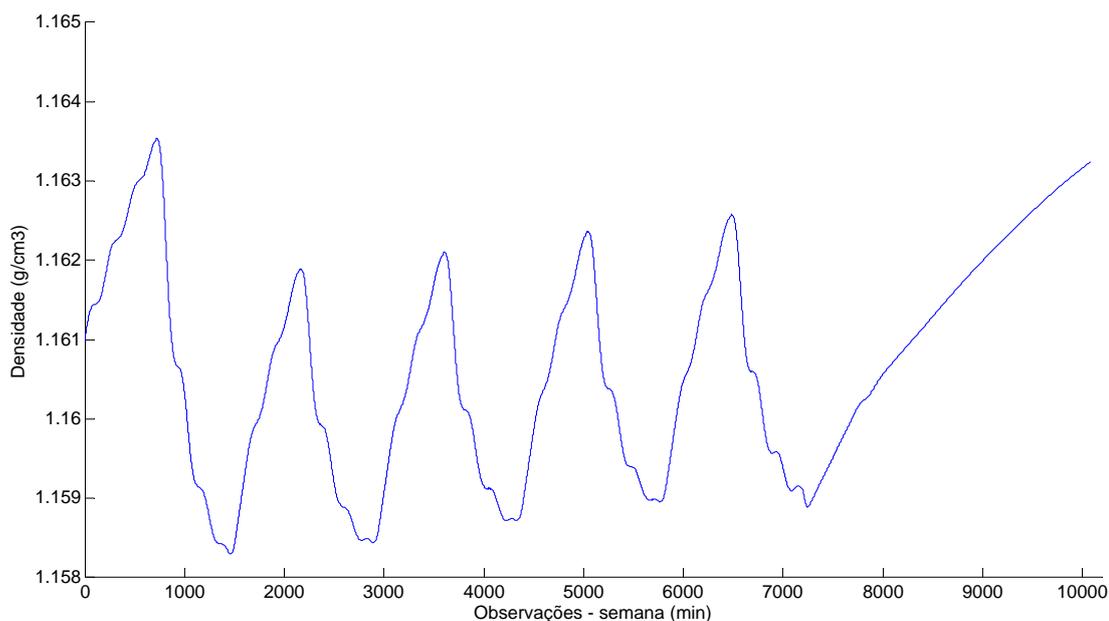


Figura 15 - Comportamento da variável controlada Densidade
[Fonte – próprio autor]

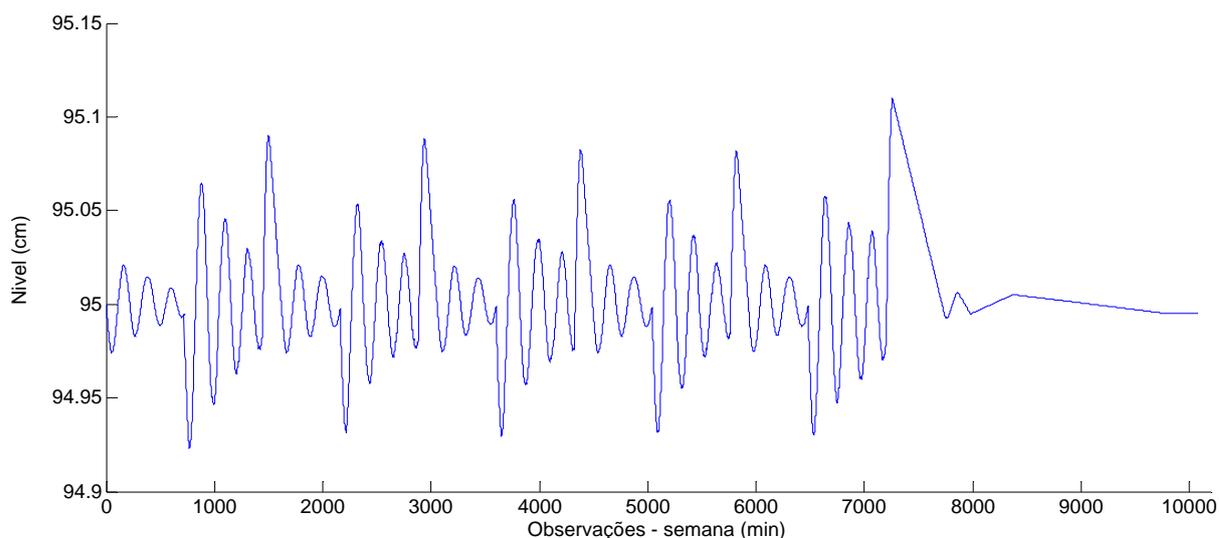


Figura 16 – Comportamento da variável controlada Nível
[Fonte – próprio autor]

A utilização de um processo real, como base, facilitou a obtenção e validação do modelo matemático que pode ser constantemente comparado com a sua operação real. O modelo matemático pode ser sintetizado nas equações de espaço de estados, em sua forma matricial, em que a equação de estado do sistema é representada em (40) e o vetor de saída em (41). As Variáveis Controladas são: Temperatura do Banho (T_b), Nível do Banho (H) e Densidade do Banho (ρ). As Variáveis Manipuladas são: Potência Fornecida às Resistências (P_f), Vazão de Entrada de Cromo (Q_{ECR}) e Vazão de Entrada de Água (Q_{Ea}). As variáveis responsáveis pelas variações naturais inerentes ao processo são: Temperatura Ambiente (T_a), Potência de Aquecimento em função da Corrente (P_C), Vazão de Saída de Arraste das Peças

($Q_{s_arraste}$), Vazão de Evaporação Água ($Q_{Evap. A}$) e massa depositada (mdc) através de variações da Densidade de Corrente e da Área das Peças dos Banhos.

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_b \\ \dot{H} \\ \dot{\rho} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\left(-\alpha - \frac{Q_e}{V} \right) + 1 \right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(-\frac{mdc}{V\rho_{padrão-cr}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_b \\ H \\ \rho \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (14,33 / (\rho_e C_p V)) & 0 & 0 \\ 0 & 1/A & 1/A \\ 0 & \rho_{cr}/V & -\rho_a/V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pf \\ Q_{ECR} \\ Q_{Ea} \end{bmatrix} + \dots$$

$$\dots + \begin{bmatrix} \left(\alpha + \frac{Q_e}{V} \right) & (14,33 / (\rho_e C_p V)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/A & -1/A \\ 0 & 0 & 0 & \rho_a/V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ P_c \\ Q_{s_arraste} \\ Q_{Evap. A} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} T_b \\ H \\ \rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_b \\ H \\ \rho \end{bmatrix} \quad (41)$$

4.1.4 Projeto do controlador e estratégia de controle e parametrização

Como especificação do sistema de controle de engenharia a ser implementado, este deve ser capaz de controlar, em tempo hábil, desvios das variáveis controladas. Estas devem ser conduzidas e mantidas próximas aos seus valores-alvo através da manipulação de outras, permanecendo dentro da sua especificação. Estipulou-se, com os responsáveis pelo processo, que o sistema não deverá permitir uma ultrapassagem percentual de seus valores-alvo (dentro ou fora do período de produção) em 10% para a temperatura (44°C), 4% para o nível (98,80 cm) e 1% para a densidade (1,172). O tempo de acomodação, no início do processo (semana), as variáveis não deverão ultrapassar 300 minutos, mesmo fora dos períodos de produção. Nos períodos de produção, os limites máximos e mínimos das variáveis não devem ser violados. Os tempos de pico e de subida não foram considerados relevantes para o controlador deste processo, uma vez que o mesmo entra em operação em período bem anterior ao de produção. Com isso, os parâmetros do banho de cromagem devem ser mantidos em condições que não afetem a deposição, mantendo assim, a qualidade dos produtos.

As variáveis do processo, que são consideradas críticas, foram identificadas quando da elaboração do modelo matemático (subseção 4.1.2). As variáveis a serem controladas serão:

Temperatura (T_b), Densidade (ρ) e Nível (H). Controlando-se a Densidade estará sendo controlada, diretamente, a Concentração do banho de cromagem.

As variáveis controladas possuem limites de operação determinadas pelo processo, bem como valores-alvo a serem buscados. Estes valores e tolerâncias absolutas admissíveis (limites de especificação), obtidos junto aos operadores e responsáveis pelo processo são apresentados na Tabela 6. A Temperatura, em função da ativação do banho possui especificações assimétricas em relação ao Alvo estabelecido.

Salienta-se que os limites de especificação, estabelecidos para o processo, não relacionam-se diretamente com os limites de controle das cartas, a serem determinados posteriormente. Os limites de controle são definidos em função da variabilidade natural do processo, tomando-se por base o seu desvio-padrão. Estando o mesmo sob controle estatístico, as ferramentas de análise de capacidade podem ser úteis para comparar a variabilidade própria do processo com as suas exigências ou especificações estabelecidas (MONTGOMERY, 2004).

Tabela 6 – Valores limites de especificação das variáveis controladas

<i>Variáveis Controladas</i>	<i>Valor-Alvo</i>	<i>Valor Mínimo</i>	<i>Valor Máximo</i>	<i>Tolerância (absoluto)</i>
Temperatura (C°)	40	39	43	+/-0,1
Densidade (g/cm ³)	1,161	1,152	1,174	+/- 0,001
Nível (cm)	95	93	97	+/- 0,1

[Fonte – próprio autor]

Avaliando o processo tomado como base, pode-se determinar a Variáveis Manipuladas que possibilitam manter o controle do sistema. Assim, a Temperatura do Banho (T_b) poderá ser controlada manipulando-se a potência elétrica fornecida ao banco de resistências (Pf) . Um sensor de temperatura, do tipo termo-resistência (PT100), realiza a leitura e a informa ao controlador. Com o atuador no controle de Temperatura, é necessária uma fonte de alimentação controlada na qual a potência é fornecida por meio do chaveamento da sua forma de onda enviada às resistências de aquecimento. Conforme a necessidade é acionada gradativamente ou não, devendo possuir um comportamento linear.

A Concentração do banho, por sua vez, seguindo o comportamento da Densidade (ρ), é controlada pela manipulação da reposição de soluto (ácido crômico concentrado - Q_{ECR}) ou de solvente (água - Q_{Ea}). No momento da reposição, um sensor de densidade (densímetro), fixado junto ao tanque, monitora continuamente o banho e informa, ao controlador, a sua medição. Estando os componentes armazenados em reservatórios apropriados, o controlador

aciona os atuadores informando a vazão que deverá ser liberada de cada um desses reservatórios (Q_{ECR} , Q_{Ea}). Os atuadores são bombas dosadoras que proporcionam a injeção dos fluidos nas quantidades determinadas.

O Nível do banho (H) também é controlado através da reposição de ácido crômico concentrado e água. Como sensor, é empregado um relé de nível e seus respectivos eletrodos (inox) apropriados para serem mergulhados em soluções de PH baixo. Esta medição, realizada constantemente, é processada pelo controlador que aciona as bombas dosadoras. A ação de reposição para o controle de nível deve ser compatível com a do controle de densidade.

Como no estudo em questão é empregada a ferramenta de simulação, não foi necessário especificar os sensores e atuadores. Ateve-se somente à verificação, se as solicitações informadas pelo sistema de controle são compatíveis com elementos disponibilizados comercialmente, verificando-se sua compatibilidade e disponibilidade para viabilizar uma possível implementação. No caso dos sensores, os valores de saída são obtidos diretamente da simulação, não necessitando serem efetivamente medidos. Para efeito de maior realismo, foram considerados ajustes nas grandezas medidas, arredondamentos de valores, reproduzindo as limitações dos sensores existentes no mercado. Para os sensores de temperatura e nível, considerou-se a ordem de grandeza de duas casas decimais e para o de densidade quatro casas.

Algumas configurações de controladores foram avaliadas. Pelas suas características técnicas como tempo de resposta e dificuldades de ajustes e complexidade, foram sendo descartadas, seguindo-se o processo iterativo descrito na parte metodológica (subseção 3.1.4). Chegou-se ao controlador proporcional, integral e derivativo (PID) o qual é um dos sistemas mais utilizados na indústria atual (OGATA, 2003; DORF e BISHOP, 2001).

Na Figura 17, é apresentada a arquitetura do controlador adotado. É possível observar as variáveis envolvidas como as de: controle, manipulação, processo, erros, ajustes e referências. Cada variável controlada possui seu valor-alvo (T_{ref} , H_{ref} , ρ_{ref}) e, em função da realimentação do valor de saída provenientes dos sensores, são calculados os erros (e_t , e_h , e_ρ), fazendo com que o controlador determine uma ação de ajuste (U_t , U_h , U_ρ). No controle de Temperatura esta ação é enviada diretamente para o atuador para que seja manipulada a potência da resistência elétrica, alterando o aquecimento (Pf). No caso dos controles de Nível e Densidade, as ações são enviadas para um módulo (M) que compatibiliza estes sinais através de uma estratégia de controle, uma vez que são manipuladas variáveis comuns a estes ajustes. Do módulo M, são fornecidos sinais de comando compatíveis com os atuadores de vazão de ácido crômico concentrado ($U_{Q_{ECr}}$) e água ($U_{Q_{Ea}}$). Com estas informações, os

atuadores injetam a quantidade (vazão) de cada um destes componentes nas proporções necessárias (Q_{Ea} , Q_{ECr}). Com resultado na saída do processo, têm-se as variáveis controladas (e também monitoradas pelas cartas de controle) de Temperatura (T_b), Densidade (ρ) e Nível (H).

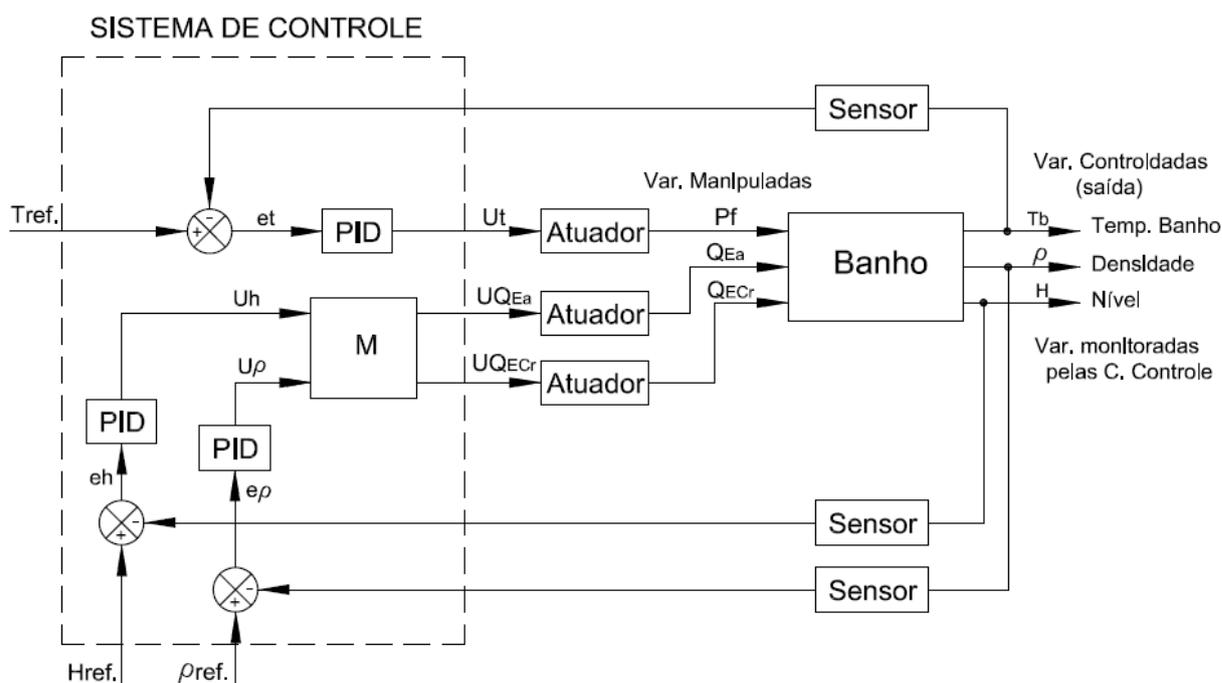


Figura 17 – Arquitetura do Controlador
[Fonte – próprio autor]

O módulo M, apresentado na Figura 17 com seu equacionamento, estabelece a estratégia de controle que compatibiliza as determinações dos controladores de nível (U_h) e de densidade (U_ρ), com os ajustes de vazão de água (UQ_{Ea}) e de cromo (UQ_{ECr}) a serem enviadas aos respectivos atuadores. Na equação (42), é estabelecida a necessidade em relação à ação do nível e em (43) em relação à densidade.

$$U_h = UQ_{ECr} + UQ_{Ea} \quad (42)$$

Na qual, U_h é a ação de ajuste determinado pelo controle de nível; UQ_{ECr} é a ação requerida para a reposição de ácido crômico; UQ_{Ea} é a ação requerida para a reposição de água.

$$\alpha UQ_{ECr} = K^{U\rho} UQ_{Ea} \quad (43)$$

Em que, $U\rho$ é a ação de ajuste determinado pelo controle de densidade; UQ_{ECr} é a ação requerida para a reposição ácido crômico; UQ_{Ea} é a ação requerida para a reposição de água; α é uma constante de proporcionalidade entre UQ_{ECr} e UQ_{Ea} em reposição de densidade normal ($U\rho=0$); K é uma constante de projeto, definida por ocasião da simulação ($K>1$), a qual visa compatibilizar as duas ações de controle em termos de grandezas.

Desenvolvendo as equações (42) e (43), determinam-se as a ações a serem aplicadas a cada atuador, conforme as relações (44) e (45).

$$UQ_{Ea} = \frac{Uh}{\left(\frac{K^{U\rho}}{\alpha} + 1\right)} \quad (44)$$

Em que, UQ_{Ea} é a ação requerida para a reposição de água; Uh é a ação de ajuste determinado pelo controle de nível; $U\rho$ é a ação de ajuste determinado pelo controle de densidade; α é uma constante de proporcionalidade entre UQ_{ECr} e UQ_{Ea} em reposição de densidade normal ($U\rho=0$); K é uma constante de projeto definida por ocasião da simulação, conforme definido anteriormente.

$$UQ_{ECr} = Uh - \frac{Uh}{\left(\frac{K^{U\rho}}{\alpha} + 1\right)} \quad (45)$$

Na qual, UQ_{ECr} é a ação requerida para a reposição de ácido crômico; Uh é a ação de ajuste determinado pelo controle de nível; $U\rho$ é a ação de ajuste determinado pelo controle de densidade; α é uma constante de proporcionalidade entre UQ_{ECr} e UQ_{Ea} em reposição de densidade normal ($U\rho=0$); K é uma constante de projeto definida por ocasião da simulação, conforme estabelecido anteriormente.

O sistema de controle proposto possui alguns parâmetros a serem ajustados denominados de ganhos, ou constantes de proporcionalidade. Estes parâmetros permitem alterar o comportamento da forma de controle, alterando o seu desempenho. O controle proporcional atua na resposta transitória do sistema de forma a diminuir o tempo de subida, diminuindo adicionalmente o erro de regime permanente. O controlador integral elimina o erro de regime permanente, mas pode piorar a resposta transitória do sistema. A ação

derivativa tem o efeito de aumentar a estabilidade do sistema, reduzindo o sobre-sinal, e melhorando a resposta transitória.

A determinação dos ganhos deve atender: o processo sob controle deve sempre ficar estável; o seu desempenho atender às especificações estabelecidas. O controlador PID necessita ser sintonizado, o que significa encontrar valores numéricos para as constantes de proporcionalidade de forma a regular o processo com estabilidade e com o desempenho satisfatório estabelecido.

Como foram propostos controladores PID para cada uma das variáveis controladas, é necessário especificar três ganhos para cada uma delas: ganho proporcional (K_p); ganho integral (K_i); ganho derivativo (K_d). Estes ganhos determinam as leis de controle dos controladores PID's conforme equação (25), apresentada na subseção 2.2.2.

Implementou-se, no pacote computacional MATLAB, o modelo matemático desenvolvido do processo, bem como o sistema de controle e suas leis. Assim, os ganhos puderam ser ajustados (sintonizados) de forma a minimizar o tempo de recuperação e a reduzir os valores de ultrapassagem, mantendo as variáveis o mais próximo de seus valores nominais, buscando a estabilidade do sistema. Para sintonia dos controladores, tomou-se por base o método de Ziegler e Nichols apresentado em Ogata (2003) e Cominos e Munro (2002).

Basicamente, o método de sintonia de Ziegler e Nichols, consiste inicialmente em utilizar somente a ação de controle proporcional, onde o seu ganho (K_p) é alterado de 0 até um valor crítico (K_{cr}), no qual a variável de saída exibe uma oscilação sustentada. O valor de K_{cr} e o respectivo período crítico da oscilação (P_{cr}) são determinados experimentalmente. Os ganhos, propriamente ditos, são especificados em função destas duas variáveis.

Determinados os ganhos, foram necessárias correções posteriores para um ajuste mais preciso dos mesmos. Dorf e Bishop (2001) mencionam que, para os ajustes dos parâmetros dos controladores PID's, existe a proposição de vários métodos e regras. Mesmo assim, podem não conduzir diretamente ao desempenho desejado, necessitando de correções por parte do projetista. Algumas regras práticas sugeridas por Spandri (2003), para os controles de temperatura e nível, também foram seguidas.

Utilizando-se os métodos de sintonia e ajustes do projetista, a aferição dos ganhos foi verificada com relação ao desempenho do controlador, em atender às especificações estabelecidas no início desta subseção (4.1.4). Assim, os ganhos são registrados para serem utilizados nos módulos 2 e 3 subsequentes. A Tabela 7 relaciona os ganhos (adimensionais) de cada um dos controladores.

Tabela 7 – Ganhos do Sistema de Controle

Controle PID	Ganho Proporcional (K_p)	Ganho Integral (K_i)	Ganho Derivativo (K_d)
Temperatura (T_b)	10000	100	5
Nível (H)	80	20	5
Densidade (τ)	20000	5	350

[Fonte – próprio autor]

Em conjunto com um profissional do ramo da química, consultor da empresa estudada, foi também determinada a constante de proporcionalidade (α) entre UQ_{ECr} e UQ_{Ea} estabelecendo a reposição do ácido crômico e da água, quando a densidade encontra-se sob controle ($U\rho=0$). Esta constante teve o seu valor determinado em 3,3478, valor este a ser mantido em todas as simulações.

A constante de projeto (K), compatibilizando as ações de controle, equação (43), teve o seu valor ajustado e verificado por meio de diversas simulações do processo gerenciado pelos controladores. Os resultados foram apresentados e validados junto ao especialista da área de engenharia de controle e automação quando foram analisados os comportamentos das vazões de cromo e água. Esta constante que necessitava ter o seu valor maior que um, foi determinada em 1,01 (um e um centésimo), o que manteve a estabilidade dos ajustes em função da variação da ordem de grandeza existente entre as duas variáveis envolvidas. As vazões de entrada de ácido crômico e de água de uma semana típica podem ser vistas na Figura 18.

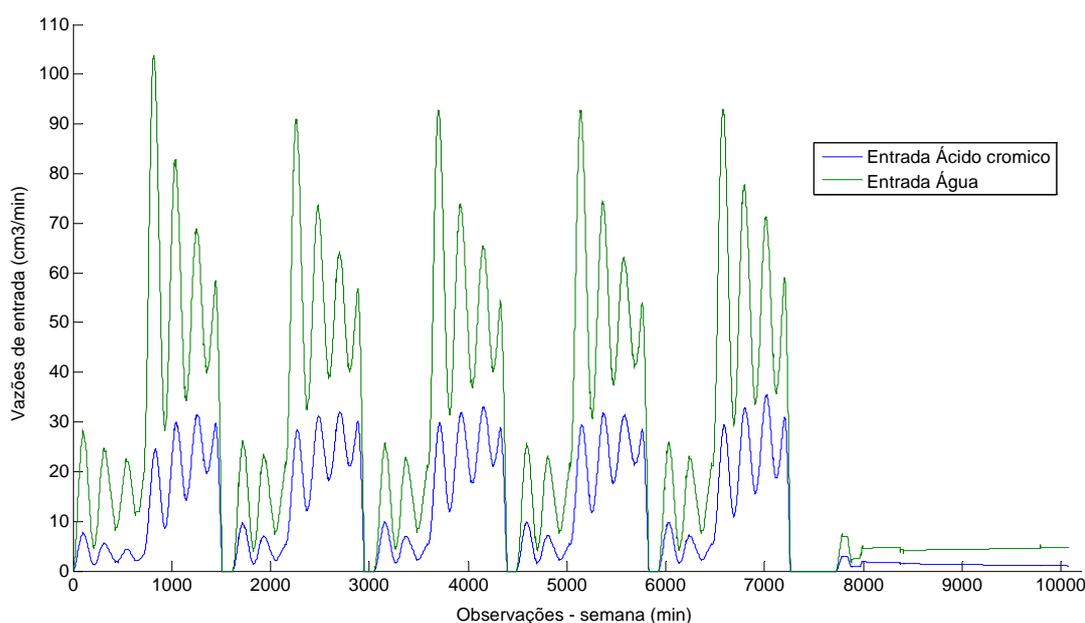


Figura 18 – Variáveis Manipuladas -Vazão de entrada de ácido crômico e água – semana típica
[Fonte – próprio autor]

Pode-se notar na Figura 18 que, mesmo nos períodos fora de produção (noite), o sistema manipula estas variáveis. Desta forma, ajustes são realizados para aproximar o nível ao seu valor-alvo, bem como repor a evaporação de água que continua ocorrendo. Após o instante 7200, o sistema encontra-se estável somente realizando compensações em função da evaporação.

Os erros instantâneos (a cada minuto) das variáveis controladas Nível e Densidade podem ser vistas na Figura 19. Estes erros são computados entre os respectivos valores de referência e os apurados pelos sensores, ao final do instante, analisados.

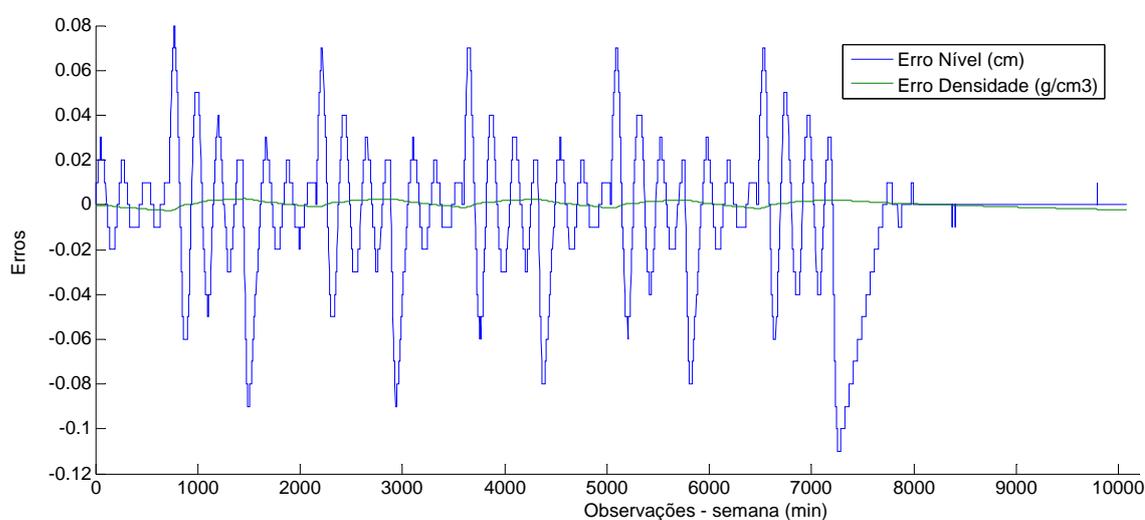


Figura 19 – Erros instantâneos do Nível e Densidade – semana típica
[Fonte – próprio autor]

A variável manipulada Pf tem o seu comportamento, de uma semana típica de operação, apresentado na Figura 20. Neste caso específico, a variável manipulada Pf corresponde diretamente à ação, proporcional integral e derivativa do respectivo controlador. Apesar do sistema de aquecimento encerrar sua atividade com o final da produção semanal ($t=7200$), os erros continuam sendo computados pelo controlador, indicando suas possíveis ações que seriam informadas ao sistema para continuar a manipulação.

As ações do sistema de controle, para as variáveis: Nível e Densidade, podem ser observadas nas Figuras 21 e 22. Estas ações correspondem aos valores determinados com os erros apurados e os respectivos ganhos especificados. O controle de nível (UPID), Figura 21, é fortemente influenciado pela sua componente integral (UI), tanto que seu comportamento se confunde com esta ação em particular, em quase todo o período analisado. Nota-se um padrão de repetição diário, que os ajustes dos parâmetros realizados conseguiram estabelecer.

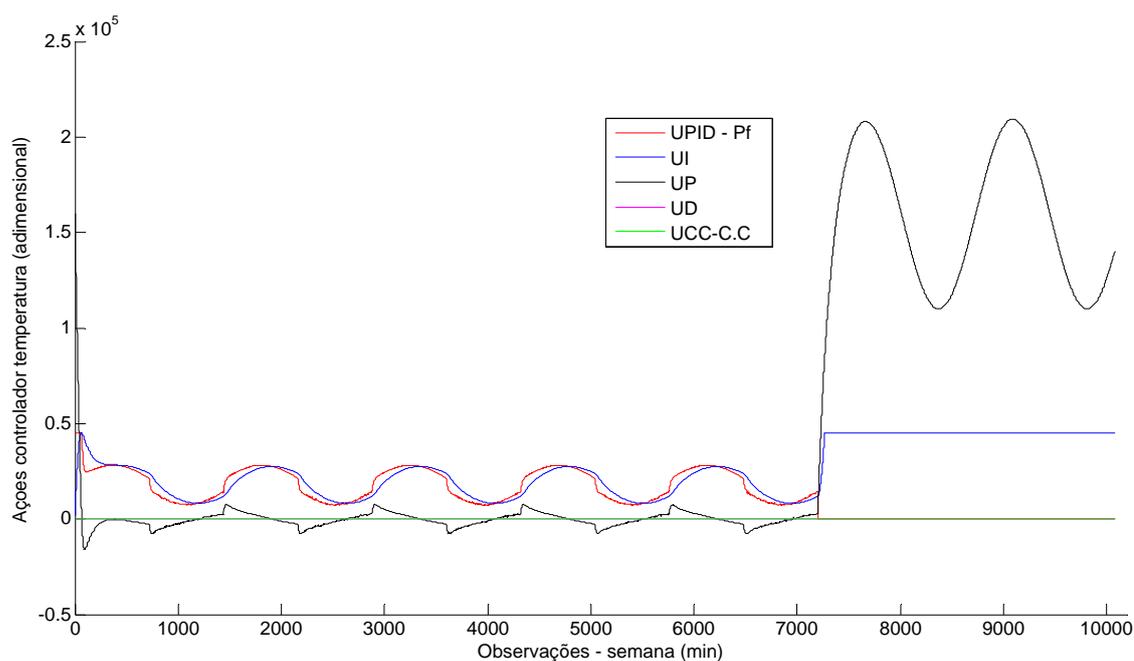


Figura 20 - Variável Manipulada Pf e Ações do Controlador de Temperatura – semana típica
[Fonte – próprio autor]

Pela Figura 22, percebe-se que o controle de densidade sofre a influência forte das componentes proporcional (UP) e integral (UI). Pode-se notar que estas influências não têm um comportamento padrão, variando ao longo da semana, conforme é exigida a sua atuação.

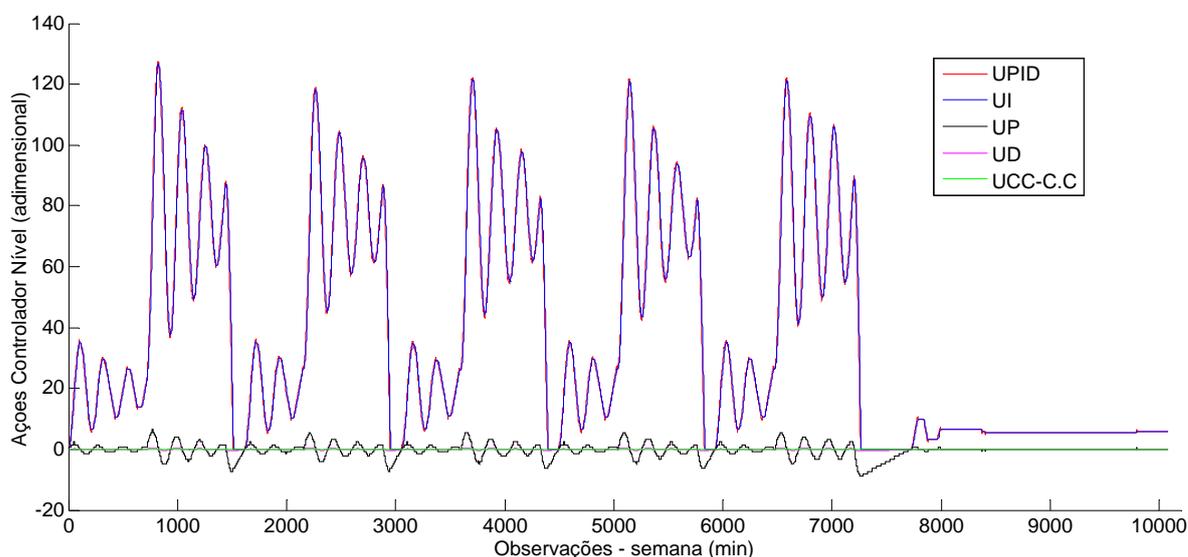


Figura 21 - Ações do Controlador de Nível – semana típica
[Fonte – próprio autor]

Os resultados, anteriormente apresentados nas Figuras 14 a 16 (subseção 4.1.3), além de permitir comprovar a adequação do modelo matemático, podem também verificar o grau de ajuste dos parâmetros do processo, uma vez que foram obtidos utilizando-se os controladores propostos devidamente sintonizados. Através destas mesmas Figuras 14 a 16, é

possível averiguar que os tempos de acomodação e os valores de ultrapassagem percentual atenderam ao especificado anteriormente (parte inicial desta mesma subsecção).

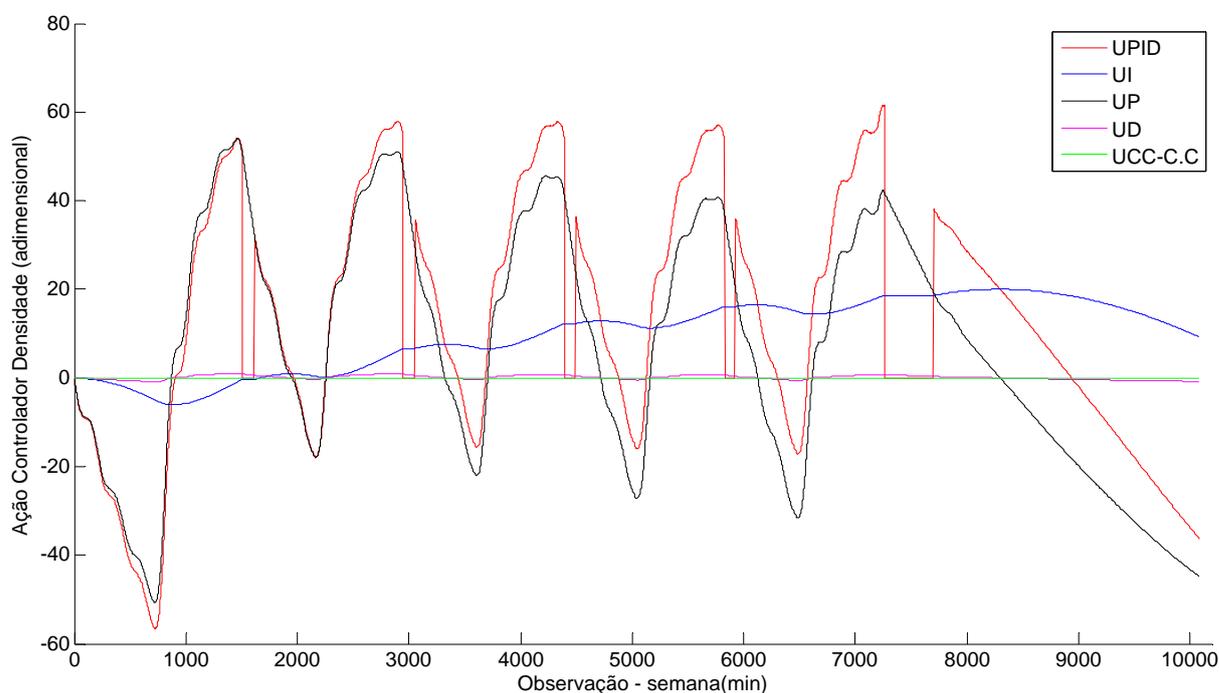


Figura 22 - Ações do Controlador de Densidade – semana típica
[Fonte – próprio autor]

Atendendo à recomendação de Spandri (2003), foi necessário ajustar a forma de calcularem-se os erros para a determinação da ação derivativa dos controladores, evitando ações bruscas, deixando o sistema muito sensível e até mesmo instável. Para isso, ao invés de utilizar as diferenças dos erros de observações consecutivas, optou-se em utilizar a média móvel dos últimos dez erros, valor que proporciona melhor atenuação, suavizando esta ação (SPANDRI, 2003). Outra medida tomada consistiu na limitação do cálculo da ação integral do controlador de temperatura, quando a mesma suplantara a limitação do sistema disponível. Esta restrição denominada de *anti-windup* evita ações retardadas da ação de controle que possam causar oscilações e instabilidades.

Ações, visando reproduzir as situações operacionais do processo, também foram tomadas: limitação da potência disponível dos bancos de resistência de aquecimento em 45 KW, bloqueio das ações de controlador quanto à retirada de líquido e resfriamento do tanque (ações não disponíveis no processo, somente durante as operações normais ou naturais) e limitação do volume de reposição, tanto de água quanto de ácido crômico concentrado, em 500 cm³/min (limitação bombas dosadoras).

O sistema de controle foi verificado quanto ao seu desempenho. O mesmo foi submetido, durante a fase de ajustes, a perturbações externas de vários níveis (variáveis de

distúrbio). Na presença destas alterações, o sistema foi capaz de manter-se próximo aos seus valores-alvo. A sua resposta foi condizente com as especificações e os sinais enviados aos atuadores considerados possíveis de serem executados para a regulação do processo, apresentando um bom comportamento em relação às interferências. Conseguiu-se recuperar, convergindo em direção aos seus valores-alvo, mantendo-se dentro das especificações. Com isso, o mesmo foi considerado robusto.

Pelos ciclos diários estabelecidos nas Figuras 14 a 16, pode-se comprovar a adequação do controlador a variações bruscas, nas quais são simuladas a entrada e saída de produção de forma abrupta. O mesmo conseguiu estabelecer um padrão de comportamento comprovando a sua estabilidade.

Como o sistema de controle atendeu aos critérios estabelecidos, consideraram-se satisfatórios os resultados obtidos e poderá ser utilizado no desenvolvimento das etapas subsequentes, não havendo necessidade de se ater a controladores mais sofisticados e complexos para a o processo simulado. Vencida esta etapa, os controladores podem ser considerados prontos para operar, gerenciando o processo simulado.

4.1.5 Registro dos parâmetros e configurações do controlador

Com os parâmetros determinados, leis de controle estabelecidas, constantes definidas e demais confirmações realizadas, os dados do sistema de controle são registrados para serem utilizados nos módulos 2 e 3. Assim, considera-se que o sistema de controle esteja apto para ser implementado para o comando do processo em questão.

4.1.6 Definição das variáveis monitoradas pelas cartas de controle

Analisando-se o processo, foi possível verificar quais são as variáveis críticas, ligadas à produção, relevantes para manter o processo sob controle. Estas foram consideradas como as características de qualidade a serem monitoradas pelas cartas de controle. Então, são monitoradas as Variáveis de Saída: Temperatura, Densidade e Nível. As cartas de controle traçadas para estas variáveis são integradas ao controlador, interferindo em sua ação de controle nos momentos de ocorrências de sinalizações.

4.1.7 Definições das cartas de controle

Uma vez que os dados a serem monitorados pelas cartas de controle são provenientes de um processo contínuo e a existência de autocorrelações está presente, inclusive pela ação do próprio controlador, as cartas baseadas em modelos foram determinadas na etapa metodológica. Mais especificamente, a baseada em séries temporais, ajustada por Modelos ARIMA e monitorando-se os resíduos.

São utilizadas múltiplas cartas de controle univariadas. Apesar das variáveis Densidade e Nível estarem ligadas às mesmas variáveis manipuladas, justifica-se a utilização de monitoramento das duas grandezas por retratarem informações diferentes. Podem-se presenciar anormalidades em que sejam sinalizados problemas de nível, mas não necessariamente de concentração e o inverso também pode ocorrer.

Visando atribuir maior eficiência ao CEP, determinou-se a utilização das cartas de controle para observações individuais de Shewhart e EWMA para monitorarem, conjuntamente, os resíduos provenientes dos modelos ARIMA, devidamente ajustados a cada uma das variáveis monitoradas. Respectivamente, visam detectar grandes e pequenos deslocamentos da média dos ruídos considerados (MONTGOMERY, 2004).

4.1.8 Configuração de técnicas necessárias ao emprego das cartas de controle

No início do módulo 2 subsequente, em uma rodada inicial na qual o controlador estará operando de forma isolada (sem interferência das cartas de controle), os valores das variáveis monitoradas serão capturados para serem utilizados como séries históricas, ajustadas por modelos ARIMA correspondentes. Auxiliando nesta atividade, tanto na seleção de modelos quanto nos ajustes dos parâmetros, é empregado o *software* estatístico Statgraphics, versão 15.1.2. Os modelos determinados são inseridos na simulação para o cálculo dos resíduos a serem monitorados nas cartas de controle.

Sendo simulado um processo contínuo, as amostras coletadas para cada uma das características de qualidade são unitárias ($n=1$). Por este motivo, os resíduos são monitorados por carta de controle para observações individuais. A frequência de amostragem é estabelecida como sendo em intervalos regulares subsequentes. Assim, a cada minuto será avaliada uma nova observação nas cartas de controle.

Como se trata de simulações, o processo é considerado como já mantido em estado de controle (Fase II). Uma primeira semana típica é gerada e os resíduos avaliados através de

cartas de Amplitudes Móveis (R), EWMA e também por cartas de Controle para Observações Individuais de Shewhart antes de serem registrados e de prosseguirem as simulações para avaliação. Não sendo constatadas anormalidades nestas cartas, os parâmetros (Limites Superior e Inferior Linha Central) das cartas de Observações Individuais de Shewhart e EWMA são armazenados para as avaliações das replicações das semanas, nas etapas subsequentes. Esta primeira semana não é utilizada no cômputo de desempenhos das replicações. Procedimento semelhante ao adotado por Reynolds e Park (2009).

São considerados como sinalizações de anormalidades os pontos registrados além dos limites de controle de qualquer uma das cartas. Montgomery (2004) não recomenda outras regras sensibilizantes, para monitoramentos on-line de um processo estável, por aumentar consideravelmente a ocorrência de alarmes falsos.

4.1.9 Registro das cartas de controle e suas configurações

Com as definições das variáveis a serem monitoradas, os tipos de cartas de controle, suas regras de sinalização e demais ajustes, estas informações são registradas para posterior utilização nos módulos 2 e 3. Com estas proposições, considera-se que as cartas de controle estejam em condições de serem parametrizadas no início das simulações do módulo 2, e, na sequência, implementadas para o monitoramento do processo em questão.

4.2 MÓDULO 2 - OPERAÇÃO INTEGRADA CEnP E CEP

Neste módulo, são implementadas as operações integradas entre as duas técnicas. A ação do controlador operando de forma independente e a ação deste integrado ao CEP são desenvolvidas a fim de que se possam comparar estas duas situações de gerenciamento do processo. As configurações e especificações desenvolvidas no módulo 1 são resgatadas e utilizadas.

4.2.1 Determinação de cenários

Visando uma melhor representação das condições enfrentadas pelo processo, buscou-se considerar as situações a que este possa estar submetido no dia-a-dia. Neste sentido, através dos dados levantados junto aos responsáveis pelo processo, na empresa estudada, avaliaram-

se os dois níveis (ritmos) mais usuais de produção: normal, alta. Além dos níveis de produção, outro fator crítico para a etapa de cromagem são os tamanhos de peças: pequenas e grandes.

Como produção normal, considerou-se estabelecer as condições em que a produção enfrenta em sua rotina, atendendo aos pedidos em seu ritmo normal, sem necessidade de estabelecer ações especiais para aumentar sua velocidade de processamento, correspondendo ao recobrimento médio diário de 40.000 dm². Como produção alta é considerada a situação em que as atividades de processamento são maiores, a velocidade é acelerada para atingir as metas solicitadas, porém sem a necessidade de estender a jornada de trabalho (horas extras), correspondendo ao recobrimento médio diário de 45.000 dm². A produção baixa não foi considerada por ser situação atípica para a realidade da empresa. Esta somente ocorreria em momentos de crise econômica do mercado, onde está inserida ou, no caso de faltar peças para serem processadas, fornecidas por empresa do mesmo grupo. Situação esta altamente controlada, pois a galvanoplastia é um dos gargalos deste segmento.

Os pedidos de peças a serem processadas não são gerenciados pelos responsáveis pela deposição; dependem dos acordos comerciais entre os clientes e a empresa do grupo que inicia a sequência produtiva, responsável pela parte de aramados. Visando otimizar a produção semanal, as peças são agrupadas antes do processamento, por uma classificação de grandes e pequenas, relação diretamente ligada às suas dimensões e área superficial. Essa classificação acarreta variações nas operações como: gancheiras diferenciadas, carrinhos e suportes apropriados, números de operadores, além dos tempos das etapas de operações alterados. Como classificação pequena procura-se agrupar peças compondo a área superficial por banho de 80 a 90 dm², e como grande de 91 a 100 dm². Os cenários a serem simulados estão relacionados na Figura 23.

Algumas das variações naturais do processo não são afetadas pelos cenários como: temperatura ambiente, evaporação e densidade de corrente. O ritmo da produção e o tamanho das peças influem na vazão de saída (arraste), na área de peças a depositar por banho, e o aquecimento provocado pela passagem da corrente circulante da eletrodeposição.

Cenário	Relações Estudadas	
	Comportamento (ritmo processo)	Classificação peças
C ₁	Normal	Pequenas
C ₂	Normal	Grandes
C ₃	Alto	Pequenas
C ₄	Alto	Grandes

Figura 23 – Cenários avaliados
[Fonte – próprio autor]

As variáveis são geradas conforme as classificações de peças grandes e pequenas, apuradas conforme o ritmo normal de produção, ver subseção 4.1.2.4. Para efeito de ritmo alto de produção, considerou-se o aumento linear dos parâmetros das equações geradoras das variáveis do processo, na mesma proporção do aumento da produção.

4.2.2 Simulação do processo

Com as definições realizadas, até esta etapa, é possível realizar as simulações do processo. Procurando a melhor reprodução do comportamento estudado, mantiveram-se as simulações sendo realizadas de forma contínua em períodos semanais, conforme apresentado na subseção 4.1.3, recriando uma semana típica de trabalho em intervalos de 1 minuto. Salienta-se que os períodos de maior interesse são os de produção, nos quais as variáveis controladas devem ser mantidas dentro dos limites de especificação. O modelo matemático, o comportamento das variáveis e demais relações são reproduzidas por processo iterativo com o auxílio do Pacote Computacional MatLab.

As quatro etapas de simulação estabelecidas na parte metodológica são seguidas. No Apêndice C estão relacionadas as constantes assumidas no modelo matemático para a simulação, tomadas com base na literatura técnica ou através dos responsáveis pelo processo industrial estudado.

4.2.2.1 Simulação preliminar do processo em operação com o controlador

Após a programação das equações do modelo matemático do processo, as variáveis responsáveis pelas variações naturais inerentes ao comportamento do mesmo, são inicialmente, geradas (conforme subseção 4.1.2.4). Para cada minuto simulado, são gerados e calculados novos valores das variáveis relacionadas no modelo matemático, anteriormente apresentado. Neste mesmo intervalo de tempo, o sistema de controle busca seus ajustes interferindo no processo.

Com a simulação preliminar, o comportamento das Variáveis Controladas - que serão monitoradas pelas cartas de controle - são obtidos e armazenados para determinação dos melhores modelos ARIMA. Dentre os cenários disponíveis, para efeito de geração destes dados, o Cenário 3 foi escolhido por ser aquele que atribui maior variabilidade às variáveis inerentes ao processo, sendo considerada a situação mais desfavorável para esta atividade, similar ao empregado por Apley e Lee (2003). Ressalta-se que os dados desta semana

preliminar não são utilizados nas análises comparativas posteriores. No Apêndice D pode ser visto o fluxograma de programação correspondente a esta primeira etapa de simulação.

4.2.2.2 Parametrização das cartas de controle

Com o histórico determinado, na etapa de simulação anterior, realizou-se a análise para determinação do melhor modelo ARIMA (metodologia Box & Jenkins) ajustado aos dados de Temperatura do Banho (Tb), Nível (h) e Densidade (τ). Com o auxílio do programa estatístico Statgraphics, para identificação e seleção dos melhores modelos, empregaram-se os critérios de adequação Akaike (AIC), Hannan-Quinn (HQC) e Schwarz-Bayesian (SBIC) (MORETTIN; TOLOI, 2004). A estimação dos parâmetros é realizada por algoritmo não linear baseado em mínimos quadrados, já implementado no próprio programa estatístico.

Como o interesse do estudo recai somente sobre o monitoramento do período de produção, que possui um comportamento muito próximo repetindo-se a cada dia da semana, foi utilizado um destes períodos para a análise, no caso por questão de facilidade, optou-se pelo da segunda-feira ($t=720$ a 1440). O mesmo período foi utilizado em todas as três variáveis.

Após a estimação, os modelos são verificados quanto a sua adequação na representação dos dados. Para isso, são verificadas as autocorrelações e autocorrelações parciais dos resíduos, além de testes de aleatoriedade. No Apêndice E, encontram-se as análises e dados obtidos. Os modelos ARIMA, ajustados aos dados iniciais, utilizando-se as considerações apresentadas anteriormente, podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Modelos ARIMA ajustados aos dados

Temperatura (Tb) (2,0,1)	Nível (H) (5,1,5)	Densidade (τ) (5,2,6)
AR1 = 1,956	AR1 = 0,534	AR1 = 0,509
AR2 = -0,956	AR2 = 0,467	AR2 = 0,693
MA1 = 0,872	AR3 = 0,731	AR3 = 0,262
Média = 39,836	AR4 = - 0,014	AR4 = 0,250
Constante = 0,0089	AR5 = - 0,722	AR5 = - 0,717
	MA1 = 0,304	MA1 = 1,094
	MA2 = 0,376	MA2 = 0,393
	MA3 = 0,702	MA3 = - 0,245
	MA4 = 0,158	MA4 = 0,030
	MA5 = - 0,548	MA5 = - 0,703
		MA6 = 0,398
		Constante = 3,46E-10

[Fonte – próprio autor]

Os modelos ARIMA estimados são inseridos no programa de simulação no MATLAB. Assim, os resíduos podem ser determinados e as cartas para Observações Individuais de Shewhart e EWMA, são empregadas.

Após algumas simulações iniciais, verificou-se que os resíduos monitorados possuem uma magnitude muito pequena, em virtude dos modelos ajustados representarem bem os respectivos comportamentos das variáveis, as quais estão relacionadas. Desta forma, oscilações consideradas naturais podem causar alarmes, mesmo a observação estando distante dos limites de especificação do processo. Com isso, deve-se dar uma atenção especial na determinação dos limites de controle.

Com relação ao múltiplo do desvio-padrão (L), a ser empregado na definição dos limites de controles das cartas de Shewhart, nos casos do monitoramento conjunto Shewhart e EWMA, Montgomery (2004) recomenda 3,25 a 3,5. Lucas e Saccucci (1990) citam que nestes casos os múltiplos 4 a 4,5 tem bom desempenho com ARL sob controle de 500. Tomando-se por base estas informações e algumas simulações iniciais a fim de realizar verificações, definiu-se o múltiplo de 3,5 desvios-padrão, o qual foi empregado no monitoramento das três variáveis controladas.

No caso das cartas EWMA, visando minimizar as falsas sinalizações, utilizando-se do estudo de Lucas e Saccucci (1990), na determinação dos parâmetros das cartas EWMA, optou-se pelo emprego da constante lambda (λ) de forma a se obter um ARL sob controle equivalente a 1000 em identificações de deslocamento de três desvios-padrão. Nesta situação, na qual se obtém um ARL fora de controle pequeno (2,26), recomendam as escolhas dentro das seguintes faixas: constante λ de 0,59 a 0,66 e múltiplo do desvio-padrão (L) de 3,283 a 3,286. Do apresentado, para monitoramento das três variáveis, optou-se pelos menores valores de λ e L , sendo respectivamente 0,59 e 3,283.

Com os modelos devidamente estabelecidos, os resíduos entre os valores das variáveis controladas (monitoradas) e seus respectivos valores ajustados são monitorados. As cartas de controle são utilizadas para monitorar apenas os períodos de interesse, que são os de produção. Os dados dos períodos fora de produção não são avaliados.

Foram utilizados nesta rodada, para cada uma das variáveis controladas (monitoradas), o par de cartas de Observações Individuais de Shewhart e Amplitudes Móveis e a carta EWMA, onde os comportamentos dos resíduos puderam ser observados. Não sendo constatadas sinalizações, os limites das cartas de Observações Individuais e EWMA são armazenados para realização em todas as repetições das simulações posteriores. Para estimar as variabilidades das cartas de Shewhart (Observações Individuais e Amplitude Móvel), foram consideradas as amplitudes móveis de observações consecutivas.

Os parâmetros estabelecidos para as cartas de controle, utilizados neste módulo e no módulo 3, são os constantes da Tabela 9. As respectivas cartas constam no Apêndice F.

Tabela 9 – Parâmetros cartas de controle

Parâmetros Cartas	Temperatura	Nível	Densidade
Carta Observações Individuais			
Limite Central (LC)	-5,842e-05	1,535e-05	9,007e-10
Limite Superior de Controle (LSC)	0,029	0,001	1,784e-06
Limite Inferior de Controle (LIC)	-0,029	-0,001	-1,782e-06
Múltiplo Desvios-Padrão	3,5	3,5	3,5
Carta EWMA			
Limite Central (LC)	-5,842e-05	1,535e-05	9,007e-10
Limite Superior de Controle (LSC)	0,017	9,17e-04	1,044e-06
Limite Inferior de Controle (LIC)	-0,017	-8,863e-04	-1,042e-06
Múltiplo Desvios-Padrão	3,283	3,283	3,283
Constante λ	0,59	0,59	0,59

[Fonte – próprio autor]

Devido à necessidade de dados iniciais para se computar os primeiros valores das variáveis ajustadas pelos modelos ARIMA correspondentes, e também para um período de acomodação e estabilização do controlador, variáveis alterando bruscamente o seu comportamento, as cartas de controle começam seu monitoramento diário somente após alguns instantes iniciais. Este instante foi estabelecido de forma padronizada dos primeiros quinze minutos de cada jornada produtiva (quinze observações de cada variável controlada). Equivalendo, assim, o monitoramento do processo após um período de aquecimento operacional. No Apêndice G é apresentado o fluxograma de programação desta segunda etapa de simulação.

4.2.2.3 Simulação do processo em operação com o controlador

Cada um dos cenários é simulado com o controlador operando isoladamente, para posterior comparação com a simulação conjunta com as cartas de controle. Inicialmente, as variações naturais inerentes ao processo são geradas conforme comportamentos apresentados na subseção 4.1.2.4 e levando-se também em consideração as variações lineares em função do ritmo de produção mais alto para determinação dos cenários 3 e 4.

As considerações realizadas na fase de projeto do controlador (subseção 4.1.4) são empregadas no programa implementado, inclusive ajustes, parâmetros e limitações de

atuadores das variáveis manipuladas. Todos os procedimentos, para aproximar o comportamento do ambiente real, são seguidos.

Nesta etapa de simulação, o controlador realiza seus ajustes procurando manter as variáveis controladas (monitoradas) o mais próximo de seus valores-alvo. Com a sintonia realizada, mesmo na ocorrência de alguns desvios, o controlador procura compensar as anormalidades conduzindo novamente os valores às suas metas. As cartas de controle não foram empregadas nesta fase.

São realizadas 1000 repetições de cada cenário. Os valores de todas as variáveis de todas as replicações e cenários são armazenados para análises posteriores, bem como as responsáveis pelas variações naturais, inerentes ao processo. O fluxograma de simulação, correspondente a terceira e quarta etapas consta no Apêndice H.

4.2.2.4 Simulação do processo com integração CEnP e CEP

Com as cartas de controle determinadas e devidamente inseridas no programa de simulação, as variáveis responsáveis pelas variações naturais, inerentes ao processo, e pela criação dos cenários são resgatadas do banco de dados, geradas quando da operação do controlador isoladamente. Desta forma, são repetidos os mesmos comportamentos, proporcionando a possibilidade de comparação direta entre as duas situações. Com isso, também é realizado o mesmo número de repetições estipuladas para o controlador isoladamente.

Considerando o processo já sob controle estatístico (Fase II) os parâmetros das cartas de controle, definidos na segunda etapa de simulação, são assumidos. Dada a periodicidade semanal e o processo sob controle, os parâmetros são considerados para todas as demais repetições. Desta forma, estes valores não são revistos no período simulado.

As sinalizações geradas, em cada uma das cartas de controle (Obs. Individuais e EWMA) de cada uma das variáveis monitoradas, são registradas individualmente. Possibilita-se, assim, identificar o instante gerador do sinal e os valores instantâneos das demais variáveis do processo.

Em função da proposta do controle estatístico auxiliar diretamente o controlador (um sistema de autoajuste), esta etapa de simulação é realizada em quatro rodadas. Cada uma destas rodadas é realizada considerando-se todos os cenários em todas as suas repetições. Este tipo de interferência é detalhado a seguir.

4.2.3 Intervenções nas sinalizações de anormalidades

Nos momentos em que sinalizações são identificadas por qualquer carta, uma ação é providenciada junto ao sistema de controle. Uma componente de erro, baseada na diferença entre o valor-alvo e a previsão da variável monitorada para o próximo instante, dependente da carta na qual se originou o sinal, ocorre a interferência direta na lei de controle do respectivo controlador PID. A equação (46) apresenta esta componente.

$$e_{cc}(t) = V_{alvo} - \hat{x}_{i+1} \quad (46)$$

Em que, $e_{cc}(t)$ é a componente de erro utilizada no autoajuste no instante seguinte; V_{alvo} é o valor-alvo da variável monitorada; \hat{x}_{i+1} é o valor previsto da variável monitorada para o próximo instante.

Esta ação de correção interfere diretamente no controlador, específico da variável averiguada, no minuto seguinte. Agindo desta forma, está sendo aumentada a ação proporcional da lei de controle, seguindo-se a recomendação de Spandri (2003) que se devem evitar alterações na ação derivativa e, cuidados na manipulação inadvertida na ação integral a título de se causar instabilidade no sistema. Em conjunto com a componente de erro, existe a necessidade de determinar um parâmetro específico denominado ganho (K_{cc}). Assim, a lei de controle do controlador PID, equação (25) (subseção 2.2.2), programada para o CEnP, passa a ter a sua composição conforme equação (47).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_{cc} e_{cc}(t) \quad (47)$$

Em que os termos acrescentados foram: K_{cc} que é o ganho de contribuição da carta de controle; $e_{cc}(t)$ que é o componente de erro, instantâneo ou previsto.

Sendo uma nova abordagem, não foram encontradas referências na literatura para especificar o ganho de contribuição da carta de controle (K_{cc}). Como a ação de controle, influenciada pelas cartas, segue o princípio da ação proporcional, foram avaliados múltiplos do ganho K_p , já especificado, para determinação e avaliação do ganho K_{cc} . Na sequencia são apresentadas as formas de obtenção do componente de erro e do respectivo ganho.

Como as variáveis são monitoradas por dois tipos de cartas de controle, em função do tipo de informação disponível em cada uma delas, optou-se pela forma de previsão para o

próximo instante da variável monitorada. Cada carta possui o seu cálculo de forma independente.

Quando as cartas de controle de Observações Individuais realizam sinalizações, o valor previsto da variável monitorada para o próximo instante é baseado no modelo ARIMA correspondente, já incorporado ao programa de simulação. Utiliza-se o mesmo modelo empregado para determinação dos erros de ajuste monitorados pelas cartas (48).

$$\hat{x}_{i+1} = \hat{x}m_{i+1} \quad (48)$$

Em que, \hat{x}_{i+1} é o valor previsto da variável monitorada para o próximo instante; $\hat{x}m_{i+1}$ é o valor previsto da variável monitorada para o próximo instante com o modelo ARIMA correspondente.

Com a sinalização das cartas EWMA, considerando a sugestão de Montgomery (2004), o valor da estatística EWMA pode ser utilizado para previsão de onde está a média do processo, no próximo instante. Como são monitorados os resíduos, então é uma estimativa da média destes. Com o valor desta estatística adicionada ao valor previsto para o próximo instante pelo modelo ARIMA já ajustado, correspondente à variável monitorada, pode-se estimar o valor da variável, conforme equação (49).

$$\hat{x}_{i+1} = Z_i + \hat{x}m_{i+1} \quad (49)$$

Na qual, \hat{x}_{i+1} é o valor previsto da variável monitorada para o próximo instante; Z_i é o valor EWMA estimando a média do resíduo para próximo instante; $\hat{x}m_{i+1}$ é o valor previsto da variável monitorada para o próximo instante com o modelo ARIMA correspondente.

Quando da existência de sinalizações nas duas cartas para o mesmo instante, optou-se por priorizar a informação da carta EWMA para realizar a interferência. Esta opção foi tomada uma vez que, esta carta também dispõe da previsão de onde se encontra a média do ruído monitorado para o próximo minuto, levando em consideração mais informações para melhor posicionar o valor da variável estimada.

Visando a melhor determinação dos ganhos da contribuição das cartas de controle (K_{cc}), são simuladas situações nas quais se testam relações dos valores dos ganhos proporcionais (K_p) do controlador já especificado. São investigadas proporções de 50, 100 e 150% de cada um destes ganhos, possibilitando averiguar a opção que gere um melhor resultado. Resultados a serem avaliados em termos de manter as variáveis mais próximas aos

objetivos, que são os valores-alvo. A condição de ganho nulo (0%), também foi inserida para se ter referência de como seria a situação de apenas sinalização, sem interferência direta, como o que ocorre em uma situação normal. Cada um dos valores dos ganhos é testado em todos os cenários nos quais forem constatadas sinalizações na condição $K_{cc} = 0$.

Todas as variações do ganho K_{cc} são testadas sob as mesmas condições operacionais como: cenários, variações naturais inerentes ao processo armazenadas na rodada CEnP e parâmetros da cartas de controle e do controlador. Os ganhos determinados para cada uma das avaliações de autoajustes das cartas de controle estão relacionados na Tabela 10.

Tabela 10 – Ganhos Avaliados na Interferência das Cartas de Controle

Ganho	Variável Monitorada Tb	Variável Monitorada H	Variável Monitorada σ
Kcc -0%	0	0	0
Kcc -50%	5000	40	10000
Kcc - 100%	10000	80	20000
Kcc – 150%	15000	120	30000

[Fonte – próprio autor]

Mesmo sendo um passo importante do CEP, por tratar-se de simulação, não se preocupou com a identificação das causas geradoras das sinalizações no instante em que estas são constatadas. Quando estas ocorrem, são imediatamente tomadas medidas de correção (de forma automática) junto ao controlador a serem incorporadas no próximo minuto simulado. O processo de simulação não é interrompido.

As intervenções realizadas, diretamente, são somente as do sistema de autoajuste. Durante as repetições, não são realizadas outras intervenções específicas. O comportamento da carta não é avaliado *on-line*, apenas os pontos fora dos limites de controle são registrados e providencia-se a interferência no controlador (processo). Posteriormente, após o término das simulações, os dados são verificados.

4.2.4 Registro das informações das variáveis do controlador e das cartas de controle

A cada rodada de simulação, são armazenados todos os valores de cada uma das variáveis em cada uma das repetições, além dos pontos avaliados pelas cartas de controle e

suas sinalizações. Assim, é permitido realizar, na sequência, as verificações e análises com o cruzamento das informações de cada uma delas.

Três bancos de dados foram criados. Dois registram as informações das repetições: CEnP, Integração. O terceiro banco foi criado especificamente para os dados iniciais e parâmetros das cartas de controle.

4.2.5 Todos os cenários foram testados?

Todos os cenários relacionados - combinações de ritmo processo (normal e alto) e classificação das peças (pequenas e grandes) - são simulados na sequência apresentada. As simulações foram realizadas individualmente, registrando e controlando todas as combinações necessárias à criação dos cenários em todas as condições avaliadas.

A organização dos dados e análise é realizada somente após todos os cenários terem sido reproduzidos nas duas situações: controlador isoladamente e controlador operando, em conjunto com as cartas de controle. Esta última, em suas quatro variações de ganhos de contribuição das cartas de controle.

4.2.6 Organização e tabulação dos dados

Os dados, registrados e armazenados nos bancos de dados, são organizados de forma a possibilitar a interpretação e análise do ocorrido nas simulações realizadas. Estes dados estão disponíveis em meio eletrônico para qualquer confrontação necessária.

Verificando todas as rodadas de todos os cenários, as sinalizações encontradas estão relacionadas na Tabela 11. Nesta Tabela, estão sintetizadas as quantidades de repetições onde existiram ocorrências por tipo de carta de controle e por tipo de cenário. Nos cenários 1 e 2, como não foram constatadas sinalizações logo na primeira rodada ($K_{cc} = 0$), não houve a necessidade de realizar as simulações com as demais variações de ganhos.

No cenário 3 a ocorrência se deu na repetição 589, com a variável Densidade. Com ganho $K_{cc} = 0\%$ e 50% foram registradas apenas uma sinalização com a carta EWMA no minuto 5067. Porém, com $K_{cc} = 100\%$ e 150% surgiram novas sinalizações, inclusive na carta de Observações Individuais. Em ambas as situações de ganho, a carta EWMA iniciou sua sinalização no instante 5067 e foram seguidas por outras novas, em instantes alternados (23 com $K_{cc} = 100\%$ e 32 com $K_{cc} = 150\%$). Para estas situações de ganho, a carta de Observações Individuais iniciou sua sinalização nos instantes 5073 ($K_{cc} = 100\%$) e 5069 (K_{cc}

= 100%), sendo estas seguidas, respectivamente, por mais 23 e 29 novos registros em tempos subsequentes.

Tabela 11 – Quantidade de repetições com ocorrências por tipo de Carta de Controle e cenário

C. Controle / Cenário	Ganho K_{cc}	Observações Individuais	EWMA
C1	0%	0	0
	50%	-	-
	100%	-	-
	150%	-	-
C2	0%	0	0
	50%	-	-
	100%	-	-
	150%	-	-
C3	0%	0	1
	50%	0	1
	100%	1	1
	150%	1	1
C4	0%	0	2
	50%	0	2
	100%	0	2
	150%	0	2

[Fonte – próprio autor]

No cenário 4, as ocorrências foram registradas nas repetições 356 e 866, ambas com a variável Temperatura e a carta EWMA. Na repetição 356, a sinalização se deu no minuto 5323. Esta mesma sinalização foi percebida em todas as variações de Ganhos, não gerando variações adicionais. Na repetição 866, foram percebidas nove sinalizações, as mesmas em todas as variações de ganhos, iniciando-se no minuto 1021 e seguidas por mais 8 em instantes alternados. No apêndice I, encontram-se relacionadas as sinalizações registradas nas simulações dos cenários 3 e 4.

Dentre as sinalizações registradas, as ocorridas no cenário 3 com a variável Densidade, após uma avaliação inicial, não foram encontradas explicações diretas para sua ocorrência. As causas que levaram à sinalização original (minuto 5067) não foram identificadas, considerando-se apenas ligadas a maiores variabilidades do cenário. Atribuiu-se este evento às variações inerentes ao processo.

As sinalizações da carta de controle EWMA, variável Temperatura, ocorridas no cenário 4, repetições 356 e 866, são provenientes de grandes variações naturais inerentes ao processo. Nesta situação, mesmo o controlador buscando sua correção, esta não foi possível,

por limitações da configuração do próprio processamento envolvido. Esta avaliação é detalhada na subseção de análise dos resultados.

Não foram identificadas falhas de funcionamento do sistema de controle, mesmo operando de forma isolada (CEnP). Operando dentro das especificações estabelecidas, seu funcionamento isolado foi considerado satisfatório. Na Tabela 12, constam os valores máximos e mínimos de cada uma das variáveis, em cada um dos cenários, dentro dos períodos de produção, desconsiderando-se os valores observados nas semanas nas quais houve sinalização. Pode-se verificar que os limites de especificação estabelecidos (Tabela 6, subseção 4.1.4) são atendidos. Relata-se que as exceções ocorridas (desconsideradas na tabela) foram as semanas (repetições) 356 e 866, do cenário 4, em que a variável Temperatura atingiu os máximos respectivos de 43,69°C e 44,09°C. O comportamento destas duas semanas atípicas, identificadas quando das versões de integração, são discutidas na subseção subsequente.

Tabela 12 – Valores Máximos e Mínimos das Variáveis Controladas, período de produção – CEnP

Variáveis		Limite Especificação	C1	C2	C3	C4
Temperatura (C°)	mín.	39,00	39,56	39,58	39,57	39,58
	máx.	43,00	42,05	42,73	42,65	42,77
Nível (cm)	mín.	93,00	94,92	94,93	94,90	94,92
	máx.	97,00	95,11	95,09	95,13	95,11
Densidade (cm ³)	mín.	1,1520	1,1583	1,1588	1,1578	1,1584
	máx.	1,1740	1,1635	1,1635	1,1635	1,1635

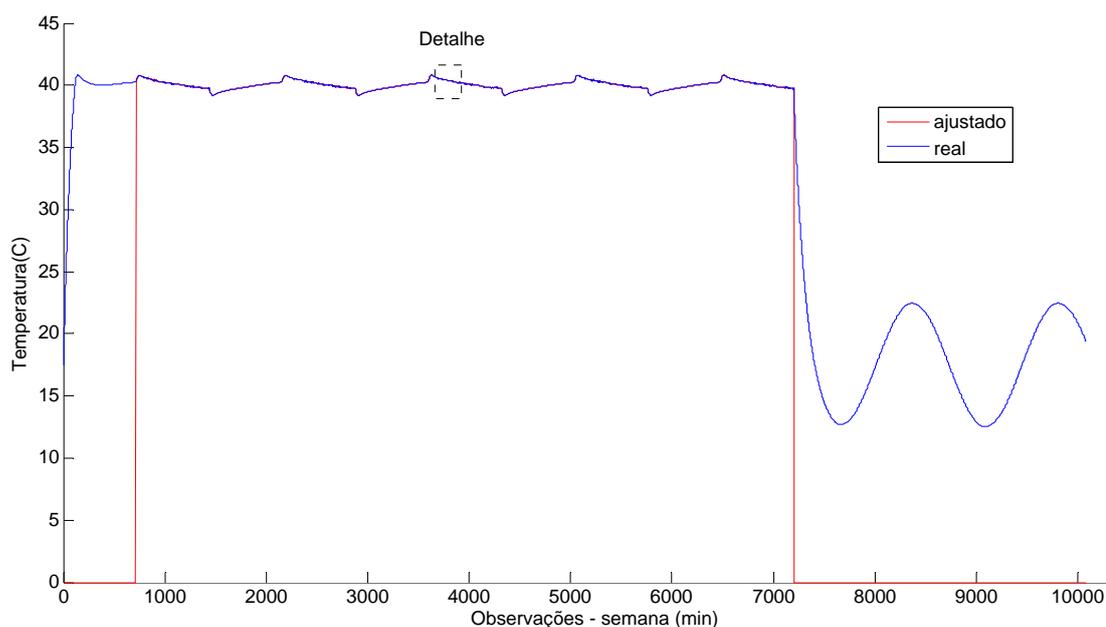
[Fonte – próprio autor]

4.2.7 Análise dos resultados e comportamentos

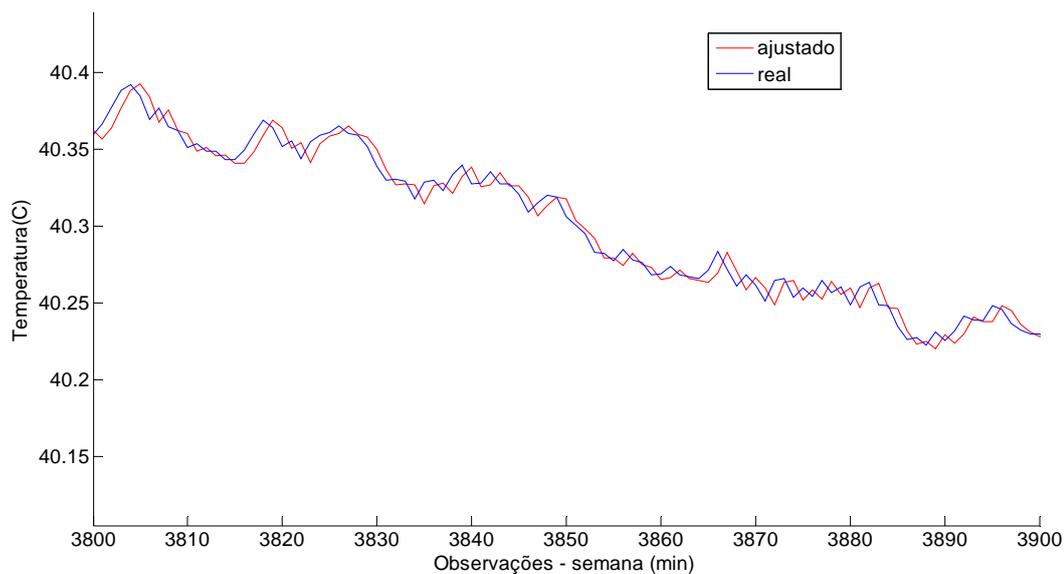
Após a realização das repetições programadas, considerando-se os cenários e suas condições de operação, as simulações foram tidas como satisfatórias. As poucas ocorrências relatadas não comprometeram os resultados, contribuindo, inclusive, para uma melhor ilustração de situações passíveis de ocorrência no dia-a-dia do processo estudado. Na sequência são verificadas individualmente, as variáveis quanto ao seu ajuste e sinalização. A título de exemplificação, escolheu-se uma semana (repetição) 600 com o cenário 3 para apresentar o comportamento geral obtido.

4.2.7.1 Variável controlada Temperatura

Na Figura 24(a), estão apresentados o comportamento da variável controlada Temperatura e seu respectivo ajustamento, proporcionado pelo modelo ARIMA estimado. Com o modelo ARIMA devidamente ajustado aos dados, percebeu-se que a magnitude dos resíduos monitorados é pequena. Este fato conferiu maior sensibilidade à carta. Nota-se que o modelo, bem ajustado, proporcionou resíduos pequenos quando comparados com a ordem de grandeza dos valores observados da variável. A Figura 24(a) retrata a semana 600 do cenário 3, iniciando-se com o banho na temperatura média semanal. Na sequência, o sistema de controle realiza a sua correção mantendo-a próxima à programada como Alvo. As oscilações, dos períodos de produção e fora de produção, são percebidas. Após o término da semana de trabalho, a temperatura do banho acompanha a do ambiente, a qual alterna em torno da média ambiental estabelecida para o período. A Figura 24(b) ilustra o detalhe apresentado na Figura 24(a), demonstrando o ajustamento realizado.



(a) Variável Controlada Temperatura – observações originais e ajustadas



(b) Variável Temperatura, observado x ajustado, detalhe das observações originais e ajustadas

Figura 24 – Temperatura - Cenário 3, Repetição 600

[Fonte – próprio autor]

Na Figura 25, estão apresentados os resíduos obtidos entre os valores observados e os ajustados, referentes à Figura 24(a). Percebe-se os picos que ocorrem em cada mudanças de regime de produção, isto em função dos dados iniciais e necessários, em relação à ordem do modelo ajustado e a estabilização do sistema de controle. Nos períodos fora de produção, apesar de calculados, os erros não são considerados pelas cartas para monitoramento do processo, nem foram utilizados para os ajustamentos dos modelos.

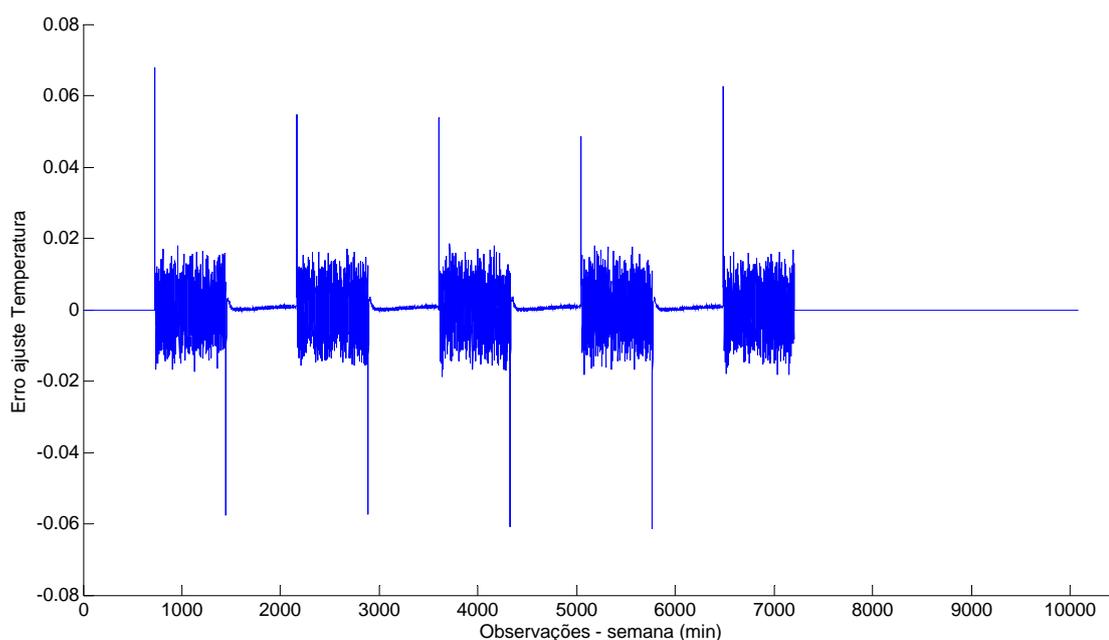


Figura 25 – Erros de ajuste variável Temperatura – cenário 3, semana 600

[Fonte – próprio autor]

As cartas de controle, monitorando a variável controlada Temperatura, semana 600 do cenário 3, constam na Figura 26. Com as cartas representadas de forma simultânea, facilita o entendimento dos comportamentos e sinalizações, segundo Montgomery (2004). Nas cartas, são considerados somente os períodos de produção, descontados dos respectivos períodos iniciais (15 minutos), em virtude da acomodação do sistema de controle e dos dados necessários em função da ordem do modelo ARIMA ajustado. Cada uma das cartas possui os seus respectivos limites de controle, estabelecidos na rodada preliminar, com esta finalidade. Nota-se que, nesta semana avaliada, não foram identificadas sinalizações. Salienta-se que as cartas de controle consideram apenas os instantes monitorados, referentes à produção, correspondentes às cinco jornadas de 705 minutos (já subtraídos os 15 minutos iniciais conforme citado anteriormente).

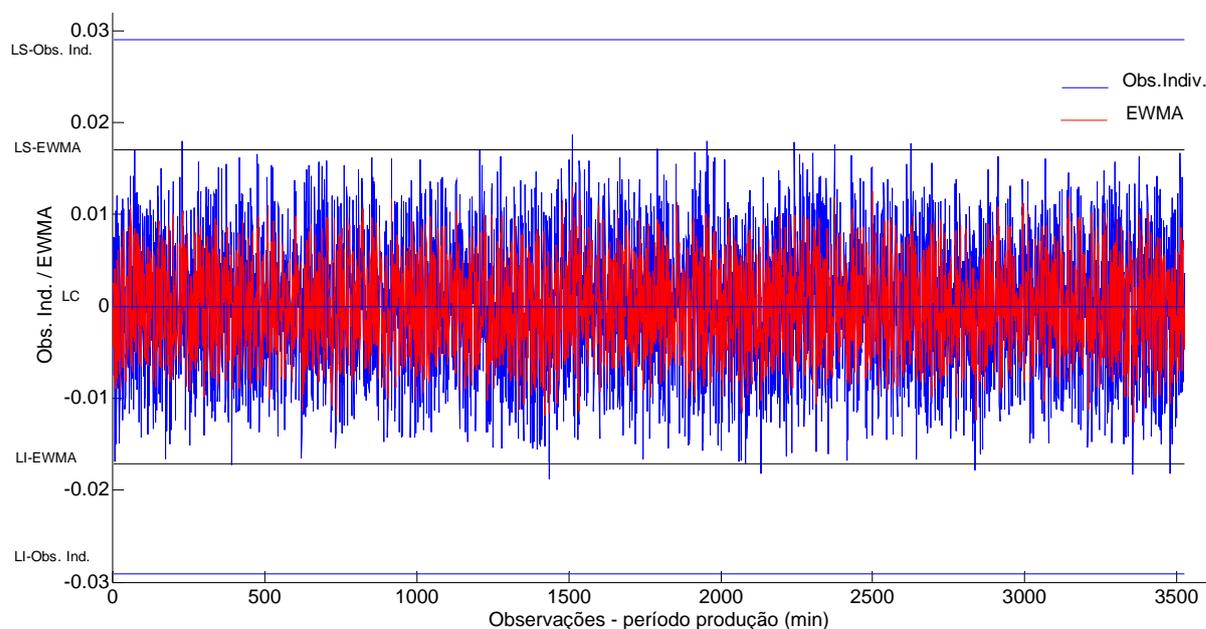


Figura 26 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Temperatura – cenário 3, semana 600

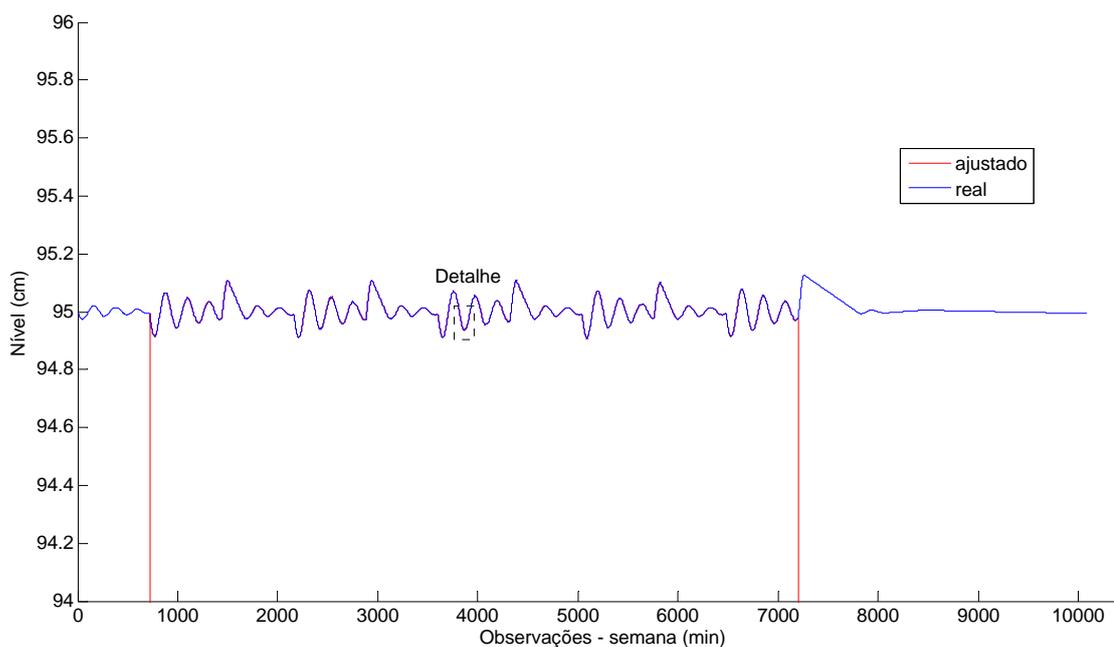
[Fonte – próprio autor]

4.2.7.2 Variável controlada Nível

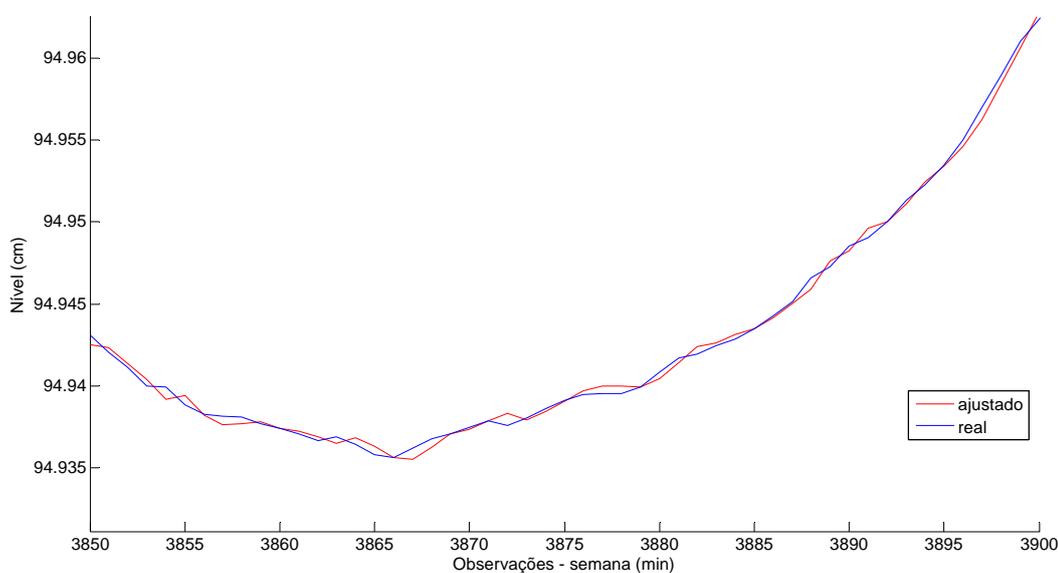
Para a mesma semana avaliada (cenário 3, repetição 600), a variável controlada Nível está retratada na Figura 27(a). As oscilações de produção podem ser identificadas, incluindo o período inicial no qual o nível inicia a semana já estando em seu valor-alvo. Nos períodos sem produção, inclusive no final de semana, as alterações estão relacionadas basicamente à

evaporação. Os valores obtidos da variável controlada e os ajustados pelo modelo ARIMA correspondente, são apresentados de forma conjunta.

Na Figura 27(b), é demonstrado o detalhe indicado na Figura 27(a) aproximando a visualização da série de dados observados e seus respectivos valores ajustados. Percebe-se a pequena diferença existente entre as séries, quando comparadas com a magnitude dos valores da variável controlada.



(a) – Variável Controlada Nível – observações originais e ajustadas



(b) – Variável Nível, Observado x Ajustado, detalhe das observações originais e ajustadas

Figura 27 – Nível - Cenário 3, Repetição 600
[Fonte – próprio autor]

Os erros de ajuste correspondentes às séries apresentadas na Figura 27(a) podem ser vistas na Figura 28. Os picos, no início de cada mudança do regime de produção, também são correspondentes aos acertos iniciais do sistema de controle e dos valores iniciais relacionados à ordem do modelo ajustado.

Os resíduos dos períodos de produção, e descontados os primeiros 15 minutos do início de cada jornada produtiva, são monitorados pelas cartas de controle de Observações Individuais e EWMA. Pela Figura 29, pode-se observar estes comportamentos e seus respectivos limites de controle. Também nessa semana não foram constatadas sinalizações nessa variável.

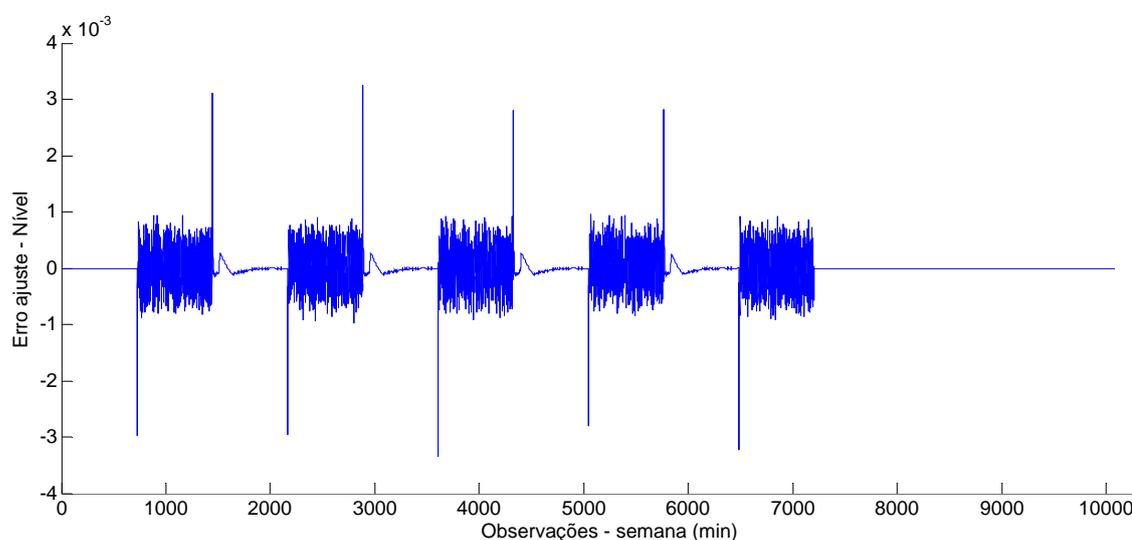


Figura 28 – Erros de ajuste variável Nível – cenário 3, semana 600
[Fonte – próprio autor]

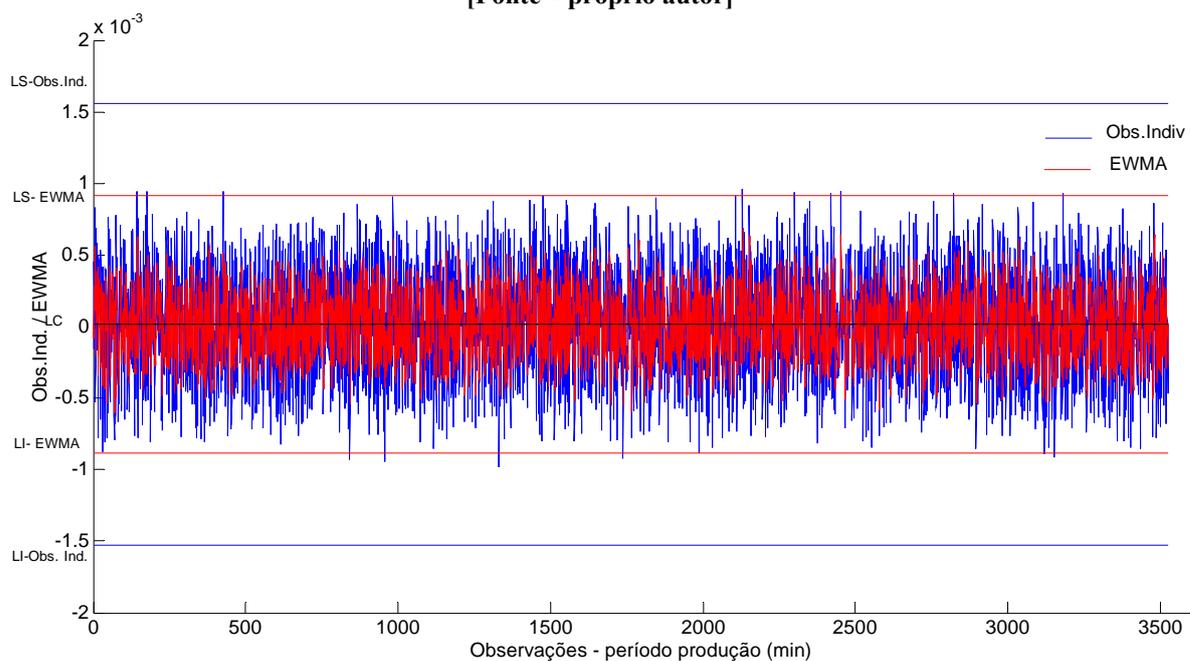
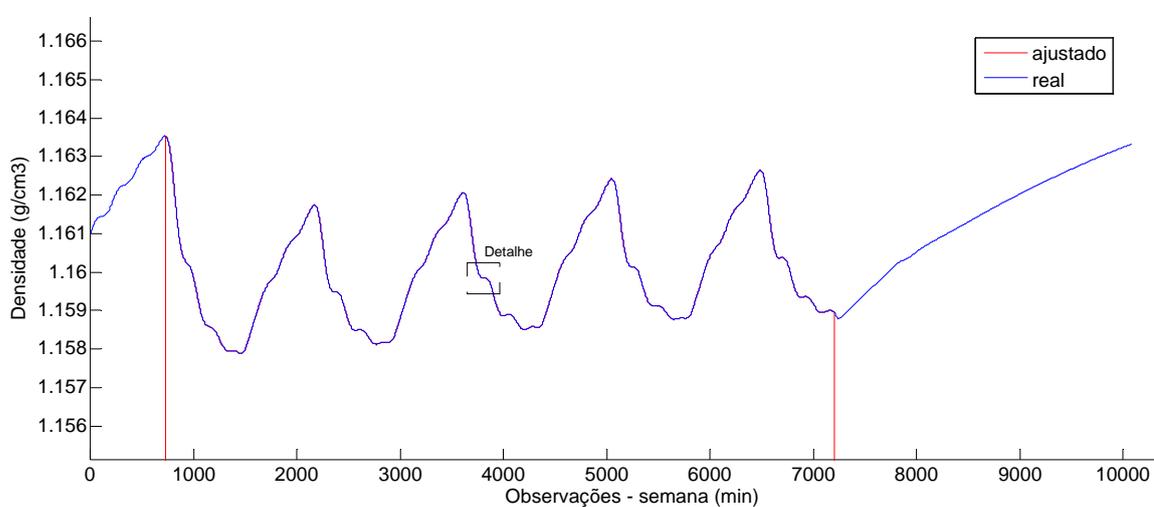


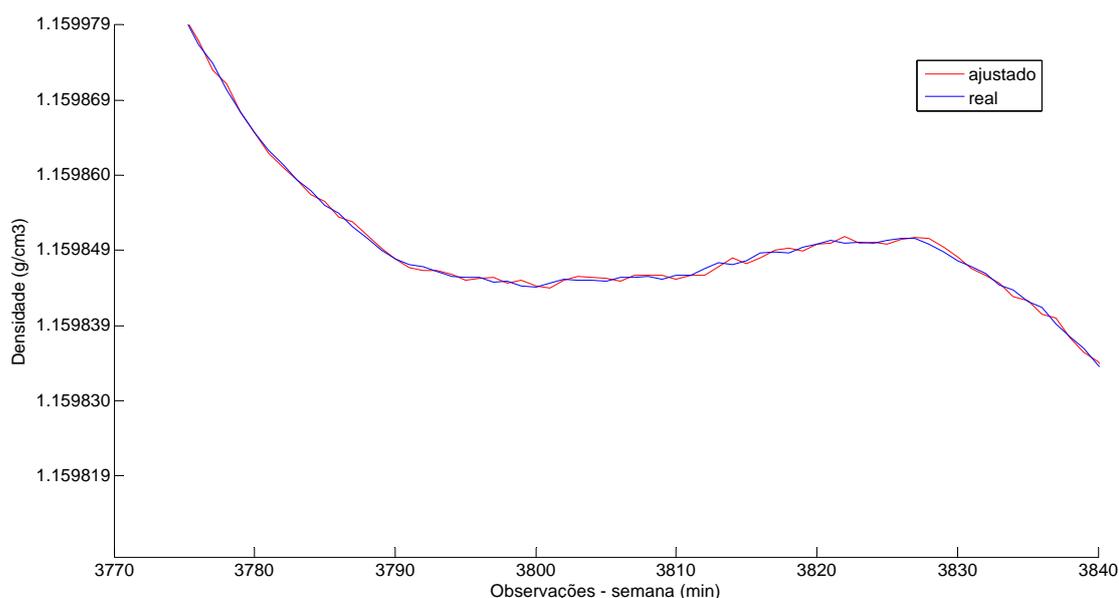
Figura 29 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Nível – cenário 3, semana 600
[Fonte – próprio autor]

4.2.7.3 Variável controlada Densidade

O comportamento típico da variável controlada Densidade, em conjunto com seu valor ajustado pelo modelo ARIMA correspondente, pode ser visto na Figura 30(a). Os ciclos correspondentes ao regime de produção, são reproduzidos. Mesmo nos períodos fora de produção, a densidade e, conseqüentemente, a concentração, é corrigida buscando-se manter a sua adequação para o próximo estágio. Nota-se que, após a observação 7200 (término da semana de trabalho), a densidade se eleva em função da evaporação desse período. O detalhe indicado na Figura 30(a) pode ser melhor avaliado na Figura 30(b).



(a) – Variável Controlada Densidade – observações originais e ajustadas



(b) – Variável Controlada Densidade detalhe das observações originais e ajustadas

Figura 30 – Densidade - Cenário 3, Repetição 600

[Fonte – próprio autor]

Os erros de ajustes entre as séries apresentadas na Figura 30(a) podem ser vistos na Figura 31. Também com esta variável controlada são vistos os valores alterados, no início de cada alteração de jornada de trabalho.

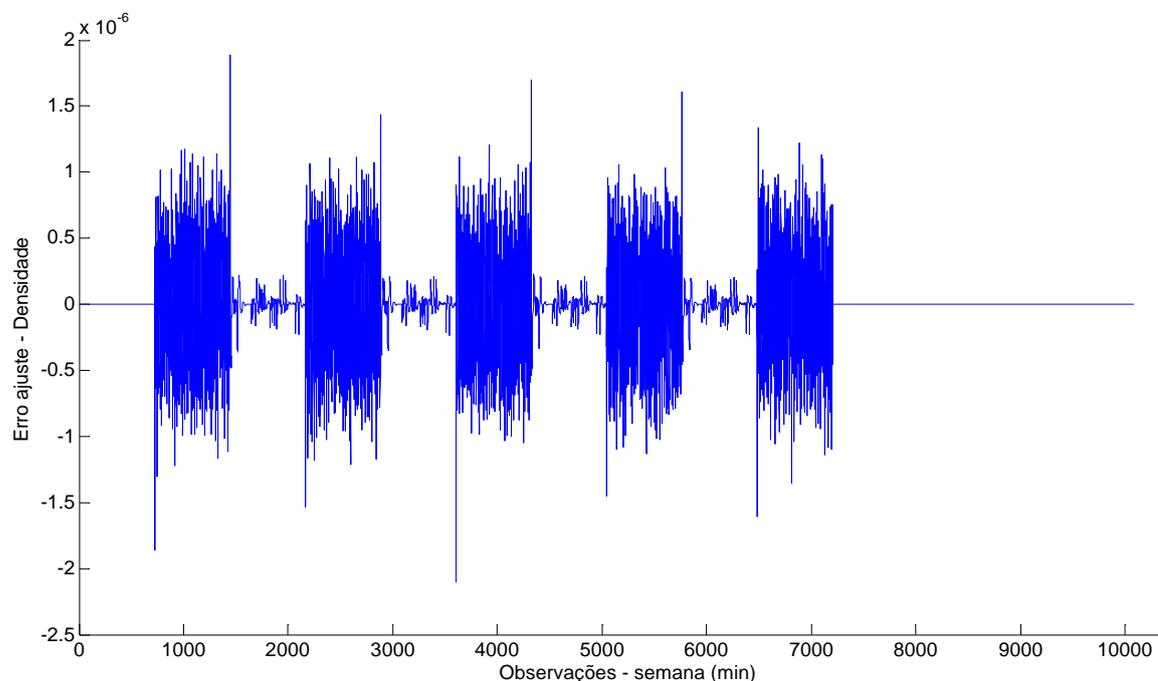


Figura 31 - Erros de ajuste variável Densidade – cenário 3, semana 600
[Fonte – próprio autor]

As cartas de controle, monitorando os resíduos da variável Densidade, podem ser vistas na Figura 32. Nestas cartas, verifica-se que os limites também estão sendo respeitados. Os limites de controle, estabelecidos na rodada preliminar específica, são empregados em cada uma das semanas (repetições) simuladas.

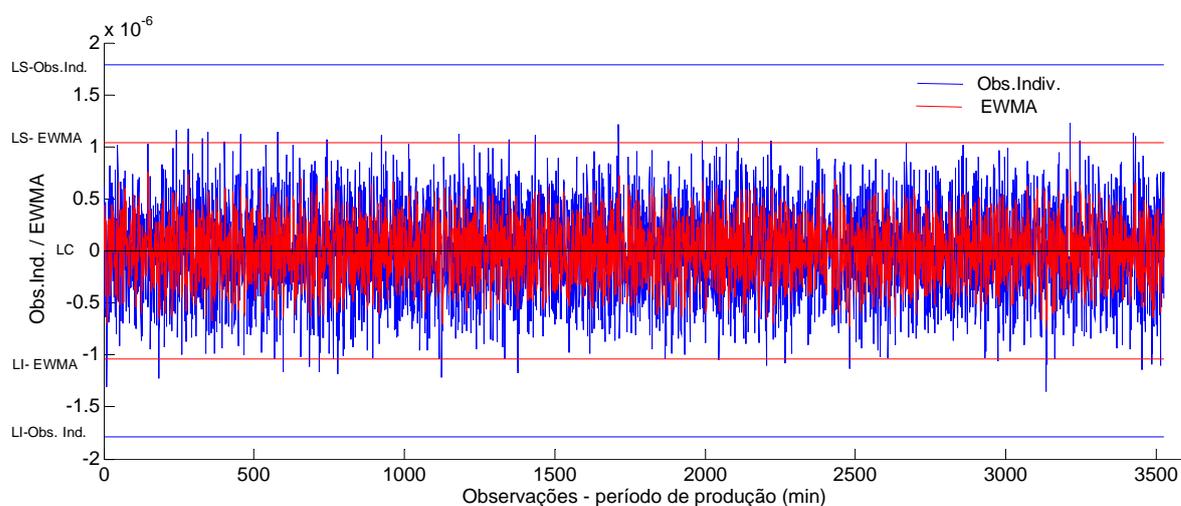
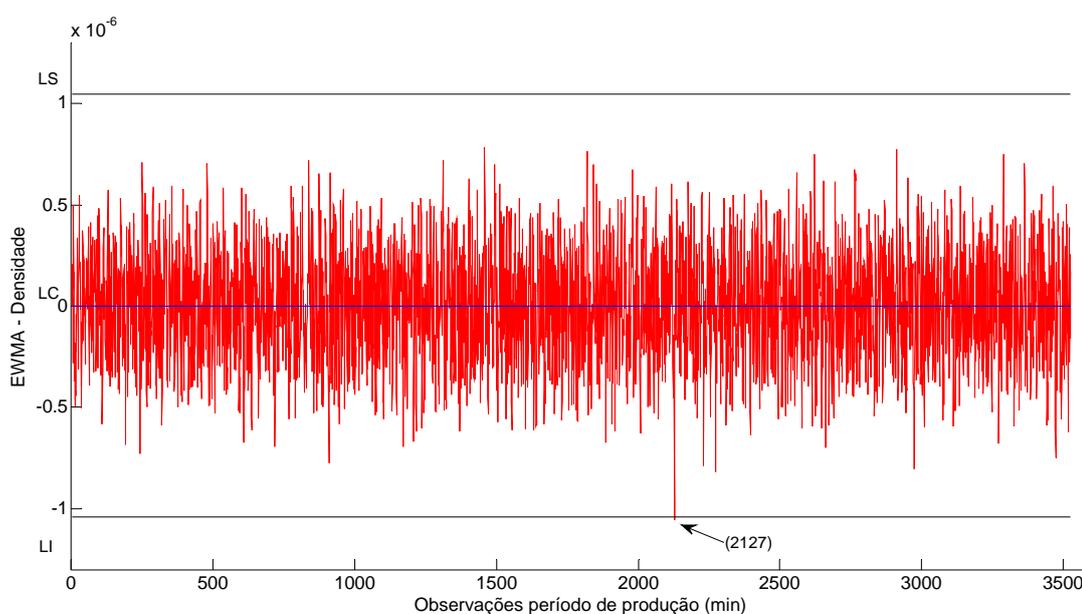


Figura 32 – Cartas de controle Individuais e EWMA, variável Densidade – cenário 3, semana 600
[Fonte – próprio autor]

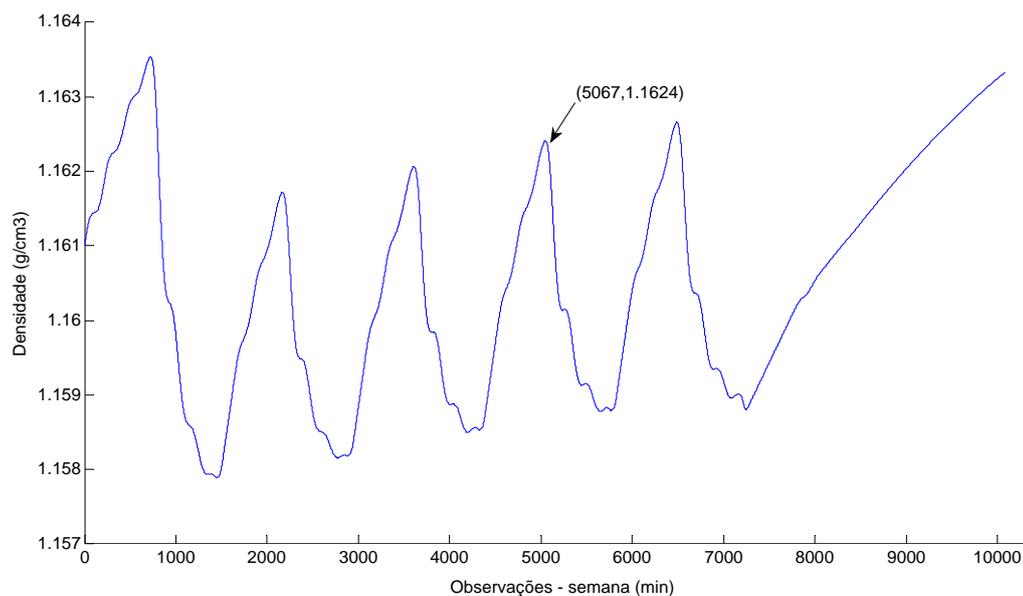
4.2.7.4 Sinalizações ocorridas

Pela quantidade de repetições com registros de ocorrências (Tabela 11), dentre as semanas simuladas, apenas três apresentaram sinalizações. Uma, com a carta EWMA monitorando os resíduos da variável Densidade e, outras duas, com a mesma carta monitorando os resíduos da variável Temperatura.

Com relação à Densidade, pela Figura 33(a) representando a semana 589 - cenário 3, sem contribuição da carta de controle para atuação do controlador ($K_{cc} = 0\%$), percebe-se que a sinalização ocorrida, instante monitorado 2127 (referente ao minuto 5067 da semana simulada) ultrapassou ligeiramente os limites de controle. Nesta situação, não foram constatados motivos aparentes que indiquem anormalidade no processo que justifique a alteração captada pela carta, estando a variável controlada dentro de seu comportamento esperado, conforme Figura 33(b). Nenhuma anormalidade foi percebida que justificasse tais sinalizações. As duas primeiras situações de ganho ($K_{cc} = 0\%$ e 50%) indicaram apenas uma única sinalização cada. Como o modelo ARIMA determinado conseguiu uma boa reprodução desta variável, o resíduo monitorado possui uma ordem de grandeza muito pequena (10^{-6}) quando comparada à respectiva observação. Atribuiu-se estas indicações das cartas a variações naturais do processo que, de alguma forma combinadas, proporcionaram um ligeiro afastamento do modelo aumentando o erro de ajuste monitorado.



(a) Carta de Controle EWMA Densidade – Sinalização



(b) – Variável Controlada Densidade Sinalização

Figura 33 – Densidade - cenário 3, repetição 589, $K_{cc} = 0\%$
[Fonte – próprio autor]

Para as condições de maiores contribuições das cartas de controle ($K_{cc}=100$ e 150%) o número de sinalizações foi maior. Em ambas as situações, a sinalização iniciou na observação 5067 (instante monitorado 2127) com a carta EWMA e, em observações posteriores, surgiram as novas indicações, inclusive na carta de Observações Individuais (apêndice I). Claramente pode-se perceber que, estas duas condições de ganho avaliadas, não foram favoráveis ao sistema, e sua influência junto ao controlador causou um princípio de instabilidade (ação excessiva do controle proporcional). Nas cartas de controle, Figura 34 estas sinalizações são evidenciadas.

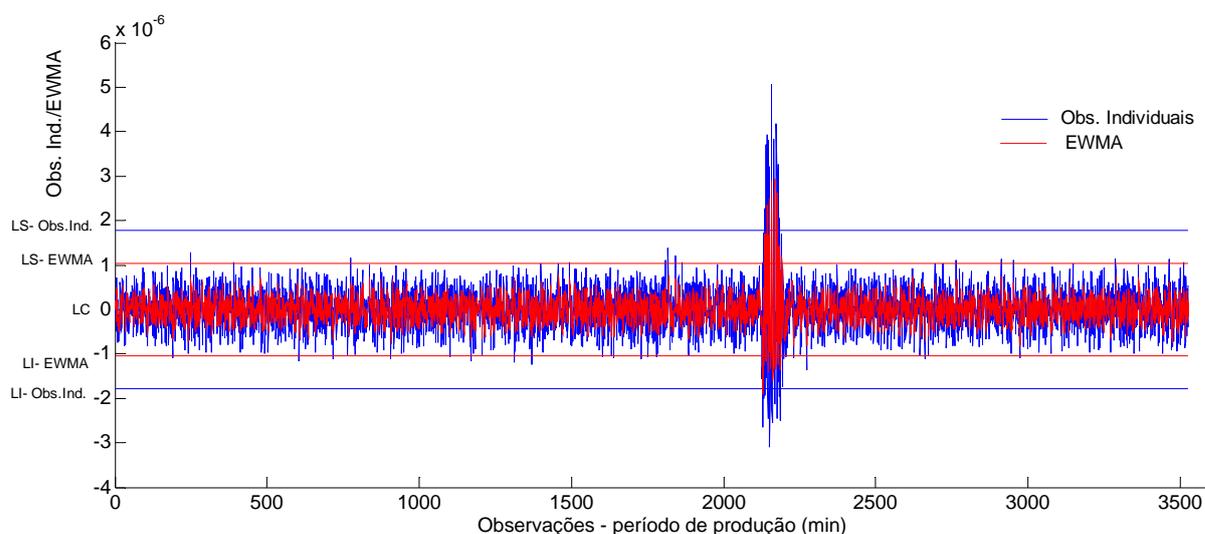


Figura 34 – Cartas de controle Observações Individuais e EWMA, Densidade – cenário 3 - semana 589, $K_{cc}=150\%$
[Fonte – próprio autor]

Na Figura 35, referente ao ganho 150% (cenário 3, repetição 589, variável Densidade), estão indicados os componentes que influenciam na lei de controle do controlador: ação devido à parte integral (UI), ação devido à parte proporcional (UP), ação devido à parte derivativa (UD) e a ação devido às contribuições das cartas de controle (UCC-CC). Como resultante do somatório destas ações, encontra-se a ação total do controlador PID (UPID). Nota-se que as contribuições das cartas de controle (UCC-CC) estão aumentando a ação de controle total do controlador UPID. Consta-se que a ação proporcional (UP) predomina na lei de controle desta variável e é responsável pela maior parte da ação total (UPID). Sendo a forma de contribuição das cartas também um princípio de ação proporcional, estes efeitos somados acabam por assumir grandes proporções. A interferência no controlador inseriu uma variação originalmente não existente. Desta forma, o ganho da contribuição das cartas, para essa variável monitorada, deverá ser determinado em patamares menores do ganho proporcional especificado para o controlador (ex. $K_{cc} = 50\%$), evitando este tipo de comportamento.

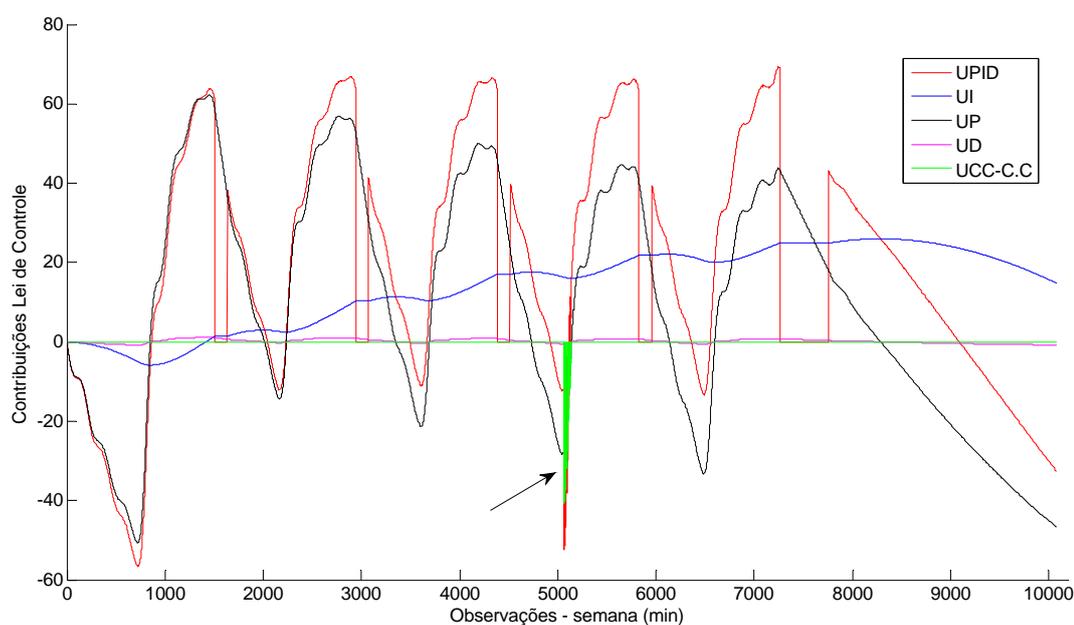


Figura 35 – Contribuições para Lei de Controle, Densidade – cenário 3 - semana 589, K_{cc} –150%
[Fonte – próprio autor]

A vazão de entrada de ácido crômico e de água, para a semana 589, (cenário 3, $K_{cc} = 150\%$), correspondente ao quarto dia de produção (5040 a 5760), período quando ocorreu a sinalização e a contribuição das cartas, pode ser visto na Figura 36. A alteração inserida nestas variáveis manipuladas é claramente identificada logo após a sinalização (2127 que ocorre no tempo de simulação 5067). Este efeito repercute na variável controlada Densidade, alterando

seu comportamento e causando aumento da diferença em relação ao modelo ajustado gerando as sinalizações das cartas.

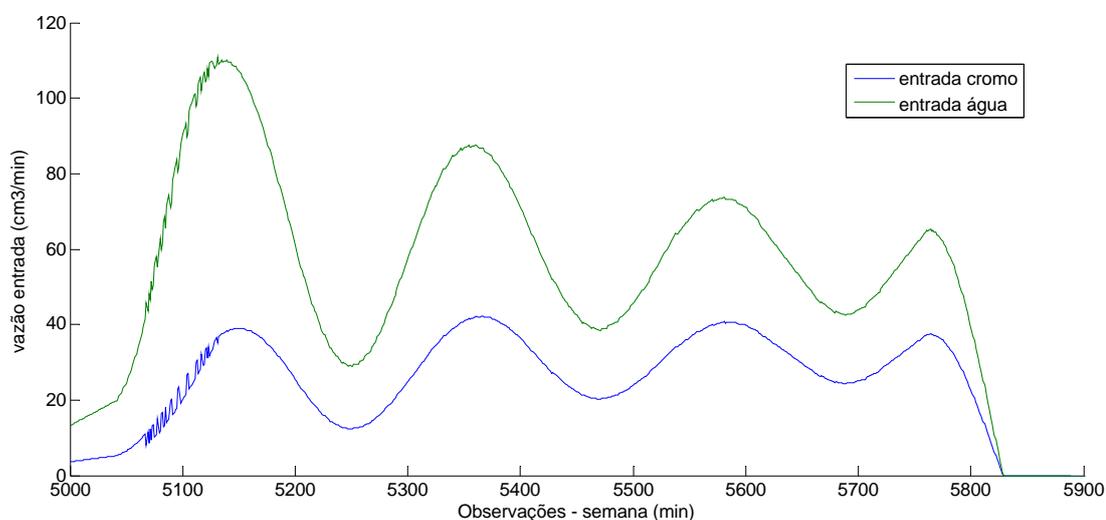


Figura 36 – Vazão de entrada ácido crômico e água, 5000 a 5800 min. – cenário 3, semana 589, Kcc-150% [Fonte – próprio autor]

Em relação às sinalizações da variável Temperatura, averiguando as ocorrências do cenário 4, pode-se notar que em ambas as semanas quando houve sinalizações (356 e 866), as temperaturas obtiveram comportamentos atípicos, se comparados ao padrão apresentado pela Figura 24(a) e Figura 14 (simulações iniciais da fase de validação). Nas Figura 37 e 40 estes comportamentos podem ser conferidos em conjunto com seus valores ajustados.

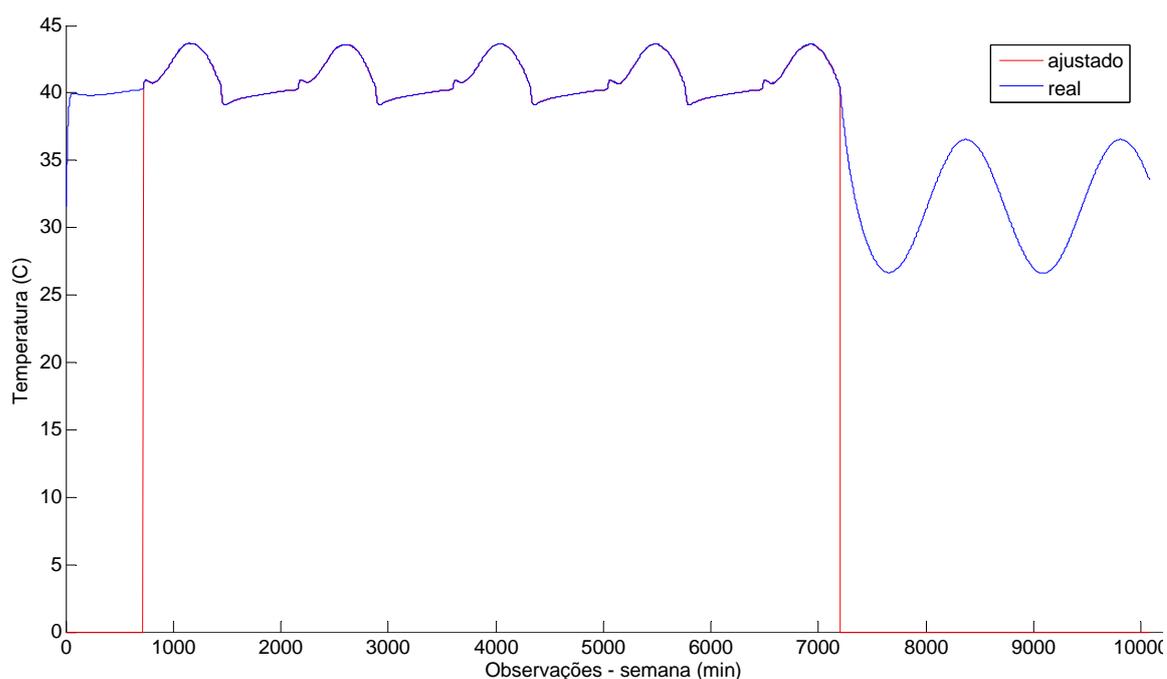


Figura 37 - Variável Temperatura, cenário 4 - semana 356 [Fonte – próprio autor]

Os resíduos da semana 356, monitorados pelas cartas de controle, podem ser observados na Figura 38. Percebe-se a distorção do comportamento e a tendência da média dos resíduos, em se deslocarem acima de linha central (LC). A sinalização, identificada pela carta EWMA, referente ao instante monitorado 2383 (minuto 5323 da semana simulada), encontra-se indicada. O comportamento, mostrado na Figura 38, é o mesmo verificado em todas as variações de ganho.

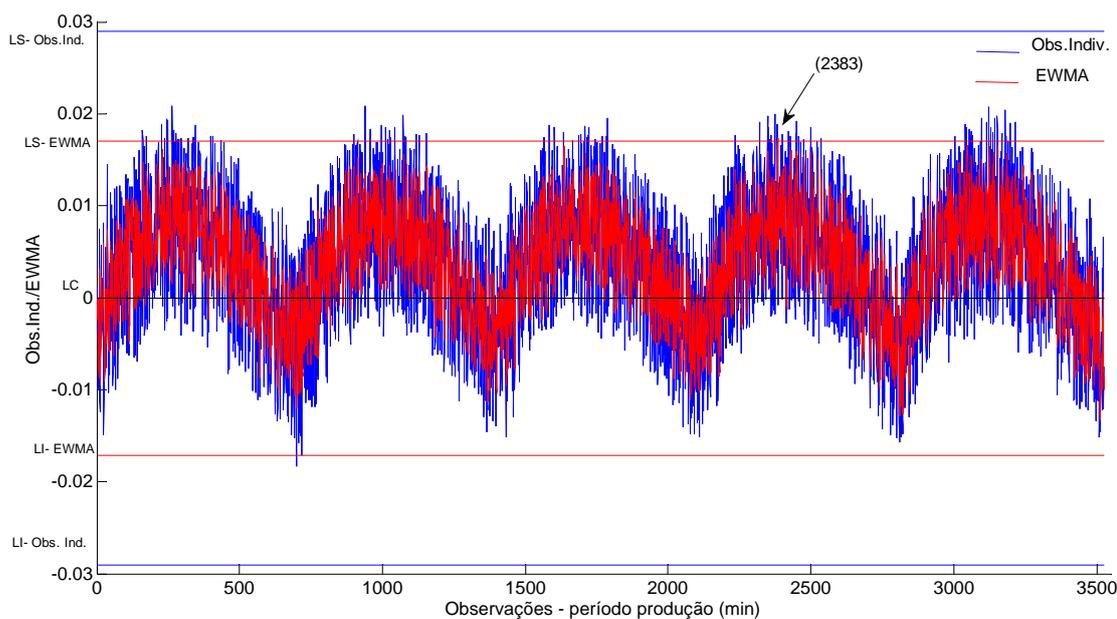


Figura 38 – Cartas de controle Observações Individuais e EWMA, variável Temperatura – cenário 4 - semana 356
[Fonte – próprio autor]

A contribuição da carta de controle, para a lei de controle do respectivo controlador, é apresentada na Figura 39. Esta Figura corresponde à versão de maior ganho ($K_{cc} = 150\%$).

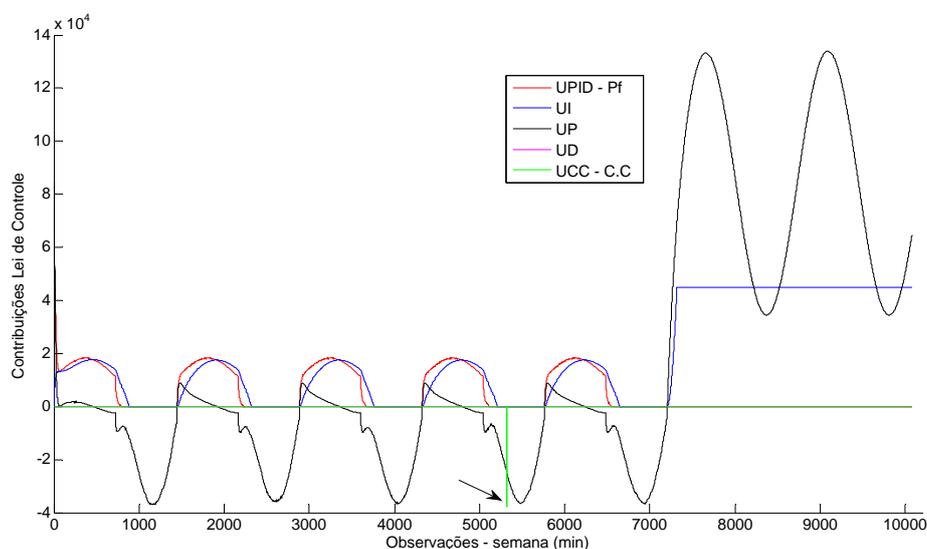


Figura 39 – Contribuições para Lei de Controle, Temperatura – cenário 4 - semana 356, $K_{cc}=150\%$
[Fonte – próprio autor]

Percebe-se que pela Figura 39, qualquer uma das versões de ganho não irá alterar o resultado, uma vez que o problema apresentado indica, ao controlador, necessidade de redução da variável manipulada (Pf), que já se encontra zerada, não podendo assumir valores negativos. Valores negativos teriam o significado físico de retirada de calor do banho (resfriamento), que este tipo de processo não possui, o qual proporcionaria a queda da temperatura. Devido a este problema, a contribuição das cartas, nestas condições, não teve efeito. A sinalização, indicando a anormalidade, por si só já contribui para salientar que algo de anormal está ocorrendo no processo com esta variável.

Pela Figura 40, correspondendo a semana 866 do cenário 4, identifica-se situação semelhante à apresentada na semana 356 (Figura 37). O comportamento distorcido, também identificado, indica uma anormalidade no comportamento desta variável controlada Temperatura. Tanto os valores observados quanto os ajustados comportam-se de forma atípica.

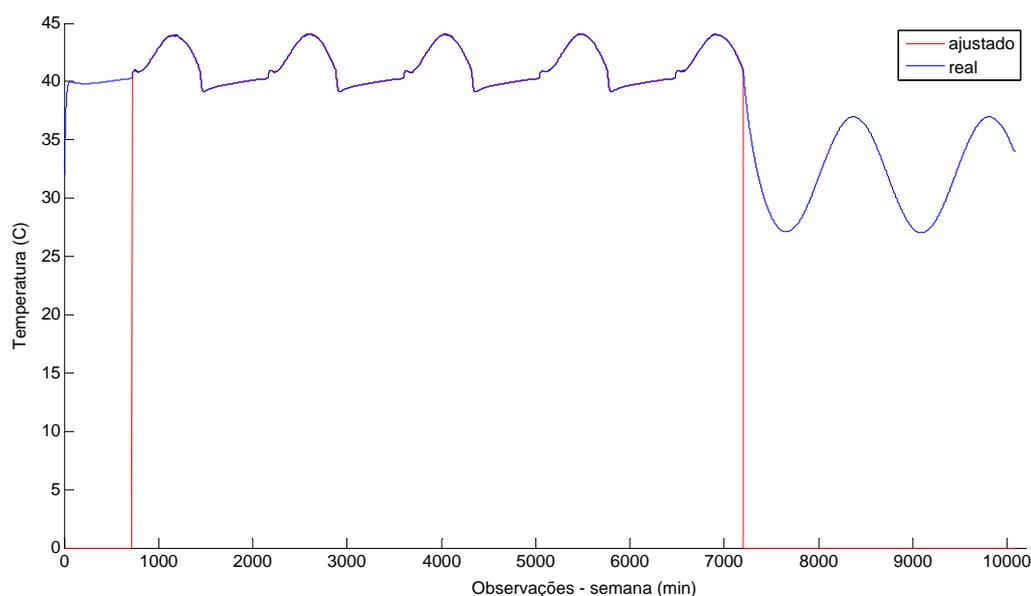


Figura 40 – Variável Temperatura, cenário 4 - semana 866
[Fonte – próprio autor]

As cartas de controle, para esta semana averiguada 866, Figura 41, também indicam a distorção do ruído com sua tendência de deslocamento acima da linha central (LC). As sinalizações constatadas estão em destaque. A mesma dificuldade do controlador em corrigir esta variável controlada, ocorrida na semana 356, repetiu-se de forma análoga na 866.

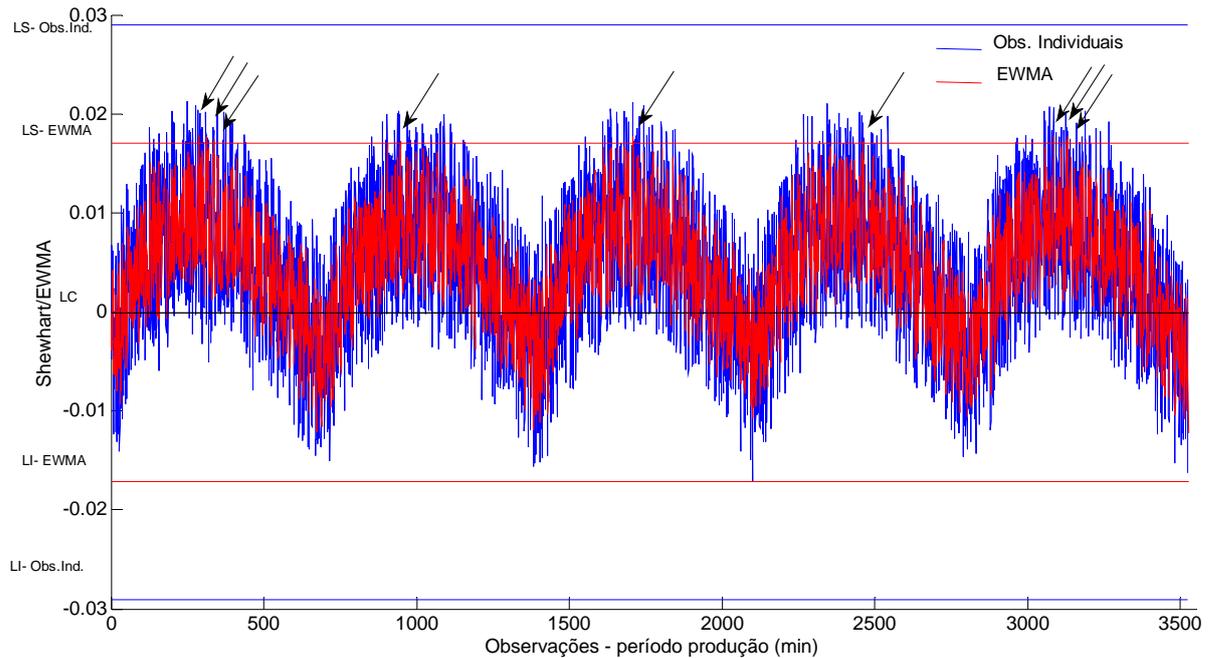


Figura 41 – Cartas de controle Observações Individuais e EWMA, variável Temperatura – cenário 4 - semana 866
[Fonte – próprio autor]

As contribuições para a lei de controle, relacionadas a cada uma das sinalizações das cartas para semana 866 do cenário 4, e considerando a condição de ganho em 150%, podem ser vistas na Figura 42. Uma vez que o efeito de resfriamento não pode ocorrer (P_f negativa), as contribuições não surtem efeito para esta anomalia específica.

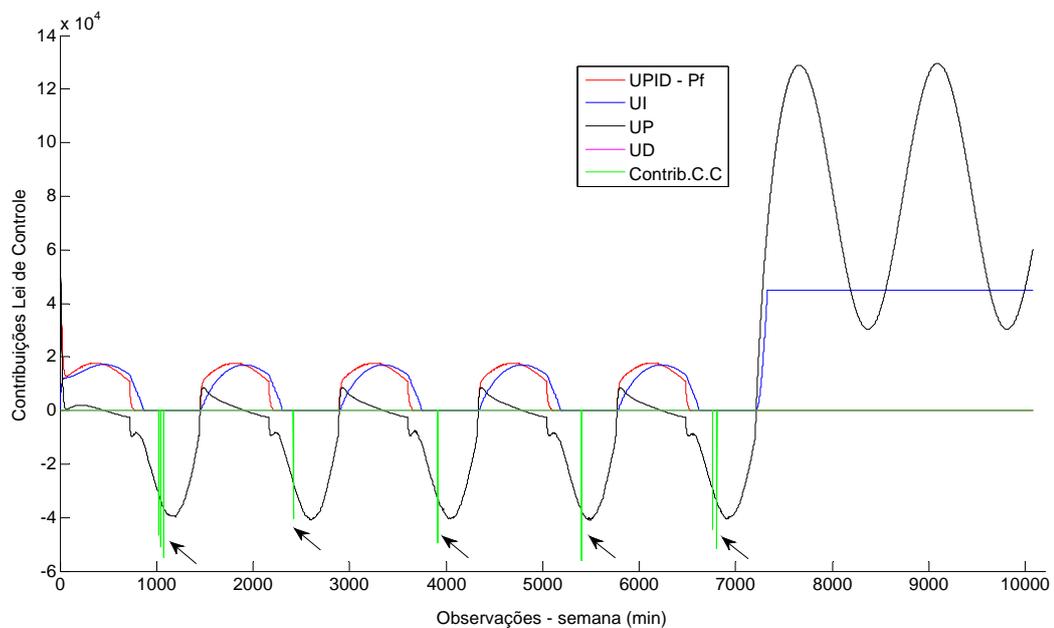


Figura 42 – Contribuições para Lei de Controle, Temperatura – cenário 4 - semana 866 , K_{cc} -150%
[Fonte – próprio autor]

Nos cenários 1, 2 e 3 não ocorreram sinalizações ligadas ao monitoramento dos resíduos da variável controlada temperatura. Nestes cenários, os valores máximos e mínimos das temperaturas registradas mantiveram-se dentro dos limites de especificação do processo (Tabela 12, subseção 4.2.6). Desta forma, não houve indícios de anormalidades ligadas à configuração dos comportamentos das variáveis envolvidas.

As sinalizações do cenário 4 foram atribuídas às variações naturais do processo, porém não deixando de ser necessário o seu acompanhamento e registro. Previdências podem ser tomadas para remediar esse efeito, quando percebido. Em ambas as repetições simuladas (356 e 899), as temperaturas médias semanais, respectivamente $31,58^{\circ}\text{C}$ e $32,00^{\circ}\text{C}$, ficaram bem acima da média semanal esperada ($18,8^{\circ}\text{C}$). Como o processo não possui sistema de resfriamento controlado, só o natural, a influência do aquecimento proveniente pela passagem da corrente de deposição, não tem como ser evitada e, com isso nestes casos extremos, esse problema de sobre aquecimento pode ocorrer. Percebe-se que o efeito somente surgiu neste cenário devido ao fato de considerar as peças grandes (maior corrente de deposição) além da velocidade de processamento ser maior. Estes fatos aumentam a contribuição do processo no aquecimento do banho.

Na Figura 43, pode ser constatado que as temperaturas médias semanais das repetições 356 e 866 se destacaram sobre as demais, inclusive ultrapassam três desvios-padrão da distribuição normal responsável pela sua geração.

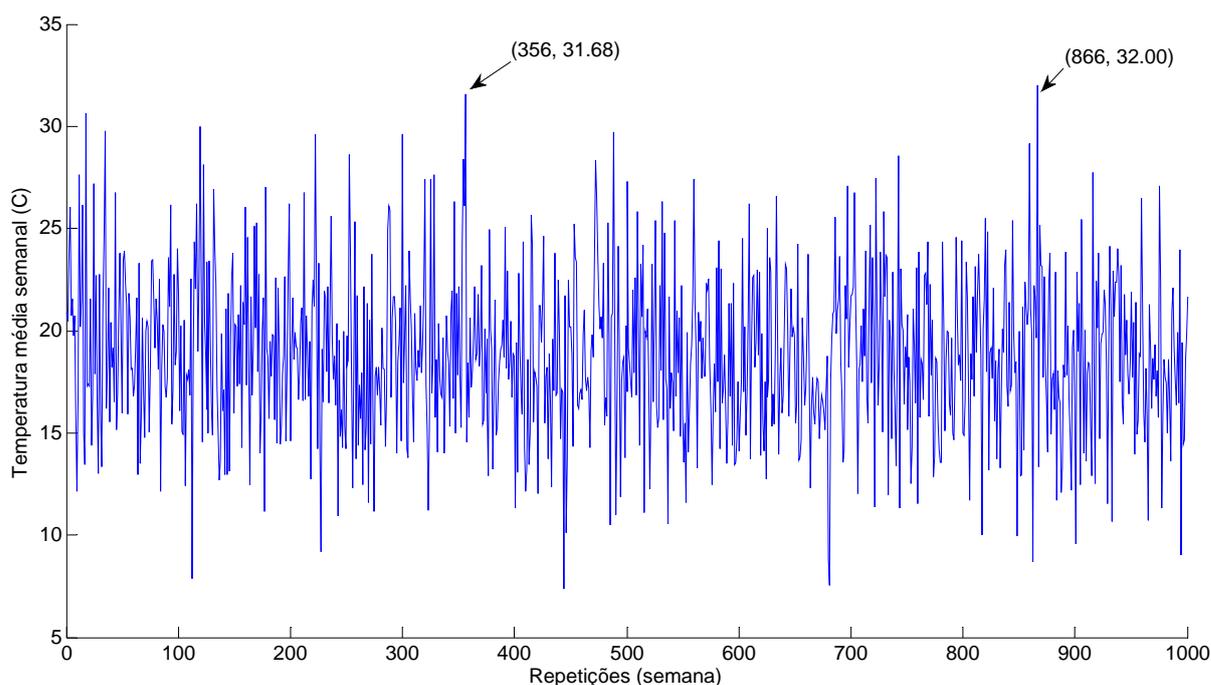


Figura 43 – Temperaturas médias semanais - cenário 4
[Fonte – próprio autor]

O problema sentido na temperatura do banho, também foi confirmado pelos responsáveis pelo processo como ocorrência eventual nos períodos críticos de verão. Nestas situações, costumam aumentar os cuidados nas inspeções de qualidade. São condições consideradas eventuais e que, pela característica do processo, não podem ser eliminadas com a forma de controle adotado. O processo pode ser monitorado para identificar a ocorrência deste efeito no futuro. As recomendações para evitar esse tipo de situação seria a de instalar um sistema de resfriamento, porém o custo é elevado para utilizações eventuais. Uma solução, mais viável, seria a de reduzir a velocidade de processamento nos períodos mais críticos ou programar para trabalhar nessas ocasiões com peças pequenas. As cartas de controle podem ser utilizadas como indícios dessas ocorrências. Para essa falha específica do processo, apesar das cartas não terem como contribuir para uma melhoria da atuação do controlador, elas sinalizaram a anormalidade existente.

Como resultado da primeira fase de simulação, percebe-se que nas operações envolvendo peças grandes, em regime acelerado de produção em dias de temperatura elevada, existe a possibilidade da temperatura do banho ultrapassar os limites de especificação do processo. As cartas podem ser empregadas para identificar estas situações extremas, porém no caso da necessidade de ação de resfriamento, o controlador do processo não pode ser influenciado diretamente. Esta seria uma situação em que o controlador não pode atuar por limitações técnicas, mas combinada com a monitoração das cartas, o efeito pode ser apontado.

No caso da variável controlada Densidade, constatou-se que se devem evitar grandes ganhos para a contribuição das cartas para melhorar a ação do sistema de controle. Percebeu-se que, como a ação proporcional já é responsável pela maior parcela da lei de controle desta variável, o auxílio das cartas, que possui uma forma similar de computar sua ação, pode causar instabilidade no sistema. Assim, os ganhos (K_{cc}) menores devem ser empregados na variável. Com base nesta verificação, para o módulo 3, são propostas modificações nos ganhos, para esta variável especificamente, sendo avaliados os valores de 25%, 50% e 75%.

4.2.7.5 Análise de desempenhos

Verificando o desempenho das opções simuladas, adotaram-se medidas que mensuram o quanto as variáveis controladas (monitoradas) estão próximas dos seus valores-alvo. Foram computados o Desvio Quadrático Médio do Alvo (DQM) e a Distância Absoluta Média do Alvo (DM) para cada uma das repetições realizadas. A média destes valores apurados de todas as repetições, separadas por cenários e condições de avaliação, estão apresentados na

Tabela 13. Estes índices foram apurados levando-se somente em consideração os períodos de produção.

Tabela 13 – Indicação de desempenho das variáveis controladas

Cenários	Condição Avaliada	Medida	Variáveis Controladas		
			Temperatura (10 ⁻³)	Nível (10 ⁻²)	Densidade (10 ⁻⁵)
C1	CEnP	DQM	111,58	0,11	0,2624
		DM	265,73	2,77	144,9388
	Kcc 0%	DQM	111,58	0,11	0,2624
		DM	265,73	2,77	144,9388
C2	CEnP	DQM	141,67	0,06	0,1610
		DM	288,59	2,08	111,3718
	Kcc 0%	DQM	141,67	0,06	0,1610
		DM	288,59	2,08	111,3718
C3	CEnP	DQM	126,35	0,17	0,3570
		DM	277,74	3,51	171,5877
	Kcc 0%	DQM	126,35	0,17	0,3570
		DM	277,74	3,51	171,5877
	Kcc 50%	DQM	126,35	0,17	0,3570
		DM	277,74	3,51	171,5877
	Kcc 100%	DQM	126,35	0,17	0,3570
		DM	277,74	3,51	171,5880
Kcc 150%	DQM	126,35	0,17	0,3570	
	DM	277,74	3,51	171,5882	
C4	CEnP	DQM	177,81	0,09	0,2412
		DM	310,72	2,59	138,2463
	Kcc 0%	DQM	177,81	0,09	0,2412
		DM	310,72	2,59	138,2463
	Kcc 50%	DQM	177,81	0,09	0,2412
		DM	310,72	2,59	138,2463
	Kcc 100%	DQM	177,81	0,09	0,2412
		DM	310,72	2,59	138,2463
Kcc 150%	DQM	177,81	0,09	0,2412	
	DM	310,72	2,59	138,2463	

[Fonte – próprio autor]

Pela Tabela 13, verifica-se que, tanto para o cenário 1 quanto para o 2, não foram encontradas alterações. Uma vez que não foram constatadas sinalizações, nenhum tipo de modificação dos comportamentos, que viesse a alterar os índices calculados, esteve presente.

No cenário 3, variável controlada Densidade, para as três primeiras condições avaliadas (CEnP, Kcc 0% e 50%), as medidas obtidas foram as mesmas. Nestas avaliações, apenas houve uma única sinalização e, conseqüentemente, uma única contribuição das cartas

para a lei de controle do controlador. Desta forma, a alteração inserida, em função da quantidade de dados utilizados no cálculo, não proporcionou alterações nos valores apurados. Porém, para as condições avaliadas Kcc 100 e 150%, como houve uma quantidade maior de sinalizações, encontraram-se alterações nestes cálculos. Conforme discutido previamente, estes ganhos acabaram por criar certa instabilidade, refletindo-se em uma maior Distância Média em relação ao Alvo (DM).

No cenário 4, variável controlada Temperatura, os índices não apresentaram alterações. Apesar das sinalizações da Carta, as contribuições para amenizar a falha diagnosticada não foram viáveis, uma vez que a correção independe do sistema de controle. As ações de controle, incluindo a das cartas, indicam a necessidade da redução da temperatura, porém, na ausência de um sistema de resfriamento, o máximo possível é o corte do aquecimento, o que o controlador já havia providenciado. Assim, não ocorreram variações na apuração das medidas de desempenho.

4.3 MÓDULO 3 - INTEGRAÇÃO DO CEnP E DO CEP COM A INSERÇÃO DE ANORMALIDADES

Neste módulo é avaliado o desempenho do sistema de controle, operando primeiramente de forma independente e, depois, de forma combinada com o controle estatístico, quando da ocorrência de falhas no processo, inseridas de forma proposital. São criadas situações de anormalidades com o propósito de verificar o comportamento do processo de modo que os valores das variáveis controladas (monitoradas) sejam mantidos o mais próximo dos seus valores-alvo.

4.3.1 Introdução de forma intencional de falha no processo e/ou componente

Como uma forma de avaliar o comportamento do controlador operando de forma isolada e este em conjunto com o controle estatístico, três tipos de falhas são criadas. Como falha, consideraram-se os distúrbios ocorridos no processo, alterando sua condição de funcionamento, cuja falta de correção pode vir a comprometer a sua operação e interferir na qualidade dos produtos.

Para estabelecer as condições de anormalidades buscou-se recriar situações já ocorridas no processo real, tomando-se, por base, relatos dos responsáveis pela manutenção do processo recriado neste estudo. Cada uma das situações está atrelada a um tipo de

característica. A primeira a ser abordada envolve falha mecânica de componente do processo, a segunda, abrange problema relacionado à medição e controle e a terceira, consiste em descontrolar uma variável manipulada.

A primeira falha simulada foi a do vazamento do tanque utilizado para o banho de cromagem. Este tipo de problema pode ocorrer, uma vez que o material utilizado na sua construção é de polipropileno, o qual não suporta choques mecânicos de grande intensidade. Na operação de colocação e retirada das gancheiras no banho, ocasionalmente, ocorre a queda de uma delas dentro do tanque. Quando esta situação ocorre com peças grandes, com pesos maiores, pode causar furos no fundo do reservatório. O reservatório encontra-se em local de difícil verificação de vazamentos (principalmente o seu fundo) e todo o entorno possui uma bacia de contenção (exigência ambiental), com grande quantidade de líquido sendo recolhido de todo o processo, facilmente este problema pode passar despercebido. Assim, admitiu-se um vazamento constante de 200 ml por minuto, após um instante determinado para início da falha. Esta vazão foi estimada tomando-se por base um problema real ocorrido no processo avaliado, na qual esta quantidade foi estimada.

A segunda falha simulada e avaliada foi de um problema com o sensor de densidade. Este sensor é fixado na lateral do tanque, e a circulação do líquido em seu interior proporciona a leitura. Podem ocorrer problemas em sua medição por falta de calibração periódica ou mesmo algum tipo de sujeira que venha a se fixar em seu interior. Considerou-se a falha de leitura de densidade 1% acima do correto, após determinado instante de início da ocorrência. Esta informação errônea, que retorna ao controlador pelo sistema de realimentação, é considerada para a sua correção automática. O percentual de erro de leitura do sensor foi estipulado, visando-se verificar o efeito de um erro, considerado pequeno, sobre a variável controlada Densidade. Segundo avaliação do responsável técnico pelo processo estudado, este percentual geralmente atinge valores maiores que o utilizado na simulação (avarias e perda de calibração do sensor).

A terceira falha corresponde à variável manipulada Pf (Potência Fornecida às Resistências). Esta variável depende de uma alimentação elétrica e de uma fonte de controle para sua manipulação. Os equipamentos elétricos, de padrão industrial, são projetados para trabalhar de forma satisfatória, mesmo na ocorrência de quedas de tensão de alimentação de 10 a 15% de sua condição nominal. Reproduzindo uma possível queda de tensão no sistema de alimentação, admitiu-se uma situação em que o percentual ultrapassasse ligeiramente estes limites tolerados, garantindo a sensibilidade da falha, no caso de 20%. Esta falha pode ser causa interna à empresa (fonte de controle – atuador - com problemas de funcionamento) ou

mesmo da alimentação da própria concessionária de energia elétrica (rede de alimentação). Simulou-se esta condição a partir de um determinado instante da semana.

O instante arbitrado, para início das ocorrências dos três tipos de falhas, foi o minuto 5100, correspondendo ao terceiro dia de produção (quinta-feira), uma hora após o início da jornada de trabalho. Este instante foi seguido para todas as falhas criadas e suas respectivas repetições. As falhas foram inseridas e avaliadas isoladamente. Visando facilitar as análises, não foram consideradas as ocorrências de anormalidades simultâneas, apenas uma em cada rodada (semana simulada) de cada situação avaliada.

4.3.2 Cenários a serem avaliados

Para efeito de avaliação, os mesmos quatro cenários criados no módulo 2, foram considerados em cada uma das falhas simuladas. Nestas situações simuladas, os dois ritmos de produção (normal e alto) e os dois tamanhos de peças processadas (pequenas e grandes) são empregados.

4.3.3 Simulação do processo

Como as condições operacionais do processo já foram definidas no módulo 2, as etapas de simulação 1 e 2 daquele módulo, não necessitam ser recalculadas: simulação preliminar com o controlador operando isoladamente e simulação para obtenção da parametrização das cartas de controle. Nesta condição, somente as operações equivalentes às etapas 3 e 4 são realizadas (controlador operando isoladamente e a integração CEnP e CEP).

O processo é simulado, inicialmente, com a versão CEnP, na qual os dados gerados para as variações naturais inerentes ao processo e para a criação dos cenários são armazenados. Estes dados são resgatados nas versões de integração com o controle estatístico. Cabe ressaltar que são gerados outros dados, não sendo os mesmos do módulo 2.

As condições de simulação no Pacote Computacional MatLab também são mantidas, ocorrendo de forma contínua, recriando-se uma semana típica de trabalho em intervalos de 1 minuto. O número de repetições não foi alterado, mantendo-se as mesmas 1000 anteriormente consideradas. As cartas de controle monitoram somente os períodos de produção. As duas etapas de simulação estabelecidas na etapa metodológica, para este módulo, são seguidas.

4.3.3.1 Simulação do processo em operação com o controlador

Os cenários são simulados com o controlador operando de forma isolada. Todas as variáveis geradas, variações naturais inerentes ao processo e de cada cenário, são armazenadas para recriar as mesmas condições operacionais para as versões de integração.

O controlador busca, com sua sintonia programada, compensar os desvios percebidos redirecionado à variável controlada para o seu Alvo. As situações de falhas não são previstas na lei de controle do controlador, o qual procura se ajustar constantemente. Em dado momento, após a inserção da falha, encontra dificuldades de manter, com a mesma eficiência, a variável controlada próxima ao Alvo programado. As cartas de controle não são empregadas nesta fase.

A parametrização do controlador e sua sintonia, realizadas no módulo 1, são mantidas em todas as fases de simulação. O controlador não passou por reajustes.

4.3.3.2 Simulação do processo com integração CEnP e CEP

Considerando-se os sistemas de produção e controle já estabelecidos no módulo 2, e sendo os mesmos cenários avaliados, os modelos ARIMA não foram alterados para determinação dos resíduos a serem monitorados pelas cartas de controle, (Tabela 8). Com a manutenção dos mesmos cenários, e considerando que o controle estatístico já se encontra sob controle (Fase II), os parâmetros do módulo 2 (Tabela 9) das cartas também são mantidos.

As variáveis geradas, quando da operação do controlador isoladamente, responsáveis pela criação das variações naturais inerentes ao processo e pelos cenários, são resgatadas do banco de dados. A repetição dos mesmos comportamentos possibilita a comparação direta entre as formas de operação.

Visando análises posteriores, as sinalizações de cada uma das cartas de controle (Obs. Individuais e EWMA) de cada uma das variáveis, são armazenadas individualmente. O sistema de autoajuste, proposto no módulo 2 é realizado também em quatro rodadas. Estas rodadas, além de considerar todos os cenários, correspondem às quatro condições de ganho de contribuição para a lei de controle do respectivo controlador. Estes ganhos são abordados na subseção 4.3.4 seguinte.

4.3.4 Intervenções nas sinalizações de anormalidades

Utilizando-se os mesmos procedimentos adotados no módulo 2 foram consideradas as mesmas formas de autoajustes propostas, interferindo na lei de controle do controlador. Nos instantes quando ocorrem sinalizações, são computadas as componentes de erro entre os valores-alvo e os previsto para o minuto seguinte, das variáveis cujas indicações são geradas. O valor da previsão utilizada é baseado no modelo ARIMA, correspondente à variável em que ocorreu a sinalização (carta de Obs. Individuais), ou este combinado com o valor da estatística da carta EWMA (equações 46, 48 e 49).

Complementando a especificação, os ganhos (K_{cc}) da contribuição de cada uma das variáveis também são determinados e utilizaram-se os mesmos valores empregados no módulo 2, sendo que, em função dos resultados encontrados na avaliação daquele módulo, as proporções estabelecidas para a variável densidade (r) foram reduzidas devido à instabilidade criada. Para esta variável, os ganhos avaliados ficaram em 25, 50 e 75% do valor original do ganho proporcional do controlador, buscando-se assim, reduzir este efeito percebido. Os valores dos ganhos de contribuição das cartas para a lei de controle, utilizados em cada uma das situações avaliadas estão representados na Tabela 14.

Tabela 14 – Ganhos Avaliados na Interferência das Cartas de Controle

Ganho por variável	Variável Monitorada Tb	Variável Monitorada H	Variável Monitorada r
Kcc - 0 / 0 / 0%	0	0	0
Kcc - 50 / 50 / 25%	5000	40	5000
Kcc - 100 / 100 / 50%	10000	80	10000
Kcc - 150 / 150 / 75%	15000	120	15000

[Fonte – próprio autor]

Visando reproduzir situações mais próximas à realidade, considerou-se que a intervenção, sanando a falha no processo, ocorre em trinta minutos após o instante da ocorrência da primeira sinalização, de qualquer uma das cartas. Tempo estipulado como sendo necessário para a identificação e eliminação do problema por parte dos operadores do processo. Para efeito de simulação, em qualquer uma das falhas criadas, após este intervalo, a anormalidade deixa de existir, continuando a operação dos ajustes a cargo do controlador. Para a condição do CEnP operando de forma independente, quando da ocorrência da falha, não houve qualquer tipo interferência no seu sistema de gerenciamento até o final do período (semana) simulado.

Todos os cenários são simulados com todas as variações do ganho K_{cc} , sob as mesmas condições operacionais. São utilizadas, respectivamente, para cada rodada as mesmas

variações naturais inerentes ao processo armazenadas na rodada CEnP e parâmetros da cartas de controle e do controlador.

Neste módulo, também ocorrendo sinalizações, o sistema busca automaticamente o seu autoajuste. Por se tratar de simulação, a análise das sinalizações registradas, relacionadas com as falha criadas, é realizada posteriormente. Não são realizadas outras intervenções no sistema além das de autoajuste.

4.3.5 Registro das informações das variáveis do controlador e das cartas de controle

Os dados provenientes das rodadas de simulação, envolvendo todos os cenários e todas as variações ligadas à integração com o controle estatístico (ganhos K_{cc}), são armazenados em dois bancos de dados. Um específico para o CEnP operando isoladamente e outro, para as versões de integração. Proveniente do módulo 2, as informações iniciais e parâmetros das cartas de controle são resgatados de um banco de dados criados naquele módulo, e utilizados sem que seus valores sejam alterados.

4.3.6 Todos os cenários testados?

Um controle da sequência de simulações é realizado de forma a garantir que todos os cenários constantes na Figura 23 sejam testados. Assim, a falha criada é avaliada em todas as condições operacionais consideradas para o processo estudado. As simulações foram realizadas individualmente, registrando e controlando todas as combinações necessárias à criação dos cenários em todas as condições avaliadas.

4.3.7 Todas as falhas testadas?

Um controle de organização das simulações garante que, todas as falhas foram simuladas em todos os cenários e situações de integração com o controle estatístico. Todas as falhas são simuladas nas mesmas condições de operação.

A verificação das sinalizações e análise dos dados é realizada somente após todas elas terem sido simuladas nas duas situações: controlador isoladamente e controlador operando em conjunto com as cartas de controle. Esta última em suas quatro variações.

4.3.8 Verificação das sinalizações e identificações das anormalidades criadas

Através dos dados registrados nos bancos de dados, cada falha pode ser analisada individualmente. Na sequência, com os instantes das falhas criadas, com as sinalizações e os momentos de sua percepção, é possível verificar a ação do controle estatístico em identificar as anormalidades.

4.3.8.1 Falha devido ao vazamento do tanque

Considerando a falha simulada do vazamento do tanque, depois de computadas as 1000 repetições programadas, resultaram na quantidade de semanas com ocorrências apresentadas na Tabela 15. Nesta tabela, está indicada a quantidade de repetições com sinalizações por tipo de carta de controle e levando-se em consideração os cenários e os ganhos de contribuição para o controlador no sistema de autoajuste.

Tabela 15 – Quantidade de repetições com sinalizações por tipo de Carta de Controle e cenário – Falha vazamento do tanque

Cenário	Ganho K_{cc}	Temperatura		Nível		Densidade	
		Obs. Indiv.	EWMA	Obs. Indiv.	EWMA	Obs. Indiv.	EWMA
C1	0/0/0%	0	0	1000	1000	0	553
	50/50/25%	0	0	1000	1000	1000	1000
	100/100/50%	0	0	1000	1000	1000	1000
	150/150/75%	0	0	1000	1000	1000	1000
C2	0/0/0%	0	0	1000	1000	17	949
	50/50/25%	0	0	1000	1000	1000	1000
	100/100/50%	0	0	1000	1000	1000	1000
	150/150/75%	0	0	1000	1000	1000	1000
C3	0/0/0%	0	0	1000	1000	0	362
	50/50/25%	0	0	1000	1000	1000	1000
	100/100/50%	0	0	1000	1000	1000	1000
	150/150/75%	0	0	1000	1000	1000	1000
C4	0/0/0%	0	0	1000	1000	6	819
	50/50/25%	0	0	1000	1000	1000	1000
	100/100/50%	0	0	1000	1000	1000	1000
	150/150/75%	0	0	1000	1000	1000	1000

[Fonte – próprio autor]

A falha criada é identificada pelas duas cartas de controle, monitorando a variável controlada nível, em todas as semanas simuladas (1000). Assim, a falha é verificada na totalidade das repetições.

Como o comportamento de reposição automático do banho está atrelado ao controle da variável densidade, as cartas ligadas a esta variável também sinalizam anormalidades. Nas condições de ganho K_{cc} nulo, estas cartas sinalizaram uma quantidade menor de ocorrências, uma vez que o vazamento retira quantidade iguais das componentes do banho (água e ácido crômico), e a reposição é realizada de forma próxima ao padrão não causando alterações que gerem sinalizações em todas as repetições. Algumas das semanas, quando não houve a

constatação de sinalizações, foram avaliadas e pode-se perceber que nas condições de $K_{cc} \neq 0$, devido ao autoajuste do controlador, proporcionado pelas cartas monitorando a variável nível, o comportamento padrão de reposição é alterado e, com isso, as sinalizações ligadas à densidade são obtidas na totalidade de repetições. Os efeitos ligados ao desempenho em manter as variáveis mais próximas ao Alvo são apresentados na subseção 4.3.9. Pelo levantamento realizado, não houve sinalização por parte das cartas que monitoram a variável temperatura.

Os instantes médios da primeira sinalização e os respectivos desvios-padrão, realizados pelo controle estatístico, são apresentados na Tabela 16. Esses valores correspondem ao primeiro momento de indicação das cartas (de Observações Individuais ou EWMA) de cada uma das variáveis, considerando-se as 1000 repetições. Nota-se a rápida percepção das cartas monitorando a variável nível em todos os cenários. Com relação às primeiras identificações médias da variável densidade, pode-se perceber que, quanto maior o autoajuste realizado pelas cartas monitorando o nível (maior ganho K_{cc}), maior é a interferência na reposição do banho, e conseqüentemente, na variável densidade. Isto ocasiona a percepção mais antecipada pelas cartas que monitoram esta variável. Nas condições de $K_{cc} = 0$, nem todas as repetições acusaram sinalizações (ver Tabela 15), com isso, no cômputo dos instantes de identificação inicial médios para a variável densidade, consideraram-se apenas as semanas com sinalização.

A Figura 44, correspondendo à repetição 100 do cenário 2, $K_{cc}=0$, quinta-feira exemplifica uma sinalização típica obtida da falha criada no minuto 5100. Corresponde ao ponto 2160 da figura, pois a carta monitora somente os períodos de produção. Percebe-se que a primeira sinalização, com ambas as cartas, ocorre no ponto monitorado 2162 (minuto 5102 da semana). Mesmo a falha sendo considerada sanada no ponto monitorado 2192 (minuto 5132 da semana), nota-se que enquanto o processo não volta a sua condição operacional, as sinalizações continuam a acontecer. Com a eliminação brusca da falha no ponto 2192, uma perturbação é percebida devido ao controlador estar se ajustando à nova condição de manipulação. A última sinalização desta repetição é registrada no ponto 2313 (instante 5253 da semana típica).

Tabela 16 – Instante Médio de Identificação por cenário e ganhos K_{cc} – Falha vazamento do tanque

Cenário	Ganho K_{cc}	Temperatura	Nível	Densidade
C1	0/0/0%	-	5102 (0,12)	5208,7 (*) (46,30)
	50/50/25%	-	5102 (0,12)	5125,5 (17,41)
	100/100/50%	-	5102 (0,12)	5104,2 (0,53)
	150/150/75%	-	5102 (0,12)	5104 (0,07)
C2	0/0/0%	-	5102 (0,09)	5184,1 (*) (53,18)
	50/50/25%	-	5102 (0,09)	5118,1 (16,43)
	100/100/50%	-	5102 (0,09)	5104,2 (0,55)
	150/150/75%	-	5102 (0,09)	5104 (0,06)
C3	0/0/0%	-	5102 (0,13)	5201,2 (*) (50,59)
	50/50/25%	-	5102 (0,13)	5120,1 (17,52)
	100/100/50%	-	5102 (0,13)	5104,2 (0,23)
	150/150/75%	-	5102 (0,13)	5104 (0,07)
C4	0/0/0%	-	5102 (0,10)	5184,2 (*) (54,09)
	50/50/25%	-	5102 (0,10)	5116,7 (16,32)
	100/100/50%	-	5102 (0,10)	5104,2 (0,49)
	150/150/75%	-	5102 (0,10)	5104 (0,03)

Valores entre parênteses correspondem aos desvios-padrão.

(*) Valor médio considerando somente as repetições onde houve sinalizações

[Fonte – próprio autor]

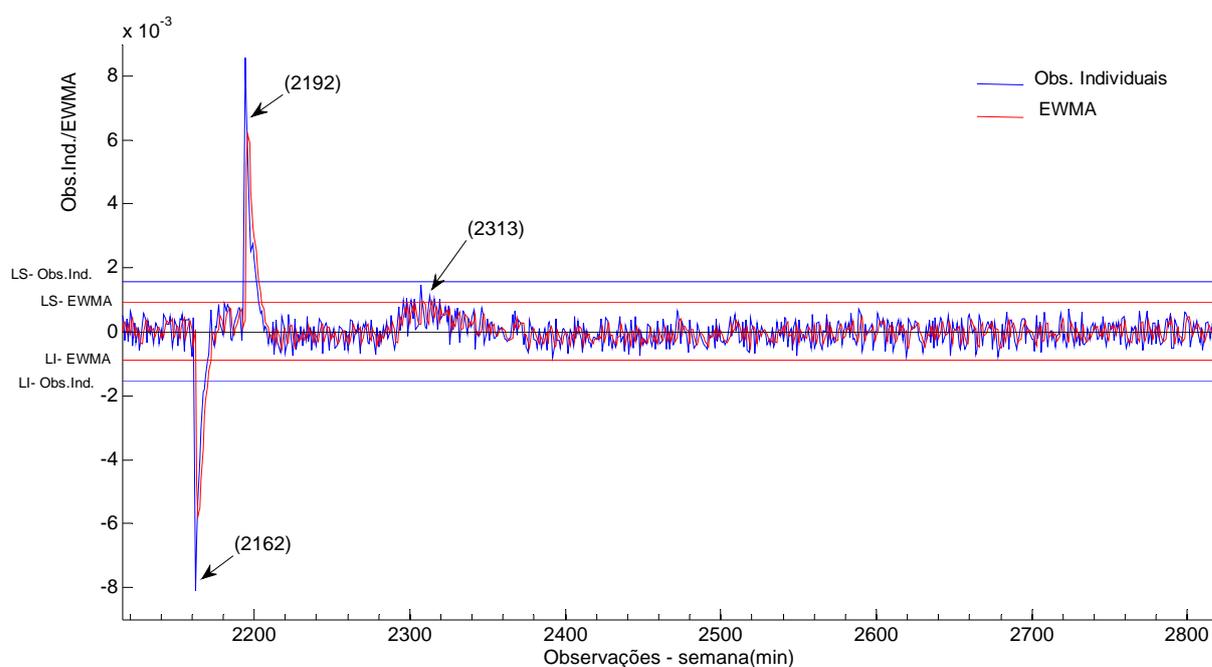


Figura 44 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Nível – cenário 2 - semana 100, $K_{cc}=0$, quinta-feira

[Fonte – próprio autor]

Na Figura 45, também correspondendo à repetição 100 do cenário 2, $K_{cc} = 0$, quinta-feira, pode-se observar ambas as cartas de controle monitorando a variável densidade. A primeira sinalização, constatada pela carta EWMA e pela de Observações Individuais, foi no ponto monitorado 2201 (minuto 5141 da semana). Com a reposição dos produtos no banho, onde o controlador busca repor a quantidade extra, compensando o vazamento, a carta de controle da densidade também percebe a situação anormal. A última sinalização é registrada pela carta EWMA no ponto monitorado 2299 (minuto 5239 da semana). Em período anterior à sinalização do ponto 2201, percebe-se um deslocamento para baixo da linha central, porém não chegando a ultrapassar os limites inferiores estabelecidos.

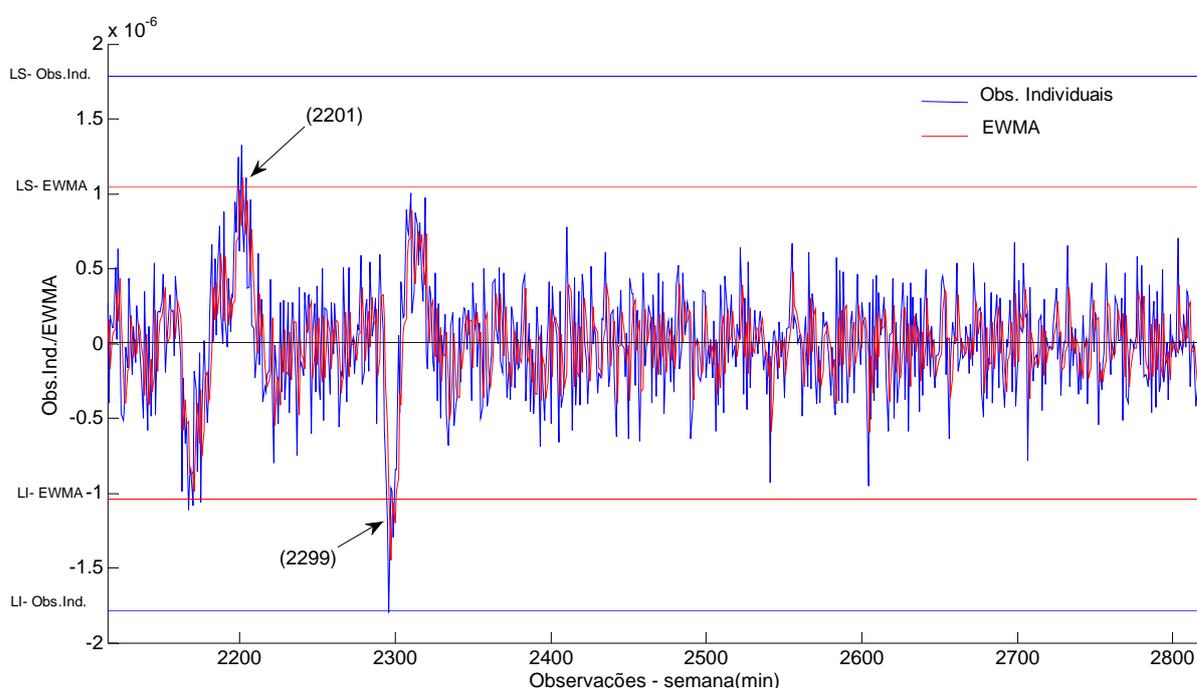


Figura 45 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Densidade – cenário 2 - semana 100, $K_{cc} = 0$, quinta-feira
[Fonte – próprio autor]

4.3.8.2 Falha no sensor de densidade

Realizando as 1000 repetições da semana típica, levando em consideração a falha no sensor de densidade, a Tabela 17 apresenta a quantidade de semanas nas quais houve sinalizações. Percebe-se que em todas as repetições ocorreu a indicação. Esta anormalidade não teve influência que viesse a ser percebida pelas cartas das demais variáveis.

Independente do cenário ou mesmo de variações dos ganhos de contribuição (K_{cc}) para o sistema de autoajuste, não foram percebidas outras sinalizações ou constatações de problemas. Somente a falha programada foi capturada por ambas as cartas.

Tabela 17 – Quantidade de repetições com sinalizações por tipo de Carta de Controle e cenário – Falha sensor densidade

Cenário	Ganho K_{cc}	Temperatura		Nível		Densidade	
		Obs. Indiv.	EWMA	Obs. Indiv.	EWMA	Obs. Indiv.	EWMA
C1	0/0/0%	0	0	0	0	1000	1000
	50/50/25%	0	0	0	0	1000	1000
	100/100/50%	0	0	0	0	1000	1000
	150/150/75%	0	0	0	0	1000	1000
C2	0/0/0%	0	0	0	0	1000	1000
	50/50/25%	0	0	0	0	1000	1000
	100/100/50%	0	0	0	0	1000	1000
	150/150/75%	0	0	0	0	1000	1000
C3	0/0/0%	0	0	0	0	1000	1000
	50/50/25%	0	0	0	0	1000	1000
	100/100/50%	0	0	0	0	1000	1000
	150/150/75%	0	0	0	0	1000	1000
C4	0/0/0%	0	0	0	0	1000	1000
	50/50/25%	0	0	0	0	1000	1000
	100/100/50%	0	0	0	0	1000	1000
	150/150/75%	0	0	0	0	1000	1000

[Fonte – próprio autor]

Os instantes de indicação médios das primeiras sinalizações, e respectivos desvios-padrão, para esta falha, constam na Tabela 18. Os valores foram apurados considerando, de forma independente, cada cenário e as demais condições de ganhos (K_{cc}) para o sistema de autoajuste. As sinalizações ocorreram em média no minuto 5103, em todas as condições avaliadas. Como apenas sinalizaram as cartas ligadas à densidade, as demais não apresentaram indicações de instantes iniciais.

Exemplificando a sinalização para este tipo de falha, a Figura 46 apresenta como se deu a ocorrência na repetição 500 do cenário 1, $K_{cc} = 0$, quinta-feira. Percebe-se que ambas as cartas sinalizaram sua primeira indicação no ponto monitorado 2163 (minuto 5103 da semana). A última sinalização, pela carta EWMA, ocorreu na observação 2232 (minuto 5172 da semana típica). Neste tipo de falha simulada, também as sinalizações deixam de ocorrer em período posterior à eliminação da falha que, no caso em questão seria no ponto 2193 (minuto 5133 da semana). Nota-se que, pela ordem de grandeza dos valores monitorados (erros de ajuste), pequenas alterações no comportamento da variável controlada proporcionam erros relativamente altos. Estes erros são os responsáveis pelas sinalizações das cartas de controle.

Tabela 18 – Instante Médio de Identificação por cenário e ganhos K_{cc} – Falha sensor densidade

Cenário	Ganho K_{cc}	Temperatura	Nível	Densidade
C1	0/0/0%	-	-	5103 (0,11)
	50/50/25%	-	-	5103 (0,11)
	100/100/50%	-	-	5103 (0,11)
	150/150/75%	-	-	5103 (0,11)
C2	0/0/0%	-	-	5103 (0,13)
	50/50/25%	-	-	5103 (0,13)
	100/100/50%	-	-	5103 (0,13)
	150/150/75%	-	-	5103 (0,13)
C3	0/0/0%	-	-	5103 (0,12)
	50/50/25%	-	-	5103 (0,12)
	100/100/50%	-	-	5103 (0,12)
	150/150/75%	-	-	5103 (0,12)
C4	0/0/0%	-	-	5103 (0,15)
	50/50/25%	-	-	5103 (0,15)
	100/100/50%	-	-	5103 (0,15)
	150/150/75%	-	-	5103 (0,15)

Valores entre parênteses correspondem aos desvios-padrão.

[Fonte – próprio autor]

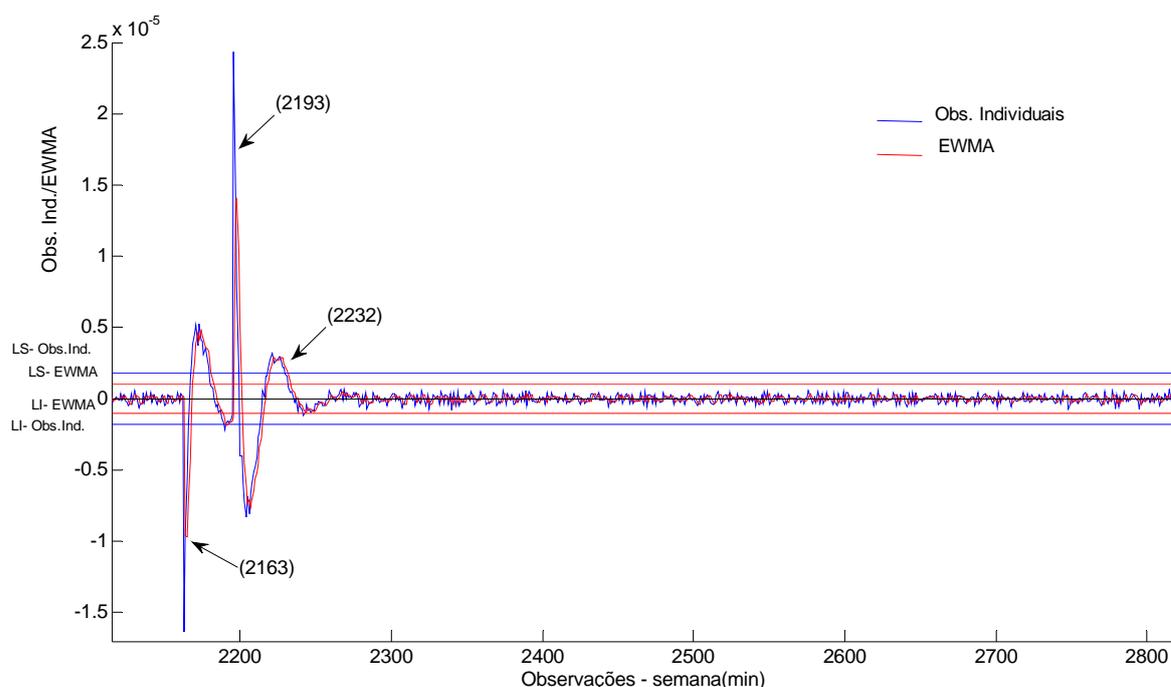


Figura 46 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Densidade – cenário 1 - semana 500, $K_{cc} = 0$, quinta-feira
[Fonte – próprio autor]

4.3.8.3 Falha variável manipulada P_f

A terceira falha criada corresponde à variável manipulada P_f . A simulação de uma queda de tensão no sistema de alimentação de energia elétrica, que vem a interferir nesta variável manipulada, reduz a sua contribuição para o aquecimento do banho. Assim é reproduzida a dificuldade que o sistema de controle passa a ter no gerenciamento da temperatura do banho.

Após as 1000 repetições, a Tabela 19 sintetiza o total de semanas com sinalizações. Pode-se perceber que somente as cartas ligadas à variável controlada temperatura apresentaram sinalizações e, mesmo assim, não na totalidade de repetições.

A influência dos cenários é percebida na quantidade de sinalizações. Nos cenários 1 e 3, sujeitos aos menores valores relacionados ao aquecimento do banho, proporcionados pela passagem da corrente de deposição (interferindo diretamente na temperatura), possuem números maiores de repetições com sinalizações. Nos cenários 2 e 4, com valores maiores de contribuição para o aquecimento do banho, obtiveram um número menor de sinalizações.

Ao analisar a Tabela 19, percebe-se na carta de controle de Obs. Individuais uma quantidade menor de falhas, nas duas condições iniciais avaliadas de ganho para o sistema de autoajuste (K_{cc}). Nas demais condições de ganho, com as contribuições para o controlador passaram a identificar as mesmas quantidades da carta EWMA.

Tabela 19 – Quantidade de repetições com sinalizações por tipo de Carta de Controle e cenário – Falha variável manipulada P_f

Cenário	Ganho K_{cc}	Temperatura		Nível		Densidade	
		Obs. Indiv.	EWMA	Obs. Indiv.	EWMA	Obs. Indiv.	EWMA
C1	0/0/0%	869	917	0	0	0	0
	50/50/25%	900	917	0	0	0	0
	100/100/50%	917	917	0	0	0	0
	150/150/75%	917	917	0	0	0	0
C2	0/0/0%	754	826	0	0	0	0
	50/50/25%	805	826	0	0	0	0
	100/100/50%	826	826	0	0	0	0
	150/150/75%	826	826	0	0	0	0
C3	0/0/0%	852	909	0	0	0	0
	50/50/25%	884	909	0	0	0	0
	100/100/50%	909	909	0	0	0	0
	150/150/75%	909	909	0	0	0	0
C4	0/0/0%	733	822	0	0	0	0
	50/50/25%	822	822	0	0	0	0
	100/100/50%	822	822	0	0	0	0
	150/150/75%	822	822	0	0	0	0

[Fonte – próprio autor]

Averiguando as repetições sem sinalizações de todos os cenários, percebeu-se que basicamente ocorreram situações de repetições com a temperatura média ambiente alta, coincidindo, logo após a inserção da falha, com uma sequência de valores altos da variável de distúrbio, ligada ao aquecimento do banho pela corrente de deposição (auxiliando a manter a temperatura, mais favorável ao controlador). Estas condições causaram oscilações nas cartas, porém, não chegando a realizar sinalizações. A Figura 47 apresenta esta situação, considerando-se o cenário 3, repetição 24, destacando o período de inserção da falha (ponto monitorado 2160).

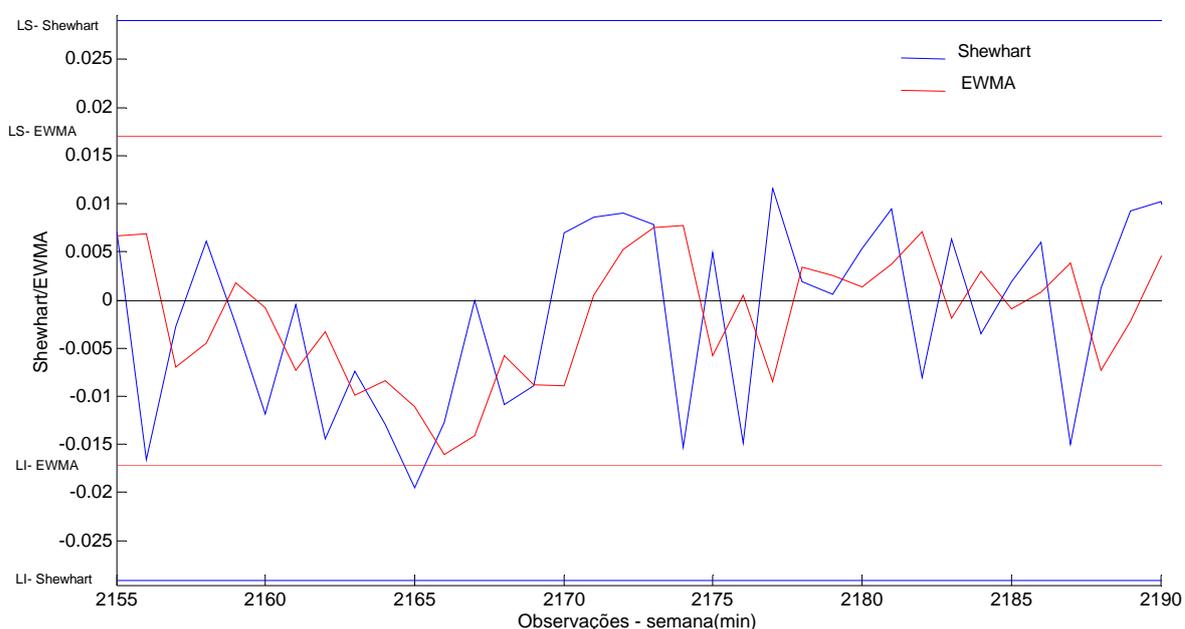


Figura 47 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Temperatura, repetições sem sinalizações – cenário 3 - semana 24
[Fonte – próprio autor]

Os pontos médios de identificação inicial e seus respectivos desvios-padrão, da falha criada, podem ser visto na Tabela 20. Neste tipo de situação, as cartas também acusaram rapidamente a anormalidade, demorando em média 2,5 unidades de tempo para identificação (anormalidade inserida em 5100). Os valores apurados consideram a média dos instantes das primeiras sinalizações. Não entraram no cômputo as repetições em que não houve indicação por nenhuma carta.

A sinalização de uma quinta-feira típica pode ser vista na Figura 48, correspondendo à repetição 750 do cenário 4, $K_{cc} = 0$. A primeira sinalização ocorreu no ponto monitorado 2163 (minuto 5103 da semana). A última sinalização constatada foi registrada no ponto monitorado 2200 (instante 5140 da semana). A carta continua sinalizando enquanto a variável controlada

não volta ao seu comportamento padrão. Não foram constatadas sinalizações relacionadas a outras falhas, a não ser as causadas intencionalmente.

Tabela 20 – Instante Médio de Identificação por cenário e ganhos K_{cc} – Falha variável manipulada Pf

Cenário	Ganho K_{cc}	Temperatura	Nível	Densidade
C1	0/0/0%	5102,5 (*) (0,84)	-	-
	50/50/25%	5102,5 (*) (0,84)	-	-
	100/100/50%	5102,5 (*) (0,84)	-	-
	150/150/75%	5102,5 (*) (0,84)	-	-
C2	0/0/0%	5102,5 (*) (0,72)	-	-
	50/50/25%	5102,5 (*) (0,72)	-	-
	100/100/50%	5102,5 (*) (0,72)	-	-
	150/150/75%	5102,5 (*) (0,72)	-	-
C3	0/0/0%	5102,5 (*) (0,92)	-	-
	50/50/25%	5102,5 (*) (0,92)	-	-
	100/100/50%	5102,5 (*) (0,92)	-	-
	150/150/75%	5102,5 (*) (0,92)	-	-
C4	0/0/0%	5102,6 (*) (0,83)	-	-
	50/50/25%	5102,6 (*) (0,83)	-	-
	100/100/50%	5102,6 (*) (0,83)	-	-
	150/150/75%	5102,6 (*) (0,83)	-	-

Valores entre parênteses correspondem aos desvios-padrão.

(*) Valor médio considerando somente as repetições onde houve sinalizações

[Fonte – próprio autor]

As variáveis monitoradas tiveram os seus valores verificados quanto aos máximos e mínimos atingidos entre os minutos 5055 e 5760, levando-se em consideração todas as repetições. Este intervalo corresponde ao período de produção da quinta-feira, englobando o instante, no qual as sinalizações foram iniciadas (5100) e as 11 horas de operação subsequentes do processo. Estes valores foram apurados por tipo de cenários e por tipo de contribuição (ganho K_{cc}). Nas Tabelas 21 a 23, são apresentados estes valores registrados, das variáveis controladas (monitoradas) nível, densidade e temperatura, respectivamente relacionados a cada uma das falhas (vazamento do tanque, erro do sensor de densidade e variável manipulada Pf).

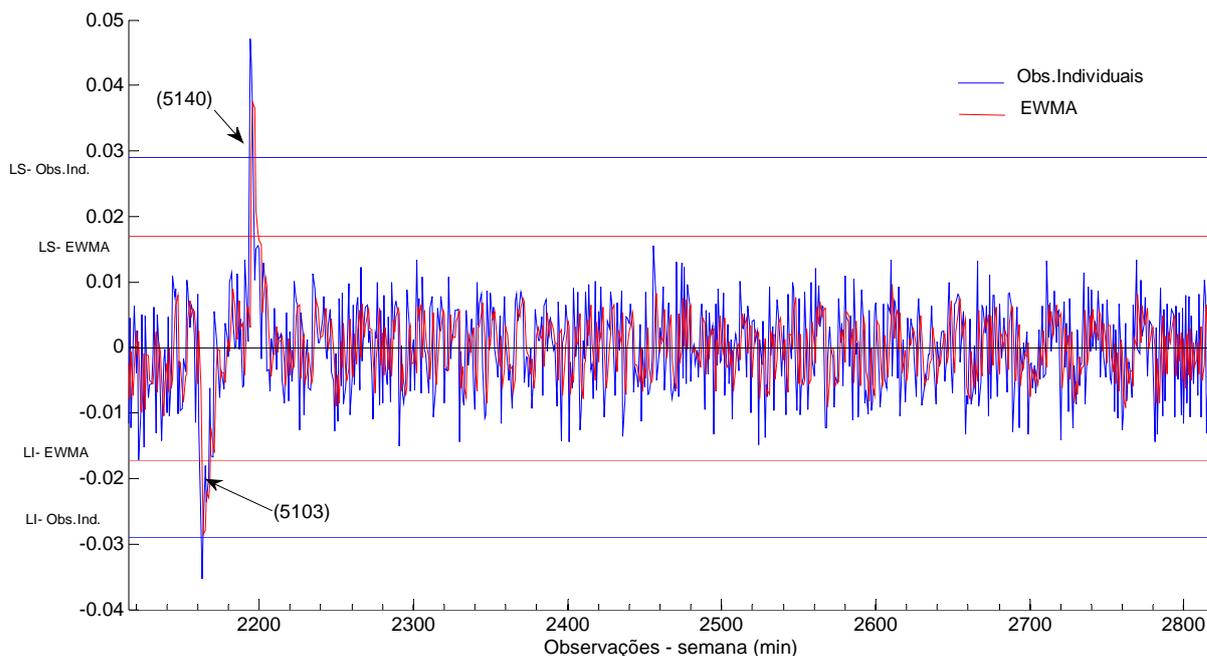


Figura 48 – Cartas de controle Obs. Individuais e EWMA, variável Temperatura – cenário 4 - semana 750, $K_{cc} = 0$, quinta-feira
[Fonte – próprio autor]

Pela Tabela 21, verifica-se que a variável nível, mesmo no momento da inserção da falha e nas horas subsequentes, não ultrapassou os limites de especificação estabelecidos. A vazão de saída, simulando o vazamento, pode ser contornada pelo sistema de controle, apesar de ser uma condição de que necessita ser sanada. Uma vez que o vazamento provocado é menor que a capacidade dos atuadores (bombas dosadoras) em repor as quantidades necessárias, este tipo de situação é compensada e conseqüentemente mascarado. Em maiores vazamentos esta condição não ocorreria. Pelos valores apurados, também se verifica que o controlador operando de forma independente, atinge valores mínimos ligeiramente inferiores quando comparados com os da integração. Em função do autoajuste, o mesmo ocorre com os valores máximos, nos quais as versões de integração ficam ligeiramente acima da versão CEnP.

Os valores máximos e mínimos de densidade, registrados entre todas as repetições com a falha no sensor de leitura desta variável, em cada um dos cenários e condições de ganho, entre os minutos 5055 a 5760 da simulação, estão relacionados na Tabela 22. Pelos registros constata-se que o controlador, operando de forma isolada, não conseguiu manter a variável dentro dos limites de especificação, em todos os cenários. Os valores mínimos não atenderam às exigências. Nas versões de integração, os limites foram atendidos. Em todos os cenários e versões os valores máximos não apresentaram alterações.

Tabela 21 – Valores Máximos e Mínimos da Variável Controlada Nível (cm) – Vazamento Tanque

Condição de Operação		Limite Especificação	C1	C2	C3	C4
CEnP	mín.	93,00	94,73	94,73	94,73	94,73
	máx.	97,00	95,22	95,23	95,22	95,23
Integração Kcc = 0	mín.	93,00	94,75	94,75	94,74	94,75
	máx.	97,00	95,27	95,26	95,28	95,27
Integração Kcc = 50	mín.	93,00	94,75	94,75	94,74	94,75
	máx.	97,00	95,27	95,26	95,28	95,27
Integração Kcc = 100	mín.	93,00	94,75	94,74	94,75	94,75
	máx.	97,00	95,26	95,26	95,28	95,26
Integração Kcc = 150	mín.	93,00	94,75	94,75	94,75	94,75
	máx.	97,00	95,26	95,25	95,27	95,26

[Fonte – próprio autor]

Tabela 22 – Valores Máximos e Mínimos da Variável Controlada Densidade (g/cm³) – Falha Sensor

Condição de Operação		Limite Especificação	C1	C2	C3	C4
CEnP	mín.	1,1520	1,1509	1,1510	1,1509	1,1510
	máx.	1,1740	1,1624	1,1624	1,1625	1,1624
Integração Kcc = 0	mín.	1,1520	1,1588	1,1590	1,1586	1,1588
	máx.	1,1740	1,1624	1,1624	1,1625	1,1624
Integração Kcc = 25	mín.	1,1520	1,1588	1,1590	1,1586	1,1588
	máx.	1,1740	1,1624	1,1624	1,1625	1,1624
Integração Kcc = 50	mín.	1,1520	1,1588	1,1590	1,1586	1,1588
	máx.	1,1740	1,1624	1,1624	1,1625	1,1624
Integração Kcc = 75	mín.	1,1520	1,1588	1,1590	1,1586	1,1588
	máx.	1,1740	1,1624	1,1624	1,1625	1,1624

[Fonte – próprio autor]

Os valores máximos e mínimos, apurados nas simulações da falha envolvendo a variável manipulada Pf, constam na Tabela 23. Nesta condição, os valores ficaram dentro da especificação em todas as condições de operação e em todos os cenários. O sistema de controle, mesmo de forma isolada, conseguiu manter a variável dentro das metas estabelecidas, apesar da anormalidade criada. Percebeu-se que os valores mínimos na condição de operação CEnP são ligeiramente menores que os das versões de integração, em todos os cenários. A sinalização e eliminação da falha proporcionaram esta melhoria.

Tabela 23 – Valores Máximos e Mínimos da Variável Controlada Temperatura (C°) – Falha Variável Pf

Condição de Operação		Limite Especificação	C1	C2	C3	C4
CEnP	mín.	39,00	39,62	39,64	39,61	39,62
	máx.	43,00	40,80	41,20	40,87	42,14
Integração Kcc = 0	mín.	39,00	39,64	39,65	39,63	39,63
	máx.	43,00	40,80	41,20	40,87	42,14
Integração Kcc = 50	mín.	39,00	39,64	39,65	39,63	39,63
	máx.	43,00	40,80	41,20	40,87	42,14
Integração Kcc = 100	mín.	39,00	39,64	39,65	39,63	39,63
	máx.	43,00	40,80	41,20	40,87	42,14
Integração Kcc = 150	mín.	39,00	39,64	39,65	39,63	39,63
	máx.	43,00	40,80	41,20	40,87	42,14

[Fonte – próprio autor]

4.3.9 Análise de desempenho

Considerando-se as medidas de desempenho estipuladas na fase metodológica, ao final de todas as repetições, de cada uma das falhas criadas, obtiveram-se os valores médios do Desvio Quadrático Médio em relação ao Alvo (DQM) e da Distância Média em relação ao Alvo (DM). As medidas são calculadas considerando-se os comportamentos observados em cada uma das condições de operação e cenários, em cada uma das falhas criadas. Assim, uma análise e comparação direta entre as condições de operação podem ser realizadas.

4.3.9.1 Falha devido ao vazamento no tanque

Com a falha simulada do vazamento do tanque utilizado para o banho, foram apuradas as medidas de desempenho apresentadas na Tabela 24. Pelos valores de ambas as medidas, as variáveis nível e densidade obtiveram melhores condições de proximidade, em relação aos valores-alvo para as condições de integração, inclusive melhorando com o aumento dos ganhos de contribuição (K_{cc}) para a lei de controle, quando comparados nos mesmos cenários. As cartas de controle, monitorando nível e densidade, proporcionaram sinalizações e, desta forma, contribuíram com o controlador para o sistema de autoajuste proposto.

Tabela 24 – Indicação de desempenho – Falha vazamento no tanque

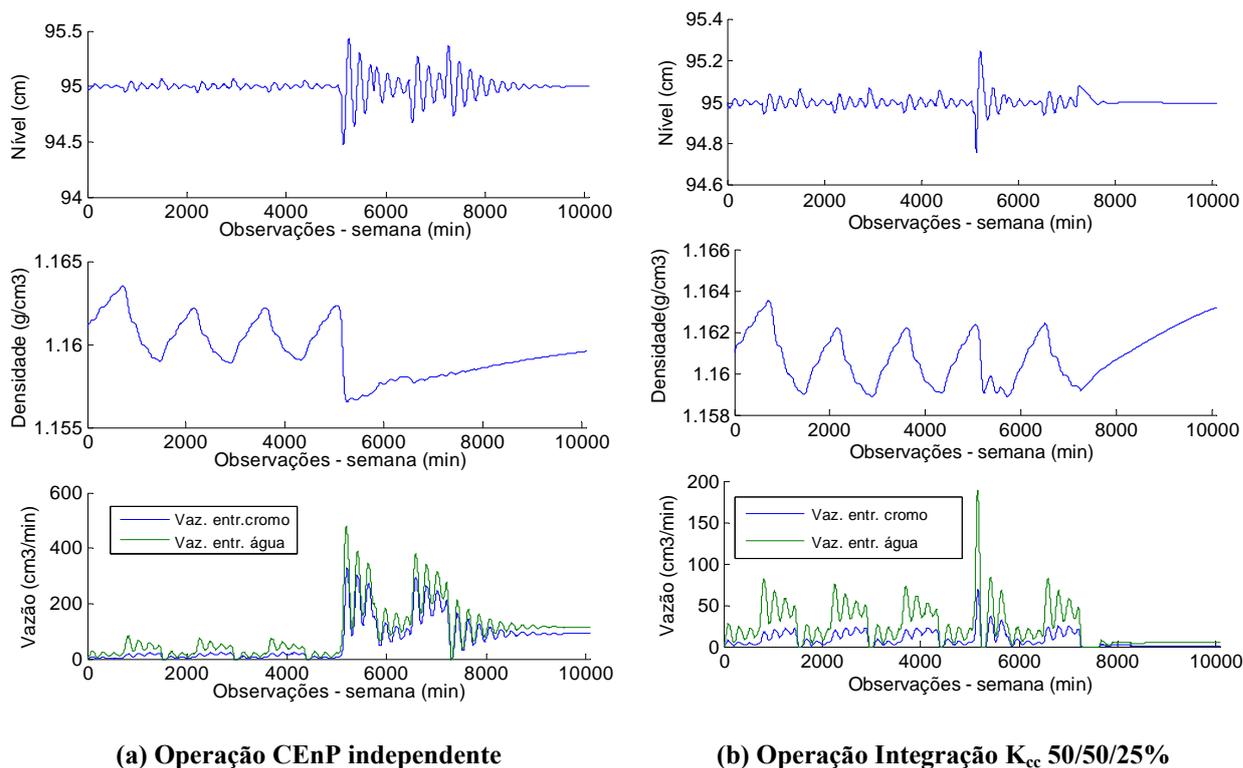
Cenários	Condição de Operação	Medida	Variáveis Controladas			
			Temperatura (10 ⁻³)	Nível (10 ⁻²)	Densidade (10 ⁻⁵)	
C1	CEnP	DQM	109,02	0,385	0,533	
		DM	263,96	4,30	208,26	
	Integração Kcc 0/0/0%	DQM	109,18	0,299	0,276	
		DM	264,13	3,82	150,60	
	Integração Kcc 50/50/25%	DQM	109,18	0,295	0,275	
		DM	264,14	3,81	149,96	
	Integração Kcc 100/100/50%	DQM	109,18	0,290	0,274	
		DM	264,14	3,79	147,50	
	Integração Kcc 150/150/75%	DQM	109,18	0,286	0,265	
		DM	264,14	3,77	147,44	
	C2	CEnP	DQM	133,42	0,357	0,521
			DM	284,89	3,76	195,23
Integração Kcc 0/0/0%		DQM	133,67	0,246	0,186	
		DM	285,10	3,20	121,66	
Integração Kcc 50/50/25%		DQM	133,67	0,242	0,185	
		DM	285,10	3,18	121,51	
Integração Kcc 100/100/50%		DQM	133,67	0,237	0,179	
		DM	285,10	3,17	119,72	
Integração Kcc 150/150/75%		DQM	133,67	0,233	0,176	
		DM	285,10	3,15	118,73	
C3		CEnP	DQM	121,28	0,433	0,571
			DM	275,00	4,88	221,99
	Integração Kcc 0/0/0%	DQM	121,46	0,373	0,366	
		DM	275,19	4,50	175,66	
	Integração Kcc 50/50/25%	DQM	121,45	0,369	0,362	
		DM	275,19	4,49	174,65	
	Integração Kcc 100/100/50%	DQM	121,45	0,364	0,357	
		DM	275,19	4,48	173,39	
	Integração Kcc 150/150/75%	DQM	121,45	0,360	0,354	
		DM	275,19	4,47	172,30	
	C4	CEnP	DQM	160,36	0,380	0,531
			DM	304,56	4,18	206,48
Integração Kcc 0/0/0%		DQM	160,77	0,285	0,263	
		DM	304,83	3,66	146,76	
Integração Kcc 50/50/25%		DQM	160,77	0,280	0,262	
		DM	304,83	3,65	146,19	
Integração Kcc 100/100/50%		DQM	160,77	0,276	0,256	
		DM	304,83	3,63	144,68	
Integração Kcc 150/150/75%		DQM	160,76	0,272	0,253	
		DM	304,83	3,61	143,64	

[Fonte – próprio autor]

Com o vazamento, é aumentada a entrada dos produtos para a sua reposição (água e ácido crômico), existindo, assim, uma interferência na variável temperatura. As medidas apuradas, para esta variável, para a condição de operação CEnP são melhores que as relacionadas às integrações. Apesar destas alterações, não foram constatadas sinalizações nas cartas de controle desta variável. O aumento da vazão de reposição, sendo maior na operação independente do controlador, faz com que o volume do banho fique ligeiramente maior. Pela equação (33) (subseção 4.1.2.1), percebe-se que o volume é inversamente proporcional à variação da temperatura, fazendo com que na condição de operação CEnP, esta variável seja menos sensível às perturbações, permanecendo mais próxima ao seu alvo.

Uma semana típica de operação do controlador, correspondendo à repetição 100 do cenário 2, com a inserção proposital da falha no minuto 5100, é vista na Figura 49. Nesta Figura, é possível comparar os comportamentos das variáveis controladas (monitoradas) nível e densidade, além das variáveis manipuladas de vazão de entrada de água e ácido crômico, nas condições de operação do controlador isoladamente, Figura 49(a), e da integração com o sistema de autoajuste operando nas condições de ganho K_{cc} 50, 50 e 25% (respectivamente nível, temperatura, densidade), Figura 49(b). Percebe-se que o controlador operando, isoladamente, busca seu ajuste, mantendo as variáveis nível e densidade dentro dos limites de especificação e o mais próximo possível dos seus respectivos valores-alvo. A vazão de entrada de água e ácido crômico tem as suas quantidades alteradas, procurando recompor o banho, tanto em volume quanto em relação à densidade. As reposições do banho ocorrem em taxas menores que os limites estabelecidos de $500 \text{ cm}^3/\text{min}$, de cada um dos componentes, quando da especificação do sistema de controle e atuadores.

Pela comparação entre as Figuras 49(a) e 49(b), nota-se que, em instantes após a inserção de falha, o sistema volta à normalidade. Uma vez que a falha foi identificada, o sistema de autoajuste contribui para amenizar o efeito sobre a variável controlada, e na sequência é eliminada (30 min. após a primeira sinalização). Os comportamentos da variável densidade e das vazões de entrada, podem ser claramente verificados quanto a sua alteração em suas vazões. Quanto à variável temperatura, esta não foi representada na Figura 49 uma vez que as alterações, em função da criação da falha, são graficamente imperceptíveis.



(a) Operação CEnP independente **(b) Operação Integração K_{cc} 50/50/25%**
Figura 49 – Variáveis Controladas Nível e Densidade, Vazão de entrada de ácido crômico e água – cenário 2 - semana 100
[Fonte – próprio autor]

4.3.9.2 Falha no sensor de densidade

Com a falha do sensor de densidade, as indicações de proximidade em relação aos valores-alvo podem ser vistas na Tabela 25. Com o sistema de autoajuste proposto, verifica-se que, com o aumento do ganho K_{cc} , esta variável ficou mais próxima ao seu Alvo. Quanto maior o ganho, menor é o valor apurado das medidas de desempenho.

Com a busca do controlador em corrigir a variável densidade, as variáveis manipuladas, vazão de entrada de água e ácido crômico, interferiram no processo alterando a temperatura e nível do banho. Não houve sinalizações nas cartas destas duas variáveis.

Para a variável nível, em função das correções do controlador, existe diferença entre as condições de operação CEnP e as de integração. Na primeira condição, o controlador busca seu ajuste, mas não obtém êxito. Assim a interferência é maior que na segunda condição (a de integração), pois a falha sendo sinalizada e eliminada em um curto tempo, o efeito dos ajustes, é bastante amenizado, de forma que, nas versões de integração, o resultado indica maior proximidade desta variável com o Alvo.

Tabela 25 – Indicação de desempenho – Falha sensor de densidade

Cenários	Condição de Operação	Medida	Variáveis Controladas			
			Temperatura (10 ⁻³)	Nível (10 ⁻²)	Densidade (10 ⁻⁵)	
C1	CEnP	DQM	109,21	00,13	3,04557	
		DM	264,10	03,04	409,09	
	Integração Kcc 0/0/0%	DQM	109,22	00,11	0,26839	
		DM	264,10	02,76	148,13	
	Integração Kcc 50/50/25%	DQM	109,22	00,11	0,26805	
		DM	264,10	02,76	148,01	
	Integração Kcc 100/100/50%	DQM	109,22	00,11	0,26769	
		DM	264,10	02,76	147,88	
	Integração Kcc 150/150/75%	DQM	109,22	00,11	0,26700	
		DM	264,10	02,76	147,63	
	C2	CEnP	DQM	133,62	00,07	2,73745
			DM	284,90	02,22	367,79
Integração Kcc 0/0/0%		DQM	133,75	00,06	0,17062	
		DM	285,10	02,07	115,80	
Integração Kcc 50/50/25%		DQM	133,75	00,06	0,17061	
		DM	285,10	02,07	115,79	
Integração Kcc 100/100/50%		DQM	133,75	00,06	0,17060	
		DM	285,10	02,07	115,78	
Integração Kcc 150/150/75%		DQM	133,75	00,06	0,17059	
		DM	285,10	02,07	115,77	
C3		CEnP	DQM	121,53	00,19	3,29755
			DM	275,40	03,69	441,89
	Integração Kcc 0/0/0%	DQM	121,52	00,17	0,36563	
		DM	275,20	03,51	175,56	
	Integração Kcc 50/50/25%	DQM	121,52	00,17	0,36462	
		DM	275,20	03,51	175,25	
	Integração Kcc 100/100/50%	DQM	121,52	00,17	0,36335	
		DM	275,20	03,51	174,87	
	Integração Kcc 150/150/75%	DQM	121,52	00,17	0,36142	
		DM	275,20	03,51	174,27	
	C4	CEnP	DQM	160,75	00,11	2,99412
			DM	304,70	02,90	402,71
Integração Kcc 0/0/0%		DQM	160,85	00,09	0,25487	
		DM	304,90	02,59	143,65	
Integração Kcc 50/50/25%		DQM	160,85	00,09	0,25462	
		DM	304,90	02,59	143,56	
Integração Kcc 100/100/50%		DQM	160,85	00,09	0,25437	
		DM	304,90	02,59	143,46	
Integração Kcc 150/150/75%		DQM	160,85	00,09	0,25399	
		DM	304,90	02,59	143,32	

[Fonte – próprio autor]

Para a variável temperatura, a interferência não teve uma uniformidade. Nos cenários 1, 2 e 4, as medidas de desempenho desta variável obtiveram melhores resultados na versão CEnP do que nas de integração. Com a busca pela correção da densidade, os componentes do banho sofreram alterações de volume de reposição. Após o desenvolvimento da equação de balanço de energia (equação 33, subseção 4.1.2.1), pode-se perceber que o volume do banho é inversamente proporcional à variação de temperatura. Assim, com o controlador operando isoladamente, houve aumento da entrada de produtos visando recuperar, sem sucesso, a densidade para o seu Alvo estabelecido. Com isso, as variações de temperatura ficaram menores nestas simulações. No cenário 3, com sua vazão de saída por arraste das peças maior que nos demais cenários, este efeito do aumento do volume foi menos sentido, fazendo com que a versão de integração obtivesse melhores resultados.

A falha gerada no sensor de densidade não veio causar influências de magnitude suficiente para causar sinalizações nas cartas, monitorando a variável temperatura. Com isso, esta variável seguiu as oscilações resultantes dos insumos do processo, não tendo contribuições destas cartas na simulação da versão de integração.

Um exemplo de semana típica, operando com a falha criada no sensor de densidade, é apresentado na Figura 50, correspondendo à repetição 500 do cenário 1. Nesta Figura, podem ser comparados os comportamentos das variáveis controladas (monitoradas) nível e densidade e das manipuladas vazão de entrada de água e ácido crômico, nas condições de operação do controlador isoladamente, Figura 50(a), e de integração com o sistema de autoajuste operando com ganhos K_{cc} 100, 100 e 50% (respectivamente nível, temperatura, densidade), Figura 50(b).

Como a falha simula a medição do sensor 1% acima do correto, faz com que o controlador procure reduzir a densidade erroneamente, permitindo uma maior vazão de entrada de água. Tal situação pode ser observada nos gráficos correspondentes às vazões de entrada na Figura 50(a) e 50(b). Na Figura 50(a), percebe-se que o nível é afetado por esta reposição e a densidade atinge um patamar inferior ao limite de especificação mínimo ($1,152 \text{ g/cm}^3$). Conforme constatado na subseção anterior, Tabela 22, a variável densidade, operando de forma isolada, não foi mantida pelo controlador dentro dos limites de especificação, isto ocorrendo em todos os cenários avaliados. Este tipo de falha criada não pode ser sanado pelo controlador. Sendo um erro de leitura, todas as decisões de correção por parte do controlador foram infrutíferas, mesmo porque esta anormalidade não pode ser levada em consideração em sua lei de controle. Pela Figura 50(b), considerando a integração com as cartas de controle e o sistema de autoajuste, apenas ligeiras alterações são constatadas, inclusive não chegando a se

aproximar dos limites de especificação estabelecidos. Com a sinalização das cartas, o autoajuste operou nesta situação e a remoção das anormalidades em curto prazo, impediu-se que maiores problemas fossem causados ao processo. A variável temperatura teve o seu comportamento ligeiramente alterado, porém não perceptível graficamente, motivo pelo qual não foi representada na Figura 50.

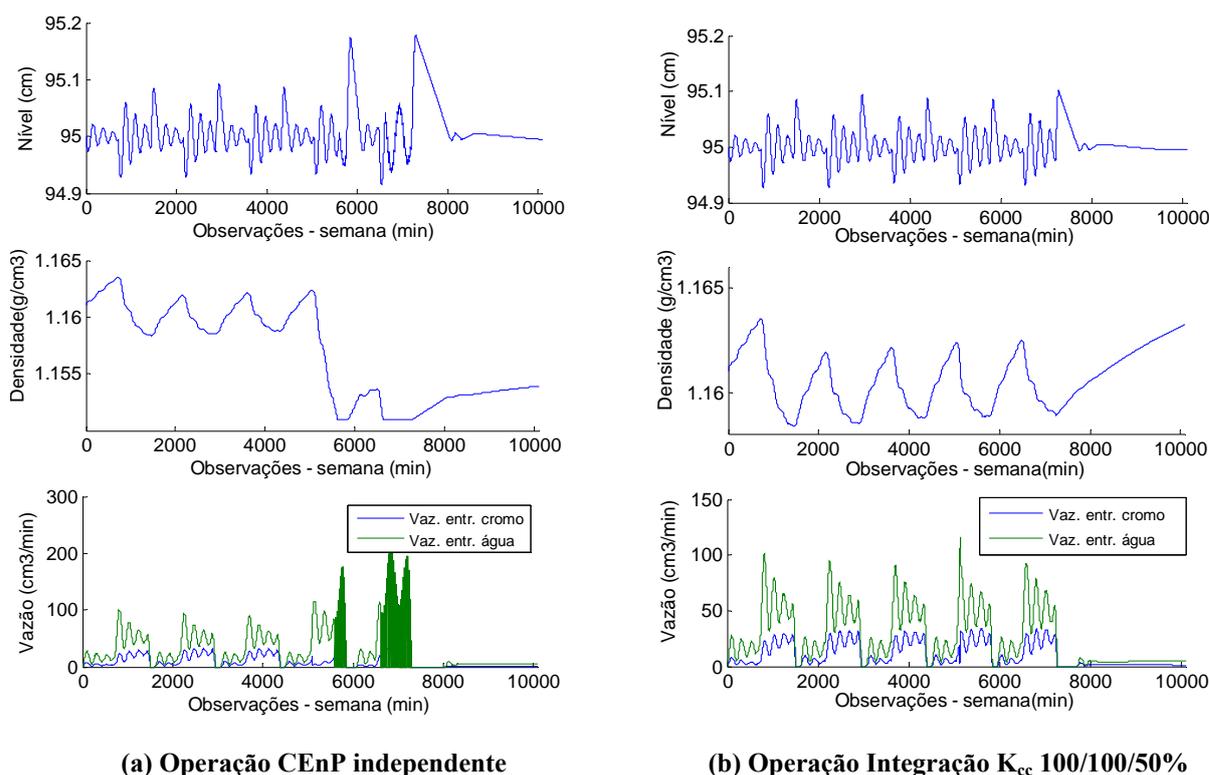


Figura 50 – Variáveis Controladas Nível e Densidade, Vazão de entrada de ácido crômico e água – cenário 1 - semana 500
[Fonte – próprio autor]

4.3.9.3 Falha variável manipulada Pf

A terceira falha, correspondente à variável manipulada Pf, proporcionou sinalizações das cartas monitorando a variável temperatura. As medidas de desempenho, mostrando as proximidades em relação aos valores-alvo, constam na Tabela 26. As medidas obtidas mostram que a integração proposta, com o auxílio das cartas e sistema de autoajuste operando, repercutiu em valores da variável controlada mais próximos ao seu Alvo. Percebe-se, pelos resultados alcançados, que o tipo de interferência no controle surtiu o efeito esperado.

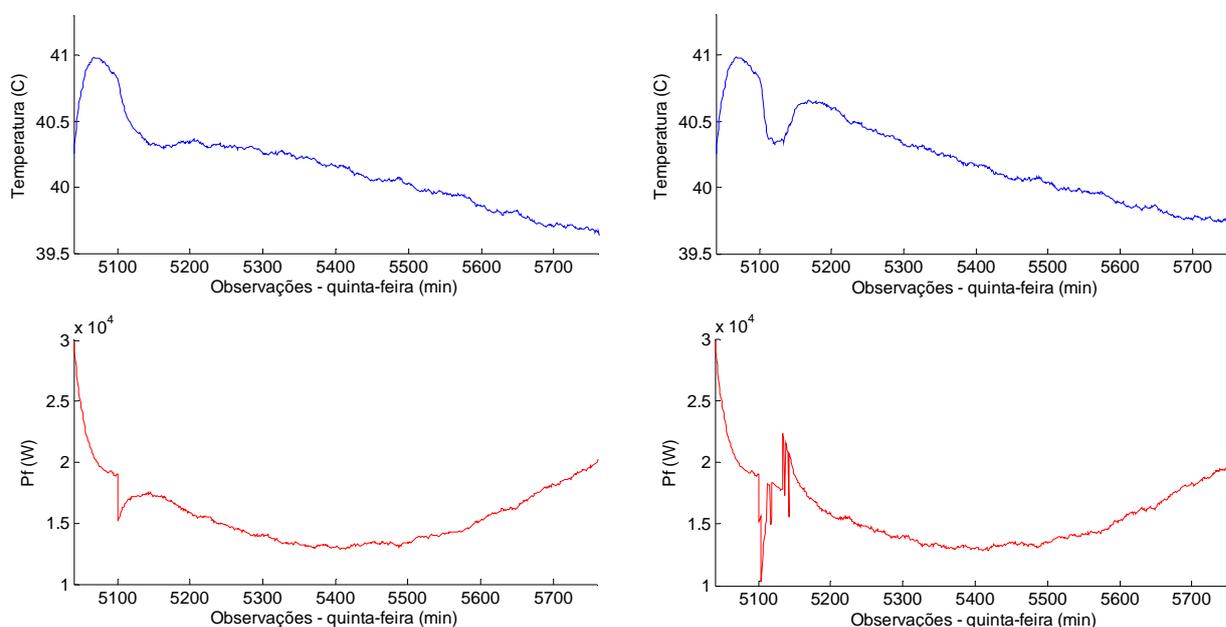
Tabela 26 – Indicação de desempenho – Falha variável manipulada Pf

Cenários	Condição de Operação	Medida	Variáveis Controladas			
			Temperatura (10 ⁻³)	Nível (10 ⁻²)	Densidade (10 ⁻⁵)	
C1	CEnP	DQM	118,52	0,11	0,25	
		DM	270,06	2,77	142,48	
	Integração Kcc 0/0/0%	DQM	109,54	0,11	0,25	
		DM	264,95	2,77	142,48	
	Integração Kcc 50/50/25%	DQM	109,53	0,11	0,25	
		DM	264,93	2,77	142,48	
	Integração Kcc 100/100/50%	DQM	109,52	0,11	0,25	
		DM	264,90	2,77	142,48	
	Integração Kcc 150/150/75%	DQM	109,10	0,11	0,25	
		DM	264,69	2,77	142,48	
	C2	CEnP	DQM	143,87	0,06	0,16
			DM	292,71	2,08	111,37
Integração Kcc 0/0/0%		DQM	135,04	0,06	0,16	
		DM	287,17	2,08	111,37	
Integração Kcc 50/50/25%		DQM	135,01	0,06	0,16	
		DM	287,15	2,08	111,37	
Integração Kcc 100/100/50%		DQM	134,99	0,06	0,16	
		DM	287,12	2,08	111,37	
Integração Kcc 150/150/75%		DQM	133,93	0,06	0,16	
		DM	286,68	2,08	111,37	
C3		CEnP	DQM	131,15	0,17	0,35
			DM	281,98	3,51	169,11
	Integração Kcc 0/0/0%	DQM	121,87	0,17	0,35	
		DM	276,18	3,51	169,11	
	Integração Kcc 50/50/25%	DQM	121,85	0,17	0,35	
		DM	276,15	3,51	169,11	
	Integração Kcc 100/100/50%	DQM	121,83	0,17	0,35	
		DM	276,12	3,51	169,11	
	Integração Kcc 150/150/75%	DQM	120,91	0,17	0,35	
		DM	275,70	3,51	169,11	
	C4	CEnP	DQM	172,30	0,09	0,24
			DM	313,90	2,59	138,26
Integração Kcc 0/0/0%		DQM	162,45	0,09	0,24	
		DM	307,19	2,59	138,26	
Integração Kcc 50/50/25%		DQM	162,37	0,09	0,24	
		DM	307,16	2,59	138,26	
Integração Kcc 100/100/50%		DQM	162,23	0,09	0,24	
		DM	307,11	2,59	138,26	
Integração Kcc 150/150/75%		DQM	160,34	0,09	0,24	
		DM	306,32	2,59	138,26	

[Fonte – próprio autor]

Não foram constatadas variações nas medições para as variáveis controladas (monitoradas) nível e densidade. Os valores apurados, para cada uma destas variáveis, se mantêm constante em todas as condições de operação dentro de cada cenário.

A Figura 51 representa uma quinta-feira típica, relacionada à falha criada na repetição 750 do cenário 4. O controlador, operando de forma independente, mantém o sistema sob controle, porém uma queda acentuada na variável temperatura é percebida, Figura 51(a). A variável manipulada Pf sofre uma queda brusca no momento da inserção da falha (instante 5100), e, na sequência, o controlador gradativamente busca ajustar o processo. Na Figura 51(b) é indicada uma queda brusca na temperatura (inserção da falha), mas com o auxílio do sistema de autoajuste com ganhos K_{cc} 100, 100 e 50% (respectivamente nível, temperatura, densidade), e sinalização das cartas de controle com a consequente eliminação do problema, esta variável recupera-se rapidamente da anormalidade. A potência fornecida (Pf) é controlada, sofrendo alterações de forma a compatibilizar as correções necessárias para que a temperatura volte ao seu comportamento esperado, como em dias de operação corriqueira.



(a) Operação CEnP independente

(b) Operação Integração K_{cc} 100/100/50%

Figura 51 – Variável Controlada Temperatura, Variável Manipulada Pf – cenário 4 - semana 750
[Fonte – próprio autor]

4.4 COMENTÁRIOS SOBRE OS RESULTADOS

Considerando os resultados das simulações apresentadas nas seções 4.2 e 4.3, o controlador e a proposição de integração puderam ser avaliados quanto: (a) operação geral; (b) identificação das falhas; (c) precisão em manter as variáveis mais próximas aos seus valores-alvo. A primeira avaliação permitiu verificar o correto funcionamento do sistema de controle, em condições de operação. A segunda avaliação confere a eficiência do controle estatístico identificando cada uma das falhas inseridas propositalmente. A terceira e última, comprovou que a integração CEnP e CEP, com o autoajuste proposto, proporciona melhores resultados.

A operação geral do processo, gerenciado pelo controlador e deste integrado com o controle estatístico, é conferido pelos resultados observados nas seções 4.2.6 e 4.2.7. Em condições normais o controlador manteve as variáveis controladas (monitoradas) dentro dos limites de especificação. As cartas de controle sinalizaram: (i) percebendo o efeito da temperatura ambiente alta, dificultando o controle de temperatura; (ii) indicando pequenas variações no controle de densidade, efeito causado pela grande sensibilidade e ajuste deste controle. Em função da instabilidade criada pelo autoajuste, proporcionado pelas cartas de monitoramento da densidade, percebeu-se a necessidade de redução dos ganhos K_{cc} para esta variável. Considerou-se que o sistema operou adequadamente, mostrando inclusive versatilidade em seu processo de ajuste. Nos casos de sinalizações pontuais, a indicação deve ser verificada detalhadamente para não ser confundida como alarme falso. Não havendo continuidade de sinalizações, o sistema de autoajuste não causa alteração sensível no comportamento da variável.

Quanto à identificação das falhas, o sistema apresentou bons resultados, percebendo, em poucos instantes, os três tipos anormalidades. As Tabelas 16, 18, 20 que apresentam os instantes médios de sinalização, comprovam esta sensibilidade. Cada falha identificada possui um tipo de característica específica, voltada a situações reais, já presenciadas no processo de galvanoplastia, tomado como base para o estudo. O vazamento do banho e o problema envolvendo a variável manipulada Pf são sutis, pela variação proporcionada e pelo ajuste que o controlador realiza. A falha do sensor de densidade é um tipo de problema de maior impacto, em que o controlador, operando isoladamente, não consegue corrigir, uma vez que é induzido ao erro, determinando ações sobre uma informação errônea. Cada tipo de falha exigiu atuações diferentes do controlador. Nas falhas relacionadas ao nível e à variável manipulada Pf, apesar do problema simulado, o controlador, isoladamente, conseguiu

contornar o problema. Nestas situações as sinalizações das cartas ocorreram, mesmo sem que as respectivas variáveis tivessem chegado a sair da especificação. Sem a sinalização, este tipo de falha poderia passar despercebido dos responsáveis pelo processo, sendo agravados com o passar do tempo, os problemas ambientais e de custo. Já com a falha no sensor de densidade, sem o auxílio das cartas de controle, esta variável não permanece dentro dos limites de especificação.

Quanto à precisão em manter as variáveis controladas (monitoradas) próximas aos valores-alvo, as Tabelas 24 a 26 apresentam os resultados dos indicadores utilizados. Dos valores apurados, em cada uma das situações, com exceção das falhas no sensor de densidade, em que a variável saiu da especificação, o controlador teve um bom desempenho. Em todas as situações, somente com a sinalização da anormalidade ($K_{cc} = 0$) e sua conseqüente remoção, os resultados apresentaram melhoras. Considerando as demais variações de ganhos de contribuição para o autoajuste (K_{cc}) o sistema obteve crescente aumento na acurácia com o aumento dos ganhos correspondentes. A escolha dos ganhos para a contribuição de cada variável deve ser determinada com cautela, visando evitar instabilidade do sistema de controle. Em falhas em que as solicitações das variáveis manipuladas estão dentro dos limites disponíveis (atuadores, matéria-prima, limitações de equipamentos), o controlador conseguiu corrigir e ajustar o processo de forma satisfatória. Nos casos de erros de leitura de variáveis, e outras situações nas quais o controlador providencia ações corretivas sobre dados incorretos ou limitados, este não possui condições de manter as especificações.

Pelos resultados das simulações apresentadas, em todas as falhas avaliadas no processo de galvanoplastia estudado, as integrações entre o sistema de controle e o controle estatístico apresentaram os melhores resultados. O sistema de autoajuste proposto auxiliou o controlador a melhor se ajustar no período entre o início da ocorrência da falha e enquanto persistiram as sinalizações.

O emprego da modelagem do processo, e sua respectiva simulação, proporcionaram bons resultados. Efeitos e comportamentos observados no processo real foram reproduzidos e devidamente identificados. Situações de operação puderam ser criadas e avaliadas, as quais não seriam possíveis diretamente no processo da empresa estudada. Considera-se que os resultados e avaliações não tiveram qualquer tipo de comprometimento por terem sido obtidos via ambiente virtual.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O controle de processos é uma atividade em crescente desenvolvimento no panorama industrial da atualidade. O crescimento da produção mundial, concorrência acirrada, redução de custos e disputas mercadológicas têm impulsionado o seu desenvolvimento. Neste contexto, sistemas de controle mais robustos são desenvolvidos.

Na Engenharia de Controle, diversos controladores são propostos. Cada um com sua particularidade quanto à complexidade, versatilidade de programação, estabilidade, quantidade de variáveis controladas, por exemplo. Alguns controladores são viáveis, tanto técnica quanto economicamente, somente em sistemas industriais de grande porte. Um dos controladores mais populares do chão de fábrica, independente do porte industrial, em função de sua praticidade e desempenho é o PID.

No Controle Estatístico, diversos tipos de cartas de controle são propostas para o monitoramento do processo. Com a autocorrelação dos dados, inserida pelo controle de engenharia cada vez mais presente, são recomendadas as cartas baseadas em modelos, monitorando os resíduos de ajustes.

A combinação das técnicas de Engenharia de Controle com o Controle Estatístico é vista como mais uma alternativa na busca pela redução da variabilidade do processo, tornando o sistema de controle mais robusto. A Engenharia de Controle, através de correções sistemáticas, procura conduzir as variáveis para seus valores-alvo. O Controle Estatístico, com suas sinalizações, permite que sejam identificadas e eliminadas causas especiais que venham a interferir no processo.

Um crescente número de pesquisas, envolvendo a integração do Controle de Engenharia com o Estatístico, foi identificado na literatura. Apesar deste crescimento, percebeu-se que uma integração mais direta, envolvendo autoajustes do controlador, influenciada por sinalizações das cartas de controle, ainda é pouco explorada.

A integração realizada entre o controlador PID e a cartas de controle de Observações Individuais e EWMA, monitorando os resíduos de ajustes de modelos ARIMA, permitiu que as sinalizações das cartas interferissem diretamente na ação de controle. Uma ação junto ao controlador reforça a correção das variáveis controladas (monitoradas). Correção mantida enquanto durarem as sinalizações.

A lei de controle, estabelecida para os controladores PID, que gerencia a busca pela aproximação das variáveis controladas (monitoradas) aos seus valores-alvo, é modificada, sendo acrescentado mais um termo, ligado à contribuição das cartas de controle, utilizado

quando se registrarem sinalizações. A contribuição das cartas de controle para o autoajuste do controlador, utiliza a previsão da variável monitorada para o minuto seguinte ao da sinalização. Assim, é possível antecipar o cálculo do erro em relação ao seu Alvo. Em conjunto com um ganho de contribuição (K_{cc}), permite ao controlador incorporar a correção na próxima intervenção, no caso simulado, o próximo minuto.

Para viabilizar o estudo da integração, foi necessário o emprego da simulação numérica de um processo industrial. Desenvolveu-se o modelo matemático de uma etapa do processo de galvanoplastia (cromagem), e implementado em linguagem Matlab. Variáveis de saída foram controladas e monitoradas em períodos semanais.

As simulações foram realizadas em três módulos. O primeiro, com a determinação do modelo matemático do processo, especificação e parametrização do controlador e das cartas de controle. No segundo módulo, foram realizadas repetições, averiguando o funcionamento do sistema, verificando a ocorrência de sinalizações em funcionamento normal. No último módulo, houve a inserção de falhas propositais, em instante pré-determinado. Buscou-se a eficiência de identificação e controle quanto ao manter as variáveis controladas (monitoradas) o mais próximo de seus valores-alvo.

Pelos resultados alcançados, identificação rápida de falhas, manutenção das variáveis controladas (monitoradas) mais próximas dos seus valores-alvo, sinalização de falhas compensadas ou mesmo não corrigidas pelo controlador, a proposta de integração entre o controle de engenharia de processo e as cartas de controle, envolvendo o autoajuste do controlador, foi realizada e obteve bons resultados. O processo simulado, baseado em situação real, permitiu verificar o funcionamento e eficiência com um controlador amplamente utilizado (PID) e a cartas de controle para dados autocorrelacionados.

Atendendo a um dos objetivos secundários, pode-se perceber que, na presença de falhas, mesmo nas situações em que o controlador manteve as variáveis controladas (monitoradas) dentro dos limites de especificação, as cartas de controle foram sensíveis a ponto de realizarem sinalizações. Desta forma, a sinalização e contribuição das cartas de controle evidenciaram falhas nas variáveis de saída que poderiam passar despercebidas por longos períodos, devido ao automatismo de ajustes do controlador.

Nos casos em que os problemas do processo estão relacionados a medições (sensores) ou limites disponíveis das variáveis manipuladas, o controlador possui dificuldade em seu gerenciamento. Nestes casos, ações de correção sobre uma base errada de leitura ou mesmo impossibilidade de continuar a correção, não permitem ao controlador manter as variáveis

próximas aos seus valores-alvo, ou até mesmo dentro das especificações. Auxiliando nestas condições, a integração com as cartas de controle foi providencial.

O trabalho conjunto CEnP e CEP, além do autoajuste (ação temporária), contribui com a sinalização para interferência mais rápida no processo, antes mesmo da variável controlada sair da especificação. Em função desta sua antecipação, baseada em monitoramento e medições sistemáticas, é possível ser considerada uma ação preditiva de controle.

O sistema de controle e monitoramento apresentou grande sensibilidade nos ajustes das variáveis e identificação de falhas. Detectou mudanças muito pequenas do processo, em relação à ordem de grandeza, das variáveis envolvidas. Este efeito torna apta esta integração, a ser empregada em sistemas de precisão, no qual se justifique tal exigência.

A integração alcançada é uma contribuição para a melhoria dos sistemas de controle, aumentando a sua robustez quanto à interferências, aumentando inclusive a precisão das variáveis controladas (monitoradas) em relação aos valores-alvo. Identifica-se como grande potencial a sua utilização em processos de comportamentos dinâmicos contínuos de origens semelhantes à empregada, como: térmicos ou termo-hidráulicos, fluídicos e outros processos afins da área química. Estes, geralmente, são encontrados em plantas químicas, refinarias e de processamento em geral, e de grande automatismo.

O fato de ter sido empregado um controlador PID, um dos mais difundidos no meio industrial, permite que seja possível utilizar a integração proposta em sistemas de controle tanto de pequeno quanto de grande porte. Para sua implementação, depende de um maior conhecimento (treinamento), por parte do profissional da área de automação, sobre cartas de controle para dados autocorrelacionados, mais especificamente sobre ajustes de modelos ARIMA.

Para realizar, de forma eficiente a integração entre o sistema de controle e o de monitoramento estatístico, houve a necessidade de uma sintonia entre as técnicas: o controlador, devidamente parametrizado, manipulando as variáveis de influência do processo e corrigindo as variáveis controladas, e as cartas de controle monitorando os resíduos, com os respectivos modelos ARIMA ajustados. Perturbações ou alterações de parâmetros do controlador, (após ajustes dos modelos ARIMA), interferem no comportamento da variável controlada, alterando, conseqüentemente, os resíduos monitorados pelas cartas de controle. Alarmes falsos são, então, registrados. Foi constatado um problema de ajuste inicial, no qual o sistema de controle, muito preciso, dificultou a determinação do modelo ARIMA mais adequado. Houve a necessidade de rever-se a precisão dos sensores de medição, empregados

para a realimentação do controlador e obtenção de dados para ajustar os modelos ARIMA, os quais tiveram de acompanhar exigência do sistema de controle.

Dentre as vantagens percebidas pela utilização da integração proposta, pode-se destacar: (i) rápida percepção de anormalidades; (ii) percepção da anormalidade, mesmo quando o controlador mantém as variáveis monitoradas dentro de sua especificação; (iii) enquanto a falha identificada não é removida e o sistema voltar à normalidade, o controlador recebe um reforço em sua lei de controle; (iv) variáveis são mantidas mais próximas aos seus valores-alvo (sistema recursivo).

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A integração CEnP e CEP proposta, está baseada na modificação da lei de controle, do controlador PID, tomando como base a forma de cálculo da sua componente proporcional ao erro. Nos ajustes do controlador, para cada uma das três variáveis, percebeu-se que, dependendo do comportamento, uma componente da lei de controle teve mais influência. Um estudo recomendado seria o de investigar e avaliar qual componente da lei de controle influencia mais na variável monitorada, e utilizar este tipo de ação (em relação ao erro) para realizar o autoajuste.

Percebeu-se que os ganhos de contribuição (K_{cc}) do sistema de autoajuste para a lei de controle podem vir a causar instabilidade dependendo da sua magnitude e comportamento da variável. Recomenda-se um estudo envolvendo a análise de sensibilidade, verificando até onde os ganhos do autoajuste podem ser benéficos e onde passam a causar instabilidade, ou mesmo aumento da variabilidade. Buscar estabelecer um equilíbrio entre acurácia e instabilidade.

Um estudo interessante, complementar ao trabalho desenvolvido nesta tese, seria o de realizar uma comparação entre as atuações das cartas de Observações Individuais e EWMA. Nesta comparação, seriam analisadas variações dos parâmetros de ambas as cartas como: múltiplos dos desvios-padrão (L) para estabelecer os limites de controle; parâmetros de suavização (λ) da carta EWMA. Poderiam ser melhor investigados os desempenhos destas cartas para identificação de falhas, visando melhorar a sensibilidade para o autoajuste do sistema de controle. Também poderiam ser relacionadas as escolhas destes parâmetros com a redução das medidas de desempenho, das variáveis de saída em relação ao seu Alvo estabelecido. Uma avaliação do comprimento médio de sequência (ARL) também pode ser

recomendada, comparando o desempenho individual de ambas as cartas e também da ação conjunta.

Além dos estudos anteriormente propostos, outros complementos podem ser avaliados, como:

- Outros tipos e combinações de cartas de controle, como por exemplo, envolvendo as abordagens multivariadas, as baseadas em modelos de regressão e as de Mínimos Quadrados Parciais (PLS);
- Realizar uma análise conjunta das 3 variáveis de saída, em uma única carta de controle, empregando o CEP multivariado;
- Cartas de controle monitorando as variáveis manipuladas (P_f , Q_{ea} , Q_{ecr});
- Estudo do comportamento dos ARL das cartas de controle considerando a integração proposta;
- Estudar outros tipos de falhas do processo;
- Realizar simulações com outros processos industriais (outros modelos matemáticos);
- Empregar outra forma de autoajuste;
- Utilizar outro controlador de engenharia;
- Realizar simulações com outros processos industriais (outros modelos matemáticos).

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2004.
- ALBAZZAZ, H.; WANG, X. Z.; MARHOON, F.. Multidimensional visualisation for process historical data analysis: a comparative study with multivariate statistical process control. **Journal of Process Control**, v. 15, p. 285–294, 2005.
- ALBERT, S.; KINLEY, R. D. Multivariate statistical monitoring of batch processes: an industrial case study of fermentation supervision. **Trends in Biotechnology**, v.19, n. 2, p. 53-62, 2001.
- ALGHAZZAWI, A.; LENNOX. B. Monitoring a complex refining process using multivariate statistics. **Control Engineering Practice**, v.16, p. 294–307, 2008.
- ALGHAZZAWI, A.; LENNOX. B. Model predictive control monitoring using multivariate statistics. **Journal of Process Control**, v. 19, p. 314–327, 2009.
- ALTIOK, T.; MELAMED, B. The case for modeling correlation in manufacturing systems. **IIE Transactions**, v.33, p. 779-791, 2001.
- APARISI, F.; DÍAZ, J. C. G. Optimization of univariate and multivariate exponentially weighted moving-average control charts using genetic algorithms. **Computers & Operations Research**, v. 31, p. 1437–1454, 2004.
- APLEY, D. W.; LEE, H. C. Design of exponentially weighted moving average control charts for autocorrelated processes with model uncertainty. **Technometrics**, v. 45, n.3, p.187-199, 2003.
- APLEY, D. W.; SHI, J. The GLRT for statistical process control of autocorrelated processes. **IIE Transactions**, v. 31, p.1123-1134, 1999.
- APLEY, D. W.; TSUNG, F. The Autoregressive T^2 Chart for Monitoring Univariate Autocorrelated Processes. **Journal of Quality Technology**, v. 34, n. 1, p. 80-96, 2002.
- ARKAT, J.; NIAKI, S. T. A.; ABBASI, B. Artificial neural networks in applying MCUSUM residuals charts for AR(1) processes. **Applied Mathematics and Computation**, v.189, p.1889-1901, 2007.
- ATIENZA, O. O. ; TANG, L. C. ; ANG, B. W. ARL Properties Of A Sample Autocorrelation Chart. **Computers & Industrial Engineering**, v. 33, n. 3-4, p. 733-736, 1997.
- ATIENZA, O. O. ; TANG, L. C. ; ANG, B. W. A Uniformly Most Powerful Cumulative Sum Scheme Based on Symmetry. **Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)**, v. 49, n. 2, p. 209-217, 2000.
- ATIENZA, O. O. ; TANG, L. C. ; ANG, B. W. A CUSUM Scheme for Autocorrelated Observations. **Journal of Quality Technology**, v. 34, n. 2, p.197-199, 2002.

BALESTRASSI, P. P. **Identificação de padrões em gráficos de controle estatístico de processos, em tempo real, utilizando séries temporais e redes neurais artificiais.**

Florianópolis, 2000, Tese Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

BEGA, E. A.; DELMÉE, G. J.; COHN, P. E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V. S. **Instrumentação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

BEZZO, F.; MICHELETTI, F.; MURADORE, R.; BAROLO, M. Using MPC to control middle-vessel continuous distillation columns. **Journal of Process Control**, v.15, p. 925–930, 2005.

BIJ, J.; EKERT J. H. W. Integration between production control and quality control. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 7, p. 674, 1999.

BOSCO, F. Fazendo a diferença. **Petro&Química**, Rio de Janeiro, edição 305, 2008.

BOX, G.; COLEMAN, D. E.; BAXLEY, R. V. A Comparison of Statistical Process Control and Engineering Process Control. **Journal of Quality Technology**, v. 29, p. 128-130, 1997.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. **Time series analysis: forecasting and control**. 3. ed. New Jersey, USA; Prentice-Hall, 1994.

BOX, G.; LUCEÑO, A. Discrete Proportional-Integral Adjustment and Statistical Process Control. **Journal of Quality Technology**, v. 29, p. 248-60, 1997.

BOX, G.; KRAMER, T. Statistical Process Monitoring and Feedback Adjustment: A Discussion. **Technometrics**, v.34, n. 3, p. 251-267, 1992.

CAPILLA, C.; FERRER, A.; ROMERO, R.; HUALDA, A. Integration of Statistical and Engineering Process Control in a Continuous Polymerization Process. **Technometrics**, v.41.1, p.14, 1999.

CASTAGLIOLA, P.; TSUNG, F. Autocorrelated SPC for Non-Normal Situations. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 21, p. 131-161, 2005.

CHEN, Y. K.; HSIEH, K. L. Hotelling's T2 charts with variable sample size and control limit. **European Journal of Operational Research**, v. 182, p. 1251–1262, 2007.

CHEN, S.; YANG, C.; LIN, W.; YEH, T. Performance evaluation for introducing statistical process control to the liquid crystal display industry. **International Journal of Production Economics**, v. 111, p. 80–92, 2008.

CHENG, J. C.; CHOU, C. Y. A real-time inventory decision system using Western Electric run rules and ARMA control chart. **Expert Systems with Applications**, v.35, p. 755–761, 2008.

CHIU, C.; SHAO, Y. E.; LEE, T.; LEE, K. Identification of process disturbance using SPC/EPC and neural network. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 14, p. 379-388, 2003.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. 2. ed. São Paulo: Ed. dos Autores, 2006.

CLARO, F. A. E.; COSTA, A. F. B.; MACHADO, M. A. G. Gráficos de controle de EWMA e de para monitoramento de processos autocorrelacionados. **Produção**, v. 17, n. 3, p. 536-546, 2007.

COMINOS, P.; MUNRO, N. PID controllers: recent tuning methods and design to specification. **IEE Proceedings Control Theory Applied**, v.149, n. 1, p. 46-53, 2002.

COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. 1. ed. São Paulo: Ed. Atlas, 2004.

CROWDER, S. V.; HAWKINS, D. M.; REYNOLDS, M. R.; YASHCHIN, E. Process Control and Statistical Inference. **Journal of Quality Technology**, v. 29, p. 134-139, 1997.

D'AZZO, J. J.; HOUPIS, C. H. **Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1981.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 1. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

DYER, J. N.; CONERLY, M. D.; ADAMS, B. M. A simulation study and evaluation of multivariate forecast based control charts applied to ARMA processes. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 73, n. 10, p. 709-724, 2003.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

ELEVLI, S.; UZGOREN, N.; SAVAS, M. Control charts for autocorrelated colemanite data. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 68, p. 11-17, 2009.

ENGLISH, J. R., LEE, S. C., MARTIN, T. W.; TILMON, C. Detecting changes in autoregressive processes with \bar{X} and EWMA charts. **IIE Transactions**, v.32, p.1103-1113, 2000.

FALTIN, F. W.; MASTRANGELO, C. M.; RUNGER, G. C.; RYAN, T. P. Considerations in the Monitoring of Autocorrelated and Independent Data. **Journal of Quality Technology**, v. 29 p. 131-133,1997.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da Produção e Operações**. 8. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

GAL, I. B.; MORAG, G.; SHMILOVICI, A. Context-based statistical process control: a monitoring procedure for state-dependent processes. **Technometrics**, v. 45, n. 4, p. 293-311, 2003.

GARCIA, C. **Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

GAOA, J.; PATWARDHANA, R.; AKAMATSUB, K.; HASHIMOTOB, Y.; EMOTO, G.; SHAHC, S. L.; HUANGC, B. Performance evaluation of two industrial MPC controllers. **Control Engineering Practice**, v. 11, p. 1371–1387, 2003.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

GONZÁLEZ, I.; SÁNCHEZ, I. Principal Alarms in Multivariate Statistical Process Control. **Journal of Quality Technology**, v. 40, n. 1, p.19-30, Jan 2008.

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C.; GOLDSMAN, D. M.; BORROR C. M. **Probabilidade e Estatística na Engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

HOERL, R. W.; PALM, A. Discussion: Integrating SPC and APC. **Technometrics**, v. 34, n. 3, p. 268-272, 1992.

IAPAR, **Instituto Ambiental do Paraná**, <<http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento>> . Acesso em 14 de março de 2010.

JACOBI, L. F.; SOUZA, A. M.; PEREIRA, J. E. S. Gráfico de controle de regressão aplicado na monitoração de processos. **Revista Produção**, v. 12, n. 1, p. 46-59, 2002.

JANA, A. K.; SAMANTA, A. N.; GANGULY, S. Globally linearized control system design of a constrained multivariable distillation column. **Journal of Process Control**, v.15, p. 169–181, 2005.

JIANG, W. **Charting techniques in integrated APC and SPC environments**. Hong Kong University, Department of Industrial Engineering and Engineering Management. Abstract Thesis Ph.D,1999.

JIANG, W.; TSUI, K. L. An economic model for integrated APC and SPC control charts. **IIE Transactions**, v. 20, p. 505-513, 2000.

JIANG, W.; TSUI, K. L. SPC Monitoring of MMSE- and PI-Controlled Processes. **Journal of Quality Technology**, v. 34, n. 4, p. 384-398, 2002.

JIANG, W.; TSUI, K. L.; WOODALL, W. H. A New SPC Monitoring Method: The ARMA Chart. **Technometrics**, v. 42, n. 4, p.399-410, 2000.

JONES, L. A.; CHAMP, C. W.; RIGDON, S. E. The Performance of Exponentially Weighted Moving Average Charts With Estimated Parameters. **Technometrics**, v. 43, n.2, 156-167, 2001.

KHAN, A. A.; MOYNE, J. R.; TILBURY, D. M. Virtual metrology and feedback control for semiconductor manufacturing processes using recursive partial least squares. **Journal of Process Control**, v. 18, p. 961–974, 2008.

KIM, S. H.; ALEXOPOULOS, C.; TSUI, K. L.; WILSON, J. R. A distribution-free tabular CUSUM chart for autocorrelated data. **IIE Transactions**, v. 39, p. 317-330, 2007.

KNOTH, S.; AMIN, R. W. Autocorrelation and tolerance limits. **Journal of Statistical Computation and Simulation**, v. 73, n. 7, p. 467-489, 2003.

KOURTI, T. The Process Analytical Technology initiative and multivariate process analysis, monitoring and control. **Bioanal Chemistry**, n. 384, p. 1043-1048, 2006.

KOURTI, T.; LEE, J. ; MACGREGOR, J. F. Experiences with industrial applications of projection methods for multivariate statistical process control. **Computers chem. Eng.**, v. 20, p. 745-750, 1996

LAGO NETO, J.C. **O Efeito da Autocorrelação em Gráficos de Controle para Variável Contínua: um Estudo de Caso**. Florianópolis, 1999, Dissertação de Mestrado (Resumo), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

LOQUASTO, F.; SEBORGT, D. E. Model Predictive Controller Monitoring Based on Pattern Classification and PCA. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE. **Anais...** Denver, Colorado, 4 a 6 de junho, 2003.

LOREDO, E. N.; JEARKPAPORN, D.; BORROR, C. M. Model-based control chart for autoregressive and correlated data. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 18, p. 489-496, 2002.

LU, C. W.; REYNOLDS JR., M. R. EWMA Control Charts for Monitoring the Mean of Autocorrelated Processes. **Journal of Quality Technology**, v. 31, n.2, p. 166-188, 1999a.

LU, C. W.; REYNOLDS JR., M. R. Control Charts for Monitoring the Mean and Variance of Autocorrelated Processes. **Journal of Quality Technology**, v. 31, n.3, p. 259-274, 1999b.

LU, C. W.; REYNOLDS JR., M. R. Cusum Charts For Monitoring An Autocorrelated Process. **Journal of Quality Technology**, v. 33, n. 3, p. 316-334, 2001.

LUCAS, J. M.; SACCUCCI, M. S. Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements. **Technometrics**, v. 32, n.1, p. 1-12, 1990.

MACGREGOR, J. F. Discussion: Integrating SPC and APC. **Technometrics**, v.34, n. 3, p. 273-275, 1992.

MACGREGOR, J. F.; KOURTI, T. Statistical process control of multivariate processes. **Control Eng.. Practice**, v. 3, n. 3, p. 403-414, 1995.

MAKRIDAKIS, S. ; WHEELWRIGHT, S. C. ; HYNDMAN, R. J. **Forecasting: Methods and Applications**. 3^a ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1998.

MASON, R. L.; CHAMP, C. W.; TRACY, N. D.; WIERDA, S. J.; YOUNG, J. C. Assessment of Multivariate Process Control Techniques. **Journal of Quality Technology**, v. 29, p. 140-143, 1997.

MASON, R. L.; YOUNG, J. C. Why multivariate statistical process control? **Quality Progress**, v.31, n.12; ABI/INFORM Global, pg. 88-93, Dec. 1998.

MASTRANGELO, C. M.; FORREST, D. R. Multivariate Autocorrelated Processes: Data and Shift Generation. **Journal of Quality Technology**, v. 34, n. 2, p. 216-220, 2002.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

MINGOTI, S. A.; YASSUKAWA, F. R. S. Uma comparação de gráficos de controle para a média de processos autocorrelacionados. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, v.3 n.1, p. 55-73, 2008.

MILETIC, I.; QUINN, S.; DUDZIC, M.; VACULIK, V.; CHAMPAGNE, M. An industrial perspective on implementing on-line applications of multivariate statistics. **Journal of Process Control**, v. 14, p. 821–836, 2004.

MONTENEGRO, P. H. M.; RIUL, J. A.; OLIVEIRA, B. S.; SILVA, S. A. Controladores adaptativos de temperatura em um túnel psicrométrico. **Controle & Automação**, v. 17, n. 3, p. 257-264, 2006.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2^a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MORARI, M.; LEE, J. H. Model predictive control: past, present and future. **Computers and Chemical Engineering**, v.23, p. 667–682, 1999.

MOREIRA, F. J. J. **Proposta de um método para o controle estatístico de processo para observações autocorrelacionadas**, Porto Alegre, 2005, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

MOREIRA JR., F. J.; CATEN, C. S. T. Proposta de uma carta de controle estatístico de dados autocorrelacionados. In: XXIV ENCONTRO NAC. DE ENG. DE PRODUÇÃO, novembro de 2004, **Anais...** Associação Brasileira de Engenharia de Produção, p.1713-1720, Florianópolis- SC 2004.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004

MORO, L. F. L. Process technology in the petroleum refining industry /current situation and future trends. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 1303-1305, 2003.

NIPPERT, C. Simple models that illustrate dynamic matrix control. In: 2002 AMERICAN SOCIETY FOR ENGINEERING EDUCATION ANNUAL CONFERENCE &

EXPOSITION, session 3513, 2002. **Anais...** American Society for Engineering Education, 2002.

NOFFSINGER, J. R.; ANDERSON, R. B. Effect of autocorrelated data on composite panel production monitoring and control: a comparison of SPC techniques. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 3, p. 60-67, 2002.

NORMEY-RICO, J. E.; SILVESTRE, D. S.; POZAS L. F.; PASETTI, G. Utilização da Técnica de Controle Preditivo Multi-Variável GPC no Controle de Temperatura de Topo e Fundo de uma coluna de destilação depropanizadora simulada no simulador industrial INDISS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3º, 2005, Salvador, BA: 2005.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo: Perason Prentice Hall, 2003.

OLIVEIRA, S. L. **Tratado de metodologia científica**: Projetos de pesquisas, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses. 2. ed. São Paulo: Ed. Pioneira Thomson Learning, 2001.

O'REILLY, J. **Multivariable control for industrial applications**. 1. ed. London: Peter Peregrinus LTD; 1987.

PALM, A. C.; RODRIGUEZ, R. N.; SPIRING, F.A.; WHEELER, D. J. Some Perspectives and Challenges for Control Chart Methods, **Journal of Quality Technology**, v. 29, p.122-7, 1997.

PAN, R.; CASTILLO, E. Integration of Sequential Process Adjustment and Process Monitoring Techniques. **Quality and Reliability Engineering International**, v.19, n. 4 , p. 371 – 386, 2003

PASQUALINI, A. **Estudo de Caso Aplicado a Galvanoplastia**. Florianópolis, 2004, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

PEDRINI, D. C.; CATEN C. S.T. Comparação Entre Gráficos de Controle Para Resíduos de Modelos. In: XV SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – SIMPEP. **Anais ...** 10 a 12 de novembro de 2008.

PHILLIPS, C. L.; HARBOR, R. D. **Sistemas de controle e realimentação**. 1. ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

PORTUGAL, L. S. **Simulação de tráfego**: conceitos e técnicas de modelagem. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

QIN, S. J., BADGWELL, T. A. An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology. **Chemical Process Control of AIChE Symposium Series**, v. 93, p.232-256, 1997.

REINIKAINEN, S. P. ; HOSKULDSSON, A. Multivariate statistical analysis of a multi-step industrial processes. **Analytica Chimica Acta**, v. 595, p. 248–256, 2007.

REYNOLDS JR, M.R.; LU, C. W. Control Chart for Monitoring Process With Autocoorelated Data. **Nonlinear Analysis, Methods & Applications**, v. 30, n. 7, p. 4059-4067, 1997.

REYNOLDS JR, M. R.; PARK, C. CUSUM charts for detecting special causes in integrated process control. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 26, p. 199–221, 2009.

REYNOLDS JR, M.R.; STOUMBOS, Z. G. Should exponentially weighted moving average and cumulative sum charts be used with Shewhart limits. **Technometrics**, v. 47, n. 4, p. 409-424, Nov.2005

ROSA, A. L.; ROCHA, W. F. C.; MARTINS, J. A.; POPPI, R. J. Cartas de Controle Multivariada baseada no Sinal Analítico Líquido. In.: 30ª REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, **Anais...** Águas de Lindóia –SP, 2007.

RUNGER, G. C. Assignable Causes and Autocorrelation: Control Charts for Observations or Residuals? **Journal of Quality Technology**, v. 34, n. 2, p. 165-170, 2002

RUNGER, G.; WILLEMAIN, T. Model-based and model-free control of autorrelated process. **Journal of Quality Technology**, v. 27, p. 283-292, 1995.

SANTANA, R. A. C.; CAMPOS, A. R. N.; PRASAD, S.; LEITE, V. D. Otimização do Banho Eletrolítico da Liga Fe-W-B Resistente à Corrosão. **Quimica Nova**, v. 30, n. 2, p.360-365, 2007.

SANTOS, M. G. M. **Controle e otimização em tempo real de um reator trifásico**. Campinas, SP: 2006. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, 2006.

SCHIPPERS, W.A.J. An integrated approach to process control. **International Journal of Production Economics**, v.69, p. 93-105, 2001.

SCHWARTZ, R. J. **Sistemas lineares**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, v.1, 1972.

SHAO, Y. E. Integrated application of the cumulative score control chart and engineering process control. **Statistica sinica**, v. 8, p. 239-252, 1998.

SHAPIRO, H. N.; MORAN, M. J.; MUNSON, B. R.; DEWITT, D. P. **Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2005.

SHU, L.; TSUNG, F.; TSUI, K. L.; Run-Length Performance of Regression Control Charts with Estimated Parameters. **Journal of Quality Technology**, v. 36, n. 3, p. 280-292, 2004.

SILVA, W. V.; FONTANINI, C. A. C.; CORSO, J. M. D. Garantia da qualidade do café solúvel com o uso do gráfico de controle de somas acumuladas. **Revista Produção On Line**, v. 7, n. 2, p. 43-63, 2007.

SOUZA, A. M.; **Monitoração e ajuste de realimentação em processos produtivos multivariados**. Florianópolis, 2000, Tese Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

SOUZA, E. T. I. **Integração de processos químicos contínuos em tempo real**: estudo de caso para fornos rotativos de incineração. Campinas, SP: 2004. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, 2004.

SOUZA, A. M.; SAMOBYL, R. W.; MALAVÉ, C. O. Aplicação de um modelo paramétrico multivariado para o controle da temperatura de fornos de túnel. **Revista Produção**, v. 14, n. 2, p. 82-94, 2004a.

SOUZA, A. M.; SAMOBYL, R. W.; MALAVÉ, C. O. Multivariate feed back control: an application in a productive process. **Computers & Industrial Engineering**, v. 46, p. 837–850, 2004b.

SPANDRI, R. Sintonia de controladores regulatórios: sintonia de controladores PID. **Boletim técnico Petrobrás**, v. 46, n. 3/4, p. 383-410, 2003.

STOUMBOS, Z. G.; REYNOLDS, M. R, RYAN, T. P.; WOODALL, W. H. The State of Statistical Process Control as We Proceed into the 21st Century. **Journal of the American Statistical Association**, v. 95, n. 451, p. 992- 998, 2000.

STUART, M.; MULLINS, E.; DREW, E.. Statistical quality control and improvement. **European Journal of Operational Research**, v. 88, p. 203-214, 1996.

SURTEC. **Manual Técnico SurTec**: Tratamentos de Superfícies. 3. ed. São Paulo: SurTec do Brasil Ltda, 2009.

TIMMER, D. H.; PIGNATIELLO JR., J. J.; LONGNECKER, M. T. Applying an ar(1) cusum control chart to data from a chemical process. **Quality Engineering**, v.13, n. 1, p. 107-114, 2000.

TOKATLI, F.; CINAR, A; SCHLESSER, J. E. HACCP with multivariate process monitoring and fault diagnosis techniques: application to a food pasteurization process. **Food Control**, v. 16, p. 411–422, 2005.

TSENG, S. T.; CHOU, R. J.; LEE, S. P. A study on a multivariate EWMA controller. **IIE Transactions**, v. 34, p. 541-549, 2002.

TSUNG, F. A note on statistical monitoring of Engineering controlled processes. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-14 , 2001.

TSUNG, F.; APLEY, D. W. The dynamic T 2 chart for monitoring feedback-controlled processes. **IIE Transactions**, v. 34, p. 1043–1053, 2002.

TSUNG, F.; SHI, J. Integrated design of run-to-run PID controller and SPC monitoring for process disturbance rejection. **IIE Transactions**, v.31, p. 517-527, 1999.

TSUNG, F.; SHI, J.; WU, C. F. J. Joint Monitoring of PID-Controlled Processes. **Journal of Quality Technology**, v. 31, n. 3, p. 275-85, 1999.

TSUNG, F.; TSUI, K. L. A mean-shift pattern study on integration of SPC and APC for process monitoring. **IIE Transactions**, v. 35, p. 231-242, 2003.

TUCKER, W. T. Discussion: Integrating SPC and APC. **Technometrics**, v.34, n. 3, p. 275-277, 1992.

UNDEY, C.; TATARA, E ; ÇINAR, A. Real-time batch process supervision by integrated knowledge-based systems and multivariate statistical methods. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 16, p. 555–566, 2003.

VAN DE VEGTE, J. **Feedback Control Systems**. New Jersey-EUA: Prentice-Hall, 1986.

VANBRACKLE III, L. N.; REYNOLDS JR, M. R. EWMA and CUSUM control charts in the presence of correlation. **Communications in Statistics - Simulation and Computation**, v. 26, n.3, p. 979-1008, 1997.

VENKATASUBRAMANIAN, V.; RENGASWAMY, R.; KAVURI, S. N.; YIN, K. A review of process fault detection and diagnosis Part III: Process history based methods. **Computers and Chemical Engineering**, v. 27, p. 327-346, 2003.

VENKATESAN, G. Process control of product quality. **ISA Transactions**, v. 42, p. 631–641, 2003.

VERMAAT, M. B.; DOES, R. J. M. M.; BISGAARD, S. EWMA Control Chart Limits for First-and Second-Order Autoregressive Processes. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 24, n. p. 573–584, 2008.

VERMAAT, M.B.; MEULEN, F.H.; DOES, R. J. M. M. Asymptotic behavior of the variance of the EWMA statistic for autoregressive processes. **Statistics and Probability Letters**, v. 78, p.1673–1682, 2008.

WANG, K.; TSUNG, F. An Adaptive T2 Chart for Monitoring Dynamic Systems. **Journal of Quality Technology**, v. 40, n.1, p. 109-123, 2008.

WARDROP, D. M.; GARCIA, C. E. Discussion: Integrating SPC and APC. **Technometrics**, v.34, n. 3, p. 281-282, 1992.

WIEL, S. A. V.; TUCKER, W. T.; FALTIN, F.W.; DOGANAKSOY, N. Algorithmic statistical process control: concepts and an application. **Technometrics**, v. 34, n. 3, p. 286-297, 1992.

WIEL, S. A. V.; VARDEMAN, S. B. Discussion: Integrating SPC and APC. **Technometrics**, v.34, n. 3, p. 278-281, 1992.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

WOODALL, W. H. Controversies and Contradictions in Statistical Process Control. **Journal of Quality Technology**, v. 32, n. 4, p. 341-378, 2000.

WOODALL, W. H.; SPITZNER, D. J.; MONTGOMERY, D. C.; GUPTA, S. Using Control Charts to Monitor Process and Product Quality Profiles. **Journal of Quality Technology**, v. 36, n. 3, p. 309-320, 2004.

WRIGHT, C.M.; BOOTH, D.E.; HU, M.Y. Joint Estimation: SPC Method for Short-Run Autocorrelated Data. **Journal of Quality Technology**, v.33, n. 3, p. 365-378, 2001.

WU, J.; MAKIS, V. Economic and economic-statistical design of a chi-square chart for CBM. **European Journal of Operational Research**, v. 188, p. 516–529, 2008.

YANG, S.F.; RAHIM, M.A. Economic statistical process control for multivariate quality characteristics under Weibull shock model. **International Journal of Production Economics**, v. 98, p. 215–226, 2005.

YANG, L.; SHEU, S. Integrating multivariate engineering process control and multivariate statistical process control. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 29, p. 129-136, 2006.

YE, N.; BORROR, C.; ZHANG, Y. Techniques for computer intrusion detection through anomalous changes in event intensity. **Quality And Reliability Engineering International**, v. 18, p. 443–451, 2002.

YOUNG, T. M.; WINISTORFER, P. M. The effects of autocorrelation on real-time statistical process control with solutions for forest products manufacturers. **Forest Products Journal**, v. 51, n. 11/12, p. 70-77, 2001.

YU, J.; XI, L. A neural network ensemble-based model for on-line monitoring and diagnosis of out-of-control signals in multivariate manufacturing processes. **Expert Systems with Applications**, doi:10.1016/j.eswa.2007.10.003, 2007.

YU, J., ZHANG, Z.; XU, L. Process monitoring for integration of SPC and APC based on BP neural network. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION. **Anais...** IEEE computer society, p. 378-381, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO DOS COMPORTAMENTOS DAS VARIAÇÕES NATURAIS INERENTES AO PROCESSO – VARIÁVEL TEMPERATURA

A.1 TEMPERATURA MÉDIA SEMANAL

Tabela A.1.1 – Temperatura Média Semanal, Cidade de Pato Branco– 01/01/2009 a 30/12/2009

Semana	Temperatura Média (C°)	Semana	Temperatura Média (C°)	Semana	Temperatura Média (C°)
1	19,4	19	18,2	37	16,1
2	22,4	20	14,4	38	16,5
3	20,8	21	17,5	39	16,1
4	22,5	22	10,9	40	18,6
5	22,1	23	12,5	41	18,2
6	23,2	24	11,6	42	18,8
7	22,4	25	14,4	43	19,8
8	23,6	26	13,9	44	24,6
9	23,6	27	15,7	45	22
10	22,3	28	12,5	46	23,3
11	21,4	29	14,6	47	23,3
12	22,2	30	9,9	48	23,1
13	22,1	31	13,3	49	22,8
14	22,4	32	16	50	21,7
15	20,5	33	17,9	51	23,5
16	18,8	34	13,5	52	23,5
17	18,8	35	19,9		
18	17,6	36	16,6		

[Fonte: adaptado de IAPAR (2010)]

Tabela A.1.2 - Teste de Kolmogorov-Smirnov e Chi-Squared de ajustamento a Distribuição Normal temperatura média semanal no software stattgraphics

Kolmogorov Smirnov	DPLUS	0,0983822	Chi-Squared	χ^2	32,6153
	DMINUS	0,149271			
	DN	0,149271		G.L.	22
	P-Value	0,197173		P-Value	0,0674949

[Fonte – próprio autor]

A.2 TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS

Na Tabela A.2.1 destaca-se que a amplitude da variação diária média, constante A, que é a metade da variação diária média apurada.

Tabela A.2.1 Temperaturas Diárias – variações médias

Variável	Temperaturas
Temp. Máxima Diária Média (°C)	25,2
Temp. Mínima Diária Média (°C)	14,4
Variação Diária Média (°C)	10,8
Constante A – Amp. da Variação Diária Média - Equação de Variação (°C)	5,4

[Fonte – próprio autor]

APÊNDICE B

DETERMINAÇÃO DOS COMPORTAMENTOS DAS VARIAÇÕES NATURAIS INERENTES AO PROCESSO – VARIÁVEIS VAZÃO DE SAÍDA E EVAPORAÇÃO

A Vazão de Saída (arraste das peças) é gerada sobre estimativas realizadas com os responsáveis pelo processo. Dois limites de reposição foram considerados, quando operando peças pequenas e grandes em ritmo de produção normal. Na ausência de registros formais ou de informações mais precisas, estabeleceram-se os limites (máximo e mínimo) de cada classificação de tamanho de peça. Obteve-se o consenso dos valores de reposição diários para peças pequenas: mínimo de 60 litros e máximo de 80 litros. Quando da produção de peças grandes os valores de reposição diários de: mínimo 50 litros e máximo 70 litros. Antes destas quantidades serem convertidas em $\text{cm}^3/\text{minuto}$, para serem utilizados na geração dos valores por meio de uma Distribuição de Probabilidade Uniforme, foram descontadas a estimativa de reposição em função da evaporação diária, uma vez que nas estimativas obtidas esta distinção não é realizada.

Para estimar a taxa média de evaporação, utilizaram-se doze amostras de 50 cm^3 da solução do tanque de cromagem, na mesma concentração recomendada para deposição (230 g/l), mantidas a 40°C durante 18 horas ininterruptas. A quantidade de amostras foi estabelecida em função da capacidade do equipamento disponibilizado pelo laboratório para realização das medições. Este ensaio foi realizado em laboratório químico externo à empresa. As amostras foram inseridas em tubos apropriados com diâmetro de 5 cm.

Após o período estabelecido o valor médio evaporado foi de 17 cm^3 . Na Tabela B.1 encontram-se os valores apurados na medição. Fazendo-se as devidas conversões e levando-se em consideração a área do tanque real, chegou-se ao valor médio de evaporação de $19,24 \text{ cm}^3/\text{min}$. Devido ao caráter e objetivo do estudo, não foi utilizado um modelo matemático para reproduzir o comportamento desta variável.

Considerando a evaporação constante, enquanto mantido o tanque aquecido, e a taxa de evaporação estipulada, foi estimada uma parcela de reposição diária de 27,7 litros em função deste efeito. Valor este, deduzido das estimativas globais informadas pelos responsáveis pelo processo em ambas as classificações de peças.

Tabela B.1 Evaporação constatada após teste em laboratório

Amostra	Volume Evaporado (ml)	Amostra	Volume Evaporado (ml)	Amostra	Volume Evaporado (ml)
1	18	5	16	9	16
2	20	6	16	10	17
3	18	7	14	11	18
4	17	8	17	12	17

[Fonte – laboratório externo à empresa]

APÊNDICE C

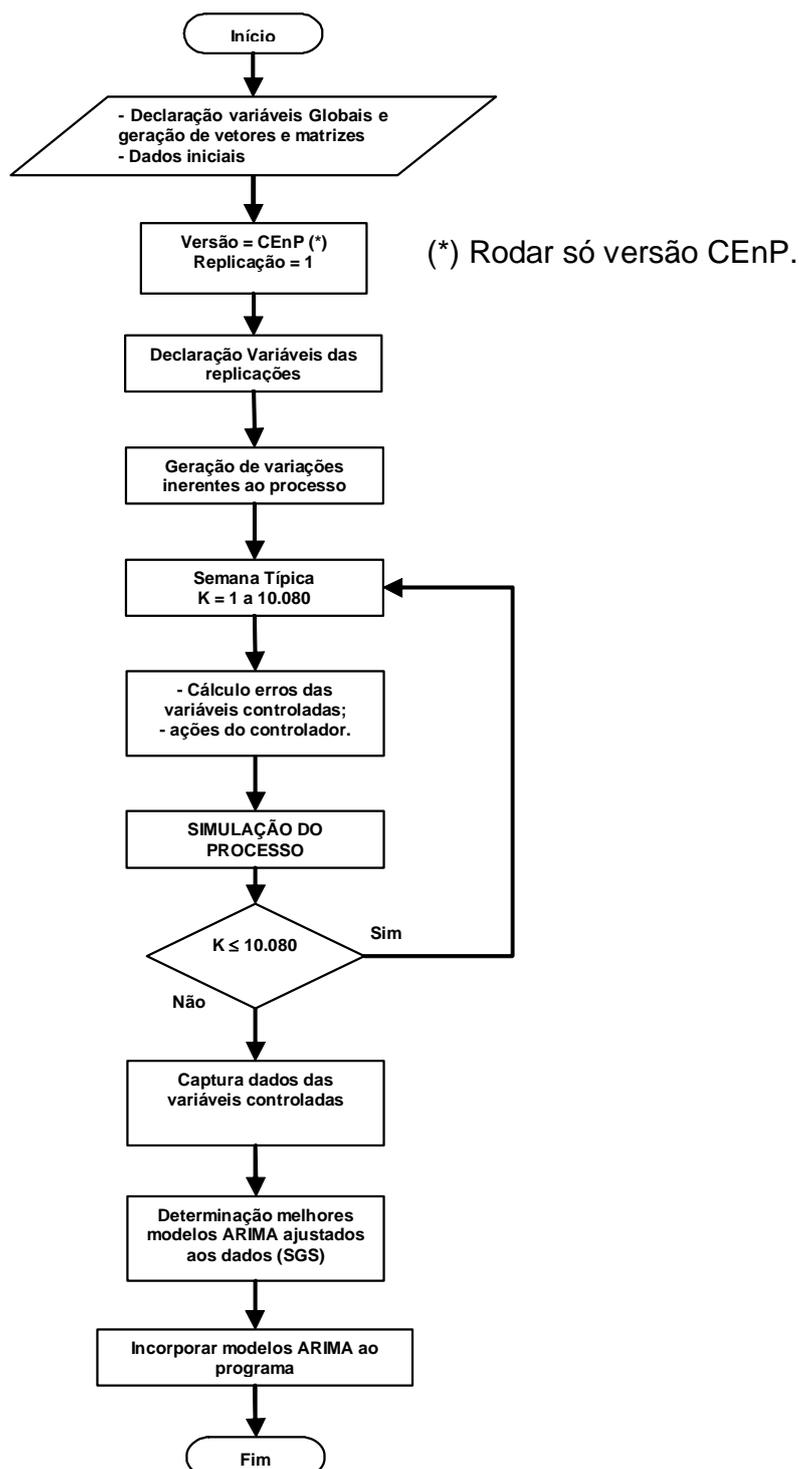
CONSTANTES ASSUMIDAS NO MODELO MATEMÁTICO PARA A SIMULAÇÃO

- Tempo de integração: $t_s=1$ min;
- Massa específica do banho (concentração 20 Bé 230g/cm^3): $\rho_{\text{banho}}=1,161$ g/cm^3 ;
- Calor específico do banho: $c_{\text{esp_banho}}=0,7$ $\text{cal}/(\text{g}\cdot\text{C}^\circ)$;
- Volume do banho: $\text{volume_banho}=2,28\text{e}6$ cm^3 ;
- Área do tanque em cm^2 : $\text{area_tq}=2,4\text{e}4$ cm^2 ;
- Massa específica do ácido crômico concentrado (460g/l): $\rho_{\text{cromo}}=1,23$ g/cm^3 ;
- Massa específica da água de enxágue: $\rho_{\text{agua}}=1,01$ g/cm^3 ;
- Equivalente eletroquímico do cromo: $\text{eqv}=0,323$ $\text{g}/(\text{A}\cdot\text{h})$;
- Rendimento da corrente em (%): $\text{rc}=20\%$;
- Vazão de saída por evaporação: $\text{qevap_a}=19,24$ cm^3/min ;
- Taxa de troca térmica do banho com o ambiente: $\alpha=0,0102(1/\text{min})$;
- Conversão Watt para cal/mim (para $\text{cal}/\text{seg}=4,1868$): $\text{conversao}=0,06978$;
- Nível de referência (alvo) do banho para o calculo do erro do controlador: $\text{nivel_ref}=95$ cm ;
- Densidade de referência (alvo) do banho para o calculo do erro do controlador: $\text{conc_ref}=1,161$ g/cm^3 ;
- Temperatura de referência (alvo) do banho para o calculo do erro do controlador: $t_{\text{ref}}=40$ C° ;

Fonte: Wolyneec (2003); Gentil (2007) e Surtec (2009) ou através dos responsáveis pelo processo industrial.

APÊNDICE D

FLUXOGRAMA DE SIMULAÇÃO

MÓDULO 2 - PRIMEIRA ETAPA DE SIMULAÇÃO
Rodada Preliminar – dados para ajuste Modelos ARIMA

APÊNDICE E

AJUSTE MODELOS ARIMA

E.1 TEMPERATURA DO BANHO (Tb)

Tabela E.1 – Critérios de acurácia para identificação dos melhores modelos - Temperatura

Modelo avaliado	AIC	HQC	SBIC
ARIMA(2,0,1) com constante	-10,294	-10,284	-10,268
ARIMA(3,0,2) com constante	-10,281	-10,266	-10,243
ARIMA(4,0,2) com constante	-10,272	-10,255	-10,227

[Fonte – próprio autor]

As estimativas dos parâmetros são significativos ($P \leq 0,05$) e encontram-se na Tabela E.2.

Tabela E.2 – Parâmetros modelo ARIMA - Temperatura

Parâmetros	Valores Estimados	Valor P
AR1	1,956	0,000000
AR2	-0,956	0,000000
MA1	0,872	0,000000
Média	39,836	0,000000
Constante	0,0089	

[Fonte – próprio autor]

Na fase de verificação, foi realizado para averiguar a adequação do modelo o teste de aleatoriedade dos resíduos de Box-Pierce. A estatística do teste obtida, resultou em 81,752, com Valor P igual 0,8664, que é maior que 5%, indicando que não se pode rejeitar a hipótese que os resíduos são aleatórios. Sendo assim, têm-se indícios de que o modelo está bem ajustado aos dados. Através dos correlogramas de autocorrelação e autocorrelação parcial, Figuras E.1 e E.2, percebe-se que as autocorrelações e autocorrelações parciais são de pequena intensidade, considerou-se que o modelo está bem ajustado aos dados.

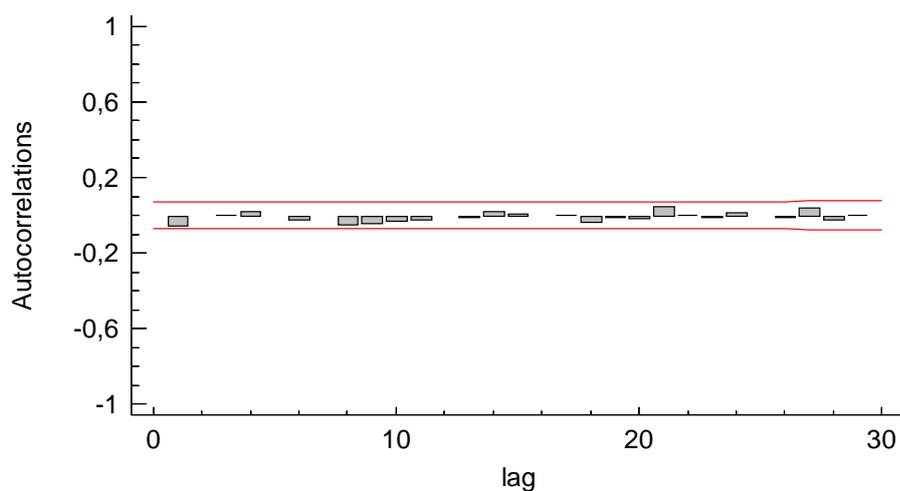


Figura E.1 – Correlogramas das Autocorrelações dos Resíduos – Temperatura
[Fonte – próprio autor]

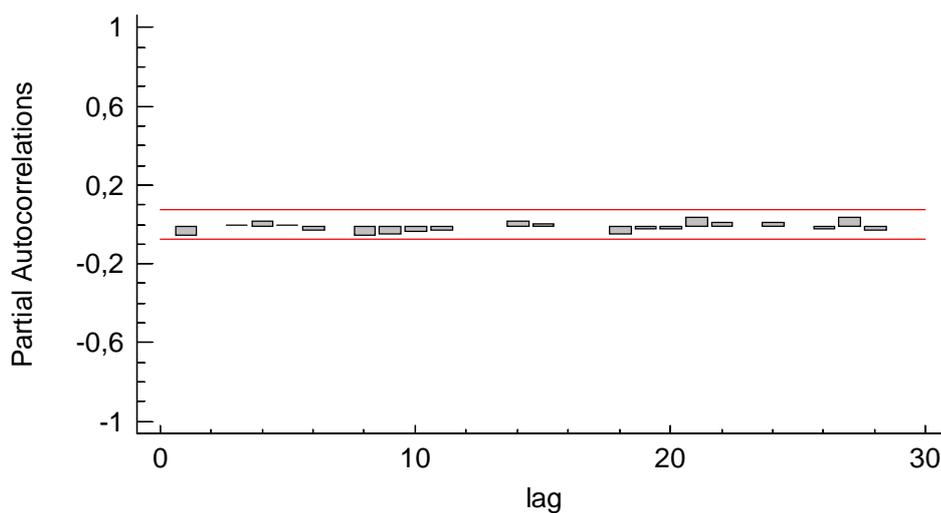


Figura E.2 – Correlogramas das Autocorrelações Parciais dos Resíduos – Temperatura
[Fonte – próprio autor]

E.2 NÍVEL DO BANHO (H)

Tabela E.3 – Critérios de acurácia para identificação dos melhores modelos - Nível

Modelo avaliado	AIC	HQC	SBIC
ARIMA(5,1,5)	-16,217	-16,192	-16,153
ARIMA(2,1,3)	-16,204	-16,191	-16,172
ARIMA(3,1,2)	-16,198	-16,186	-16,166

[Fonte – próprio autor]

As estimativas dos parâmetros de mais alta ordem são significativas ($P \leq 0,05$). Os valores encontram-se na Tabela E.4.

Tabela E.4 – Parâmetros modelo ARIMA - Nível

Parâmetros	Valores Estimados	Valor P
AR1	0,534065	0,002316
AR2	0,467331	0,075512
AR3	0,730996	0,000897
AR4	-0,0137058	0,957732
AR5	-0,722468	0,000018
MA1	0,304271	0,091908
MA2	0,375969	0,098980
MA3	0,702148	0,000594
MA4	0,157701	0,501396
MA5	-0,548585	0,000012

[Fonte – próprio autor]

O teste de aleatoriedade dos resíduos de Box-Pierce indicou como resultado a estatística 92,3383 e respectivo Valor P de 0,411998. Sendo este último maior que 5%, não se pode rejeitar a hipótese que os resíduos são aleatórios. Tendo-se assim indícios de que o modelo está bem ajustado aos dados.

Os resíduos também foram verificados através dos correlogramas de autocorrelação e autocorrelação parcial, Figuras E.3 e E.4. Os valores das autocorrelações estão dentro do intervalo de confiança estabelecido (95%), exceto o *lag* 2 que o ultrapassou ligeiramente (Figura E.3). As autocorrelações parciais também possuem pequenos valores (menores que 0,10), estando também os valores dentro do intervalo de confiança (95%), exceto os *lag's* 2, 3 e 7), os quais ligeiramente o ultrapassam (Figura E.4). Makridakis, Wheelwright e Hyndman (1998) admitem ser aceitável se ter em torno de 5% dos *lag's* ultrapassando a curtas distâncias este limites.

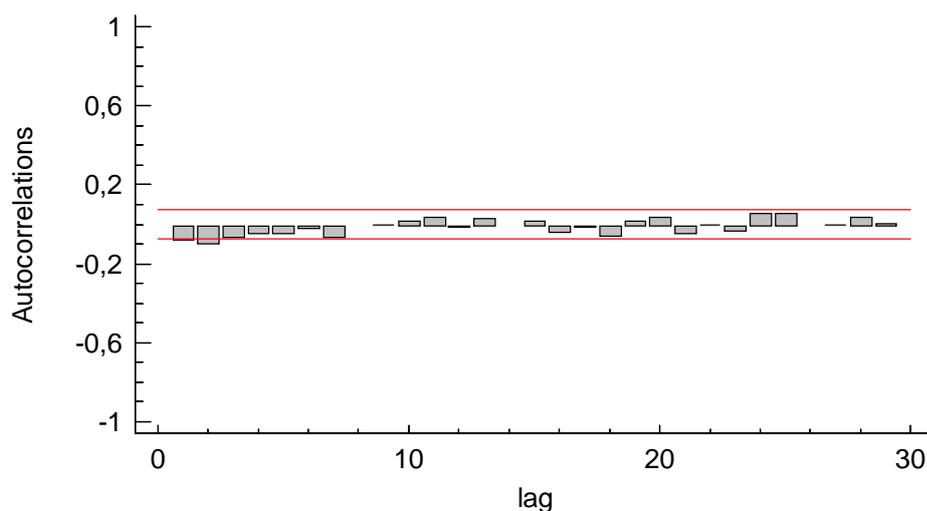


Figura E.3 – Correlogramas das Autocorrelações dos Resíduos – Nível
[Fonte – próprio autor]

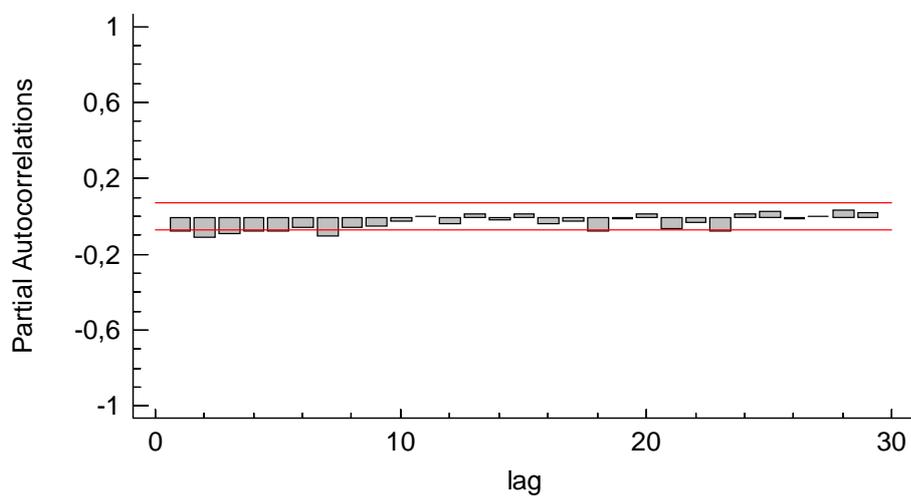


Figura E.4 – Correlogramas das Autocorrelações Parciais dos Resíduos – Nível
[Fonte – próprio autor]

E.3 DENSIDADE DO BANHO (τ)

Tabela E.5 – Critérios de acurácia para identificação dos melhores modelos - Densidade

Modelo avaliado	AIC	HQC	SBIC
ARIMA(5,2,6) com constante	-31,3563	-31,3268	-31,28
ARIMA(6,2,3) com constante	-31,3554	-31,3308	-31,2918
ARIMA(5,2,4) com constante	-31,3477	-31,3232	-31,2841

[Fonte – próprio autor]

Verificou-se pelo teste dos resíduos de Box-Pierce que o modelo apontado pelos critérios HQC/SBIC possui uma pior adequação aos dados. Optou-se por utilizar o modelo indicado pelo critério AIC.

As estimativas dos parâmetros de mais alta ordem são significativas ($P \leq 0,05$). Os valores encontram-se na Tabela E.6. O parâmetro Média, neste modelo, não foi considerado por apresentar o respectivo valor P superior a 5%.

Tabela E.6 – Parâmetros modelo ARIMA - Densidade

Parâmetros	Valores Estimados	Valor P
AR1	0,509589	0,000000
AR2	0,693324	0,000000
AR3	0,262175	0,000000
AR4	0,249793	0,000000
AR5	-0,717539	0,000000
MA1	1,09382	0,000000
MA2	0,393003	0,000000
MA3	-0,245258	0,000000
MA4	0,0302781	0,000000
MA5	-0,70277	0,000000
MA6	0,397911	0,000000
Média	1,30131E-7	0,850560
Constante	3,45736E-10	

[Fonte – próprio autor]

O teste de aleatoriedade dos resíduos de Box-Pierce apontou como resultado a estatística 20,8724 e Valor P de 0,0754904. Sendo este último valor maior que 5%, não se pode rejeitar a hipótese que os resíduos são aleatórios. Tendo-se assim indícios de que o modelo está bem ajustado aos dados. Através dos correlogramas de autocorrelação e autocorrelação parcial, Figuras E.5 e E.6, percebe-se que as autocorrelações e autocorrelações parciais são de pequena intensidade, considerou-se que o modelo está bem ajustado aos dados.

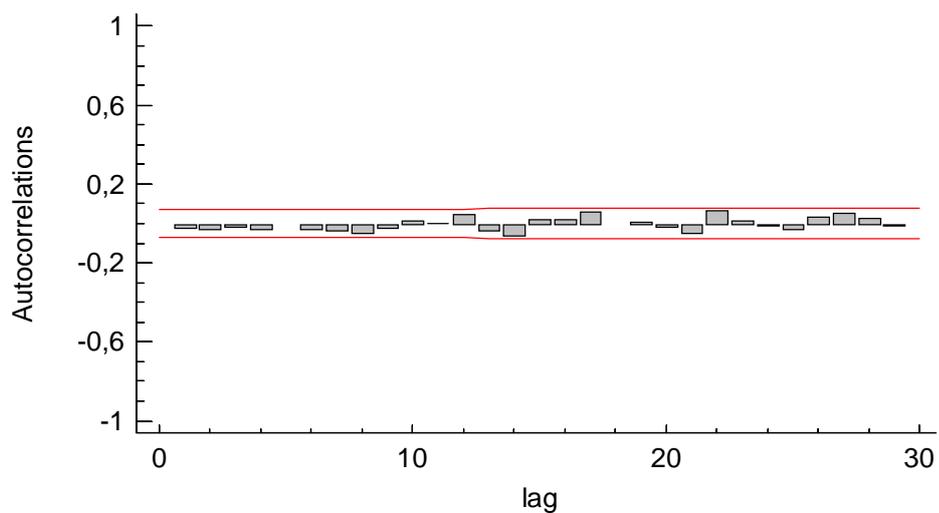


Figura E.5 – Correlogramas das Autocorrelações dos Resíduos – Densidade
[Fonte – próprio autor]

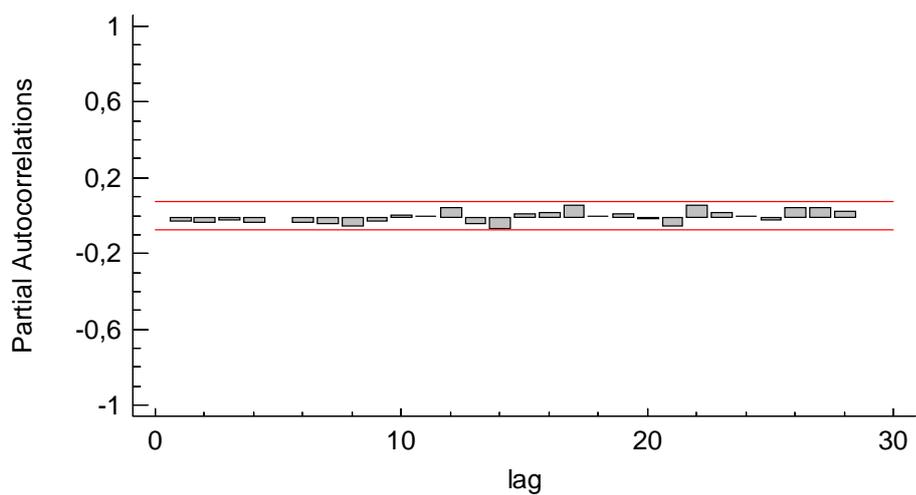


Figura E.6 – Correlogramas das Autocorrelações Parciais dos Resíduos – Densidade
[Fonte – próprio autor]

APÊNDICE F

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CARTAS DE CONTROLE

As cartas de controle, utilizadas na verificação dos dados e na determinação dos parâmetros utilizados na Fase II (sob controle) da monitoração das variáveis controladas, estão representadas nas Figuras F.1 a F.6. Como se pode confirmar, com estes resíduos obtidos da simulação de uma semana típica, não ocorreram sinalizações em qualquer carta.

O comportamento dos dados foi considerado satisfatório, sem indícios de qualquer anormalidade. Não se percebeu qualquer sinal de irregularidade, inclusive indicando o bom ajuste realizado com os modelos ARIMA, no qual os resíduos monitorados comportam-se como o almejado, em torno da média zero.

Nas Figuras F.1 e F.2 estão representadas as cartas de Amplitude Móvel, Observações Individuais e EWMA para variável Temperatura.

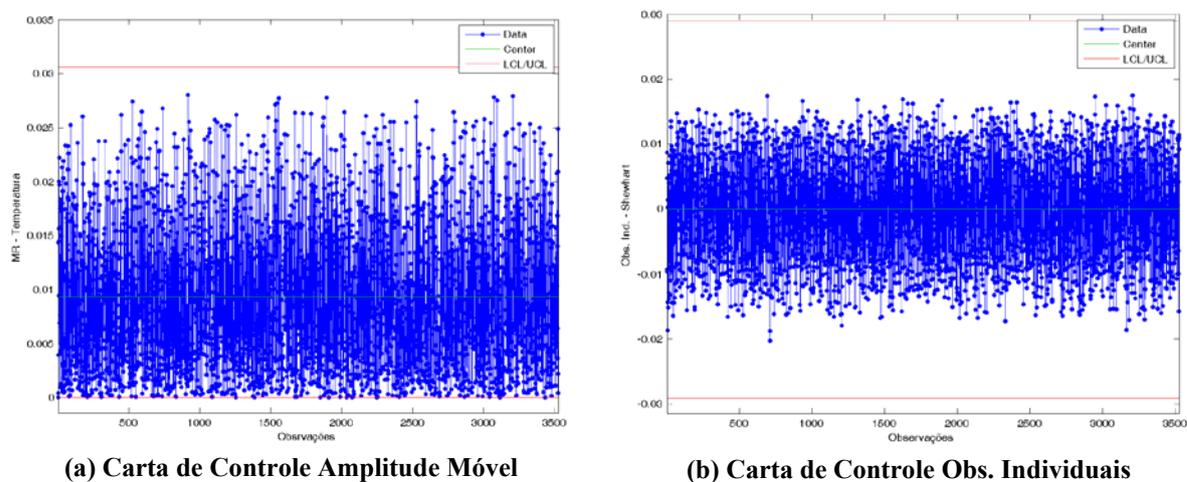


Figura F.1 – Variável Temperatura
[Fonte – próprio autor]

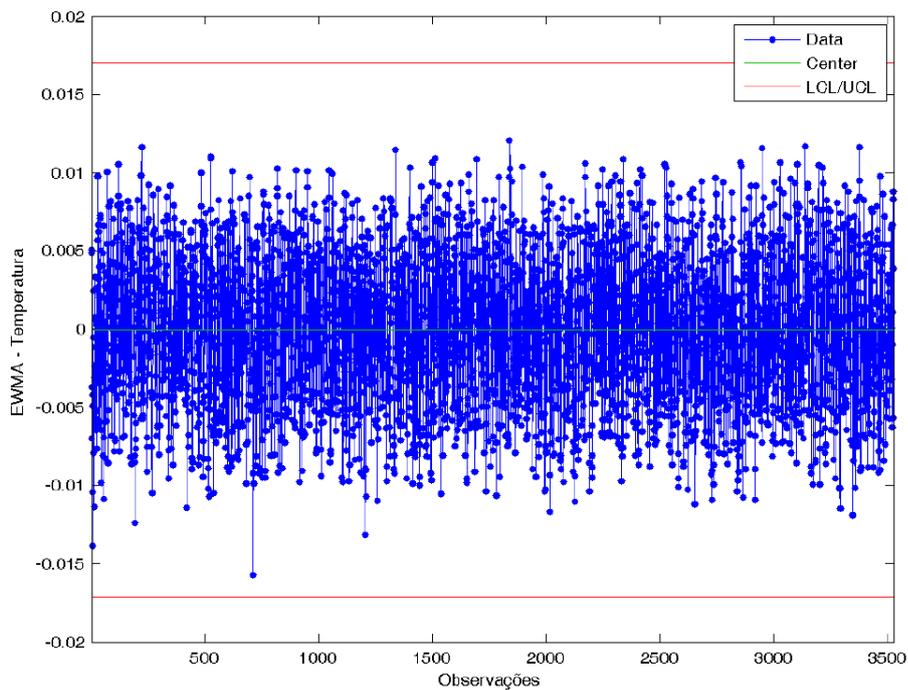
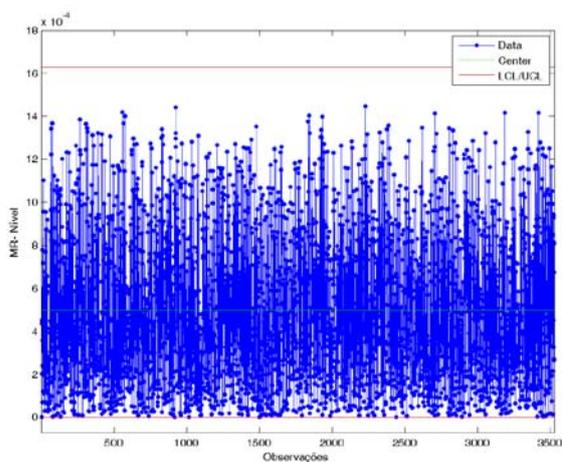
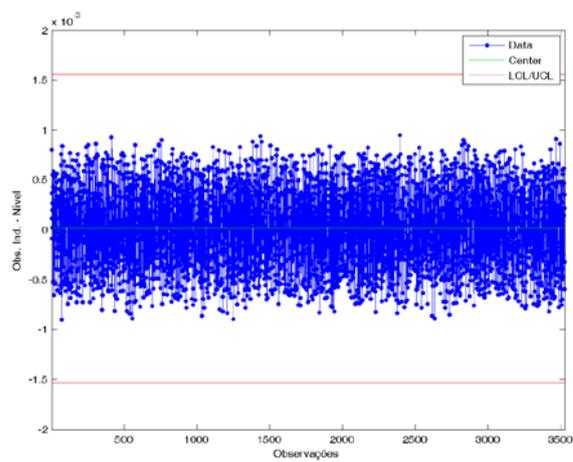


Figura F.2 – Carta de Controle EWMA – Temperatura
[Fonte – próprio autor]

Nas Figuras F.3 e F.4 estão representadas as cartas de Amplitude Móvel, Observações Individuais e EWMA para variável Nível.



(a) Carta de Controle Amplitude Móvel



(b) Carta de Controle Obs. Individuais

Figura F.3 – Variável Nível
[Fonte – próprio autor]

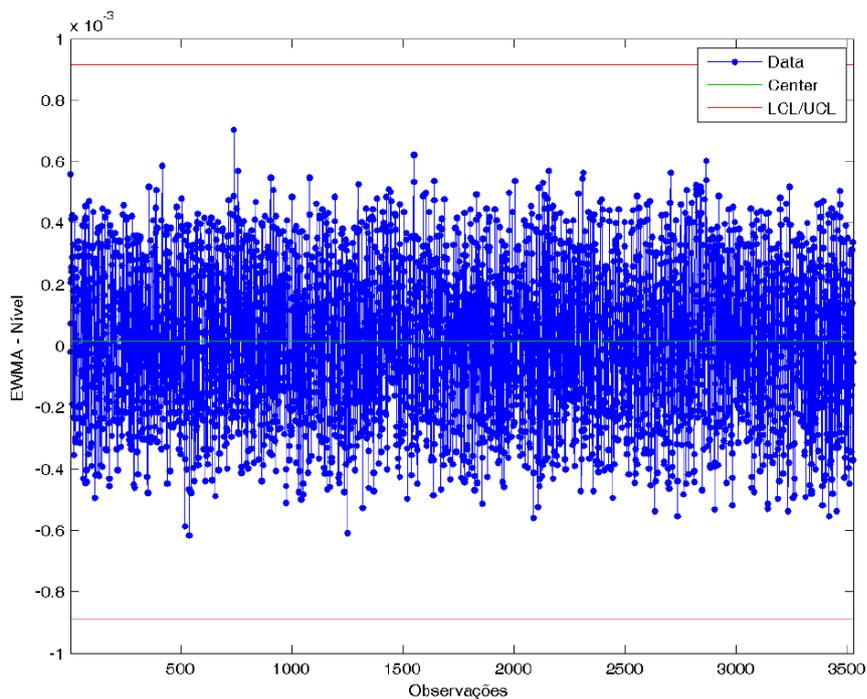
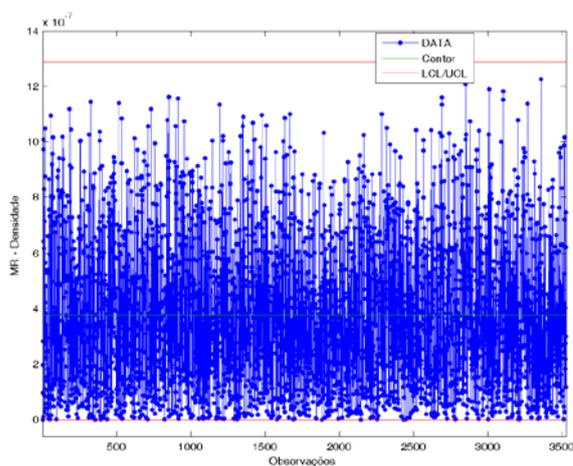
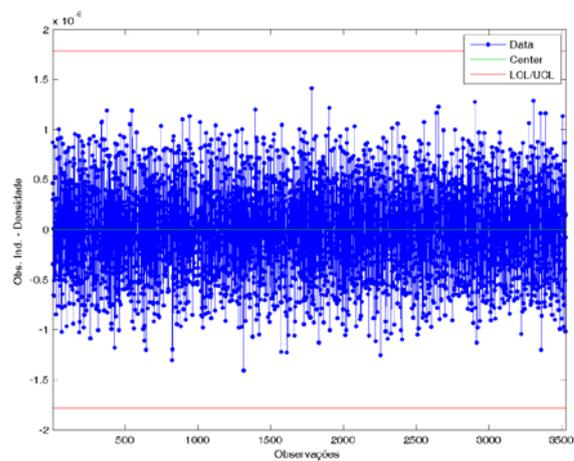


Figura F.4 – Carta de Controle EWMA – Nível
[Fonte – próprio autor]

Nas Figuras F.5 a F.6 estão representadas as cartas de Amplitude Móvel, Observações Individuais e EWMA para variável Densidade.



(a) Carta de Controle Amplitude Móvel



(b) Carta de Controle Obs. Individuais

Figura F.5 – Variável Densidade
[Fonte – próprio autor]

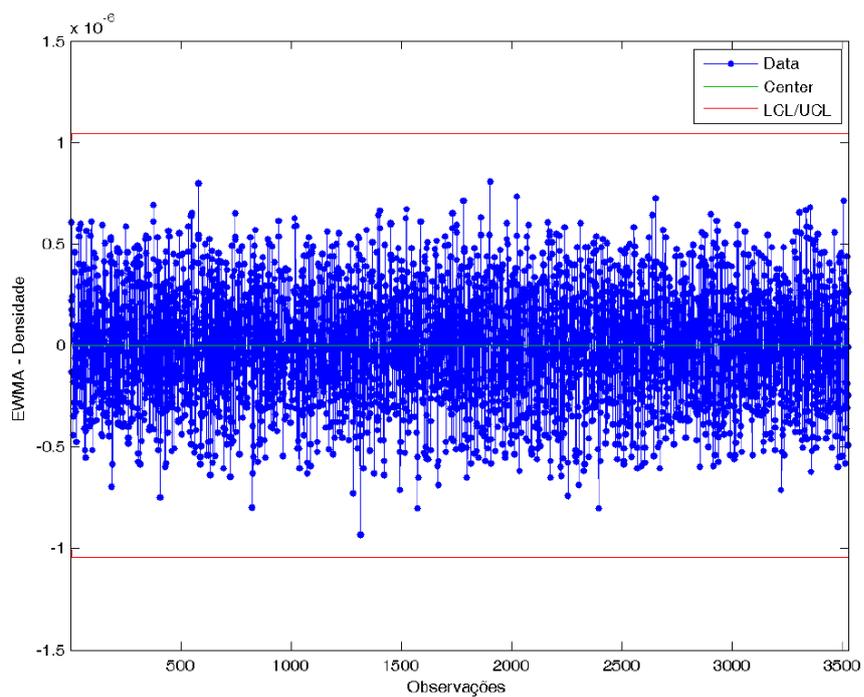
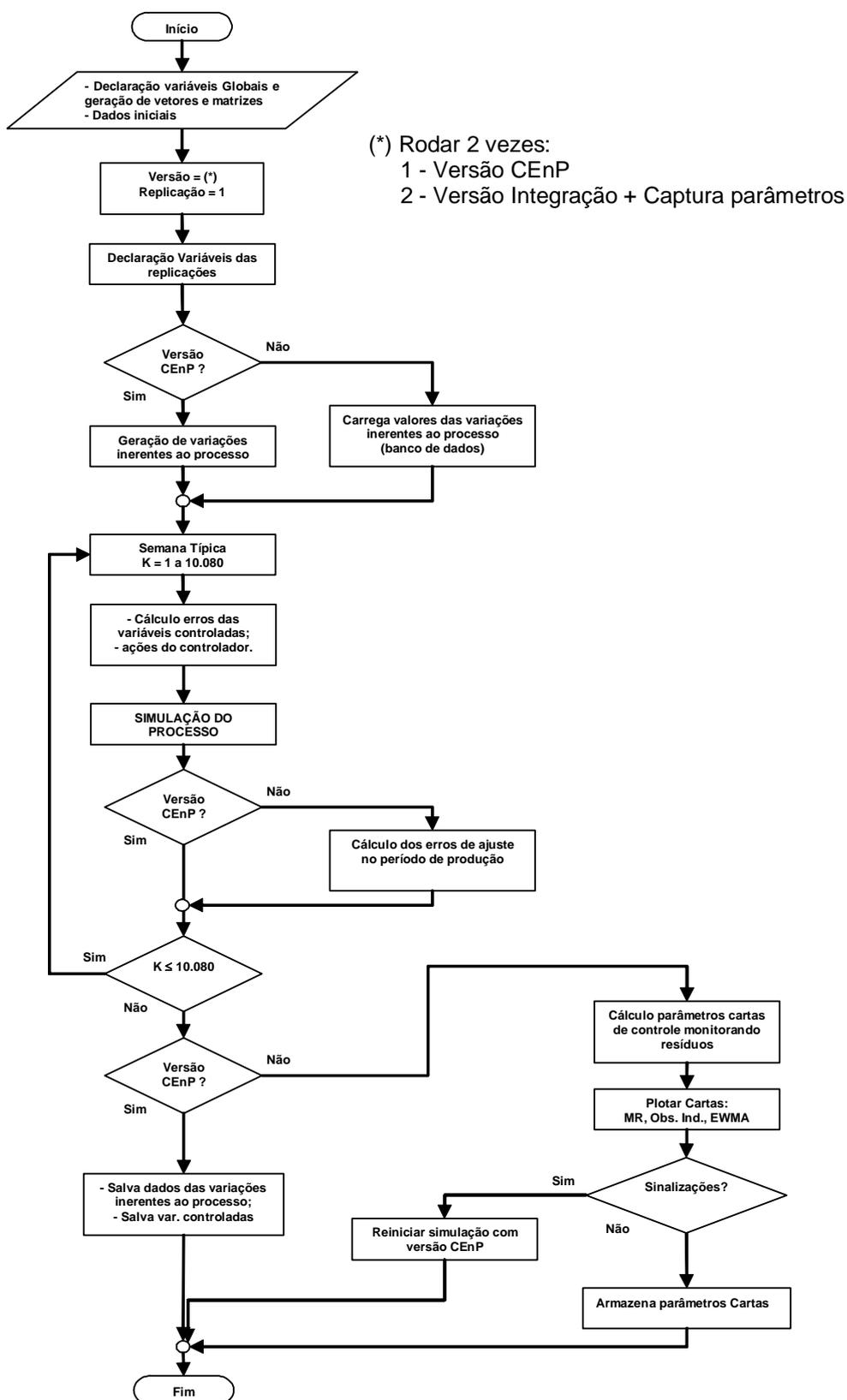


Figura F.6 – Carta de Controle EWMA – Densidade
[Fonte – próprio autor]

APÊNDICE G

MÓDULO 2 - SEGUNDA ETAPA DE SIMULAÇÃO

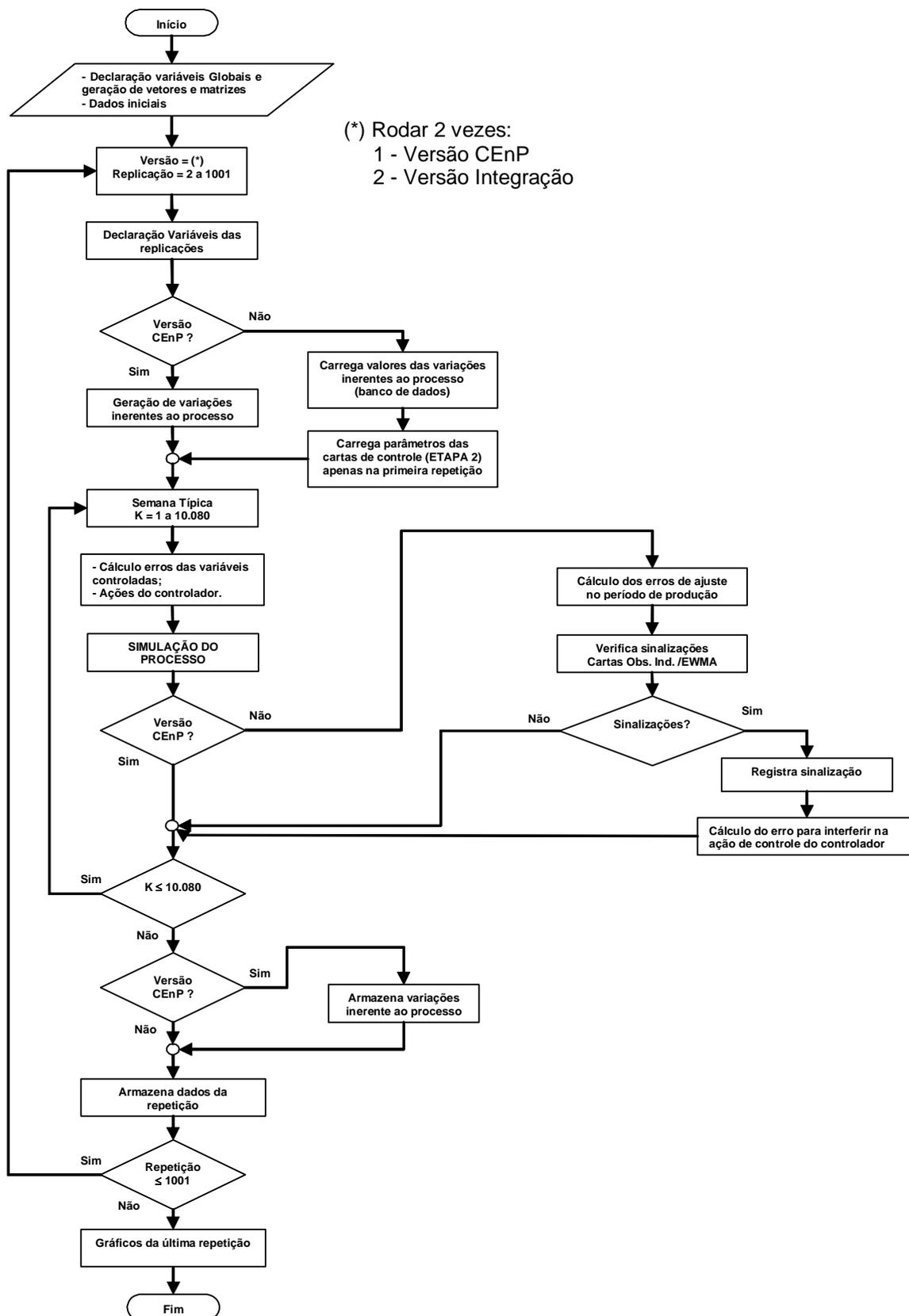
Determinação Parâmetros Cartas de Controle



APÊNDICE H

MÓDULO 2 – TECEIRA E QUARTA ETAPAS DE SIMULAÇÃO

Simulação Cenários



APÊNDICE I
SINALIZAÇÕES REGISTRADAS NAS SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS 3 E 4,
DO MÓDULO 2

Nas Tabela I.1 estão relacionadas as sinalizações registradas pelas cartas de controle, monitorando a variável Densidade, quando da simulação do cenário 3, módulo 2. São apresentados os instantes das ocorrências, por carta de controle e ganho K_{cc} , da repetição (semana) 589.

Tabela I.1 – Ocorrências cenário 3 – cartas Observações Individuais e EWMA para densidade

Cenário	Ganho K_{cc}	Minuto da sinalização – semana 589	
		Observações Individuais	EWMA
C3	0%	-	5067
	50%	-	5067
	100%	5073 / 5076 / 5078 / 5083 / 5084 5085 / 5088 / 5089 / 5090 / 5095 5096 / 5098 / 5099 / 5100 / 5103 5105 / 5106 / 5109 / 5111 / 5113 5114 / 5115 / 5118 / 5126	5067 / 5069 / 5073 / 5077 / 5079 5080 / 5083 / 5084 / 5088 / 5089 5091 / 5092 / 5095 / 5096 / 5100 5102 / 5105 / 5106 / 5109 / 5113 5118 / 5119 / 5124 / 5126
	150%	5069 / 5071 / 5074 / 5075 / 5076 5079 / 5082 / 5083 / 5085 / 5086 5087 / 5090 / 5091 / 5092 / 5097 5098 / 5099 / 5100 / 5105 / 5106 5107 / 5108 / 5113 / 5114 / 5115 5118 / 5121 / 5123 / 5124 / 5125	5067 / 5069 / 5071 / 5074 / 5075 5078 / 5079 / 5082 / 5083 / 5085 5086 / 5090 / 5091 / 5093 / 5094 5097 / 5098 / 5100 / 5101 / 5102 5105 / 5106 / 5108 / 5109 / 5110 5113 / 5114 / 5117 / 5118 / 5121 5125 / 5126 / 5130

[Fonte – próprio autor]

As sinalizações registradas na simulação do cenário 4, módulo 2, carta EWMA, estão apresentadas na Tabela I.2. São relacionados os instantes das ocorrências com as repetições quando houve indicação de causa especial, semanas 356 e 866.

Tabela I.2 – Ocorrências cenário 4 – carta EWMA temperatura

Cenário	Ganho K_{cc}	Minuto da sinalização	
		Semana 356	Semana 866
C4	0%	5323	1021 / 1045
	50%		1071 / 2416
	100%		3913 / 5401
	150%		6760 / 6801 6805

[Fonte – próprio autor]