

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO MINOZZI JUNIOR

CONTROLE DE ENGENHARIA INTEGRADO AO CONTROLE
ESTATÍSTICO DE PROCESSOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

PAULO MINOZZI JUNIOR

CONTROLE DE ENGENHARIA DE PROCESSOS INTEGRADO AO CONTROLE ESTATÍSTICO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à Disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Marcelo Gonçalves
Trentin

PATO BRANCO

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Controle de Engenharia Integrado ao controle Estatístico de Processos**, do aluno **Paulo Minozzi Junior** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N°56 de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

Marcelo Gonçalves Trentin

Gilson Adamczuk Oliveira

Emerson Giovani Carati

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ter sido realizado se não fosse a ajuda fundamental de meu orientador que sempre me conduziu e deixou claro como seria a realização deste. Muito se deve também a contribuição dos colegas e outros professores que sempre me atenderam e fizeram o melhor possível para me ajudar nos momentos de dúvida.

E como base fundamental o apoio e força recebida de meus pais e irmão, que sempre estiveram comigo nos momentos mais vulneráveis do decorrer dos dias.

RESUMO

JUNIOR, Paulo Minozzi. **Controle de Engenharia de Processos integrado ao Controle Estatístico**. 2013. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

Este trabalho aborda a modelagem e controle de uma caldeira para transporte de calor. O controle aplicado tem por base a integração de duas formas distintas de controle de processos, o Controle Estatístico de Processos por meio da carta de controle de Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas, e o Controle de Engenharia de Processos, mais especificamente com o controlador PID. São apresentados três cenários distintos, atrelados a três típicas maneiras de operação da caldeira estudada. Em cada cenário são comparados os comportamentos das variáveis controladas para cada tipo de controle aplicado. Para tal foi empregado a simulação numérica. Os resultados são avaliados de forma visual através das simulações apresentadas e mensuradas através do erro quadrático médio.

Palavras-chaves: Controle de Engenharia de Processos, Controle Estatístico de Processos, Erro Quadrático Médio, Modelagem de processos, Controle Proporcional-Integral-Derivativo, Carta de Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas e Integração controle estatístico e de engenharia.

ABSTRACT

JUNIOR, Paulo Minozzi. **Control of Process Engineering integrated with Statistical Control**. 2013. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Coordenação de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

This paper deals with the modeling and control of a boiler for the transport of heat. Control applied is based on the integration of two distinct forms of process control, Statistical Process Control through the control chart Moving Averages Exponentially Weighted, and the Control of Process Engineering, more specifically with the PID controller. Are presented three different scenarios, coupled to three typical ways of operation that the boiler studied. Each scenario are compared the behavior of the variables controlled for each type of control applied to such was employed numerical simulation. The results are evaluated visually through the simulations presented and measured by the mean square error.

Keywords: Control of Process Engineering, Statistical Process Control, Mean Square Error, process modeling, Control Proporcional-Integral -Derivative, Chart of Moving Average Exponentially Weighted and Integration statistical control and engineering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Típica carta de controle.....	22
Figura 2 - Controle PID de uma planta qualquer.	29
Figura 3– Semana típica de trabalho da caldeira.	44
Figura 4 - Comparativo entre pressões dados reais x simulado.....	46
Figura 5 - Comparativo entre volume de líquido na caldeira controlado e não controlado.....	48
Figura 6 - Comparativo entre pressão de vapor na caldeira controlado e não controlado.....	48
Figura 7 - Carta de controle EWMA aplicada ao volume de líquido da caldeira.	51
Figura 8 - Carta de controle EWMA aplicada à pressão de vapor na caldeira.	51
Figura 9 - Variável Volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA não sinalizando - falha da bomba.....	52
Figura 10 - Variável Volume - Ação Controlador PID e Carta de Controle EWMA sinalizando - falha da bomba.....	53
Figura 11 – Variável volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando sem auxiliar o Controlador PID - falha devido a vazamento na tubulação de alimentação de água caldeira.....	54
Figura 12 - Variável volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao Controlador PID - falha devido a vazamento na tubulação de alimentação de água caldeira.....	55
Figura 13 - Variável Pressão – Controlado x não Controlado - Período de menor exigência.	57
Figura 14 - Variável Volume - Controlado x não Controlado - Período de menor exigência.	58
Figura 15 - Variável Pressão - PID isolado x integração PID e EWMA - Período de menor exigência.	59
Figura 16 - Variável Volume - PID isolado x integração PID e EWMA - Período de menor exigência.	59
Figura 17 - Variável Pressão - Controlado x não Controlado - Período de exigência intermediária.....	60

Figura 18 - Variável Volume - Controlado x não Controlado - Período de exigência intermediária.....	61
Figura 19 - Variável Pressão – PID isolado x integração PID e EWMA – Período de exigência intermediária.	61
Figura 20 - Variável Volume – PID isolado x integração PID e EWMA – Período exigência intermediária.	62
Figura 21 - Variável Pressão - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA não sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira. ...	63
Figura 22 - Variável Volume - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA não sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira. ...	63
Figura 23 - Variável Pressão - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira. ...	64
Figura 24 - Variável Volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira. ...	64
Figura 25 - Variável Pressão - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao PID - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.....	65
Figura 26- Variável Volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao PID - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.....	65
Figura 27 - Variável Pressão - Controlado x não Controlado - Período de maior exigência.	66
Figura 28 - Variável Volume - Controlado x não Controlado - Período de maior exigência.	66
Figura 29 - Variável Pressão – PID isolado x integração PID e EWMA – Período de maior exigência.	67
Figura 30 - Variável Volume – PID isolado x integração PID e EWMA – Período de maior exigência.	67
Figura 31 - Variável Pressão - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA não sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira. ...	68
Figura 32 - Variável Volume - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA não sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira. ...	68
Figura 33 - Variável Pressão - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira. ...	69

Figura 34 - Variável Volume - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira. ...	69
Figura 35 - Variável Pressão - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao PID - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.....	70
Figura 36 - Variável Volume - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao PID - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de média, desvio padrão e valor P do teste, obtidos de normalidade dos dados K-S.	45
Tabela 2 - Valores dos limites superiores e inferiores das cartas EWMA para cada cenário proposto.....	50
Tabela 3 - Valores dos EQM's para cada Cenário.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEP	Controle Estatístico do Processo
CEnP	Controle de Engenharia de Processo
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PI	Proporcional-Integral
PD	Proporcional-Derivativo
LC	Linha Central
LSC	Limite Superior de Controle
LIC	Limite Inferior de Controle
MMEP	Média Móvel Exponencialmente Ponderada
CMS	Comprimento Médio de Sequência

LISTA DE SÍMBOLOS

Td	Constante de tempo derivativa
Kp	Ganho Proporcional do controle de Engenharia
Ki	Ganho Integral do controle de Engenharia
Kd	Ganho derivativo do controle de Engenharia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 O PROBLEMA.....	16
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivo específico	18
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO (CEP)	21
2.2 CONTROLE DE ENGENHARIA DE PROCESSOS	26
2.2.1 Sistema de controle PID.....	27
2.3 INTEGRAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO E DE ENGENHARIA DE PROCESSO	31
3 METODOLOGIA	33
4. MODELAGEM DA PLANTA E PROJETO DOS CONTROLADORES	37
4.1 DETERMINAÇÃO DO PROCESSO.....	38
4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA	40
4.2.1 Modelagem físico/matemática	40
4.2.2 Comportamento das variáveis do modelo e período de simulação	42
4.3 PROJETO DO CONTROLADOR PID	47
4.4 PROJETO DA CARTA DE CONTROLE	49
4.5 INTEGRAÇÃO ENTRE OS CONTROLADORES.....	51
5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	56
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
7 TRABALHOS FUTUROS.....	74
REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente evolução industrial nas últimas décadas, tudo o que o homem consome ou utiliza, desde os alimentos e mesmo os utensílios em que são preparados e servidos, passa por algum processo de industrialização.

Nas indústrias existem processos estabelecidos, e estes geralmente possuem métodos de controle que melhoram e/ou aumentam a eficiência, ou mesmo são de fundamental importância para o processo ser operacionalizado.

Processos devidamente controlados suscitam em menores perdas, e fazem a redução significativa de custos, que podem ser em matéria prima, tempo e mão de obra dispendiosa para manutenção dos mesmos.

A satisfação do consumidor é um dos objetivos mais almejados das empresas, e este fator remete a qualidade do produto e serviço prestados a consumidores, que estão cada vez mais exigentes, principalmente devido a evolução da tecnologia e da forma como é aplicada na indústria.

Simultaneamente à qualidade do produto, o consumidor também procura por baixo custo, portanto o controle dos processos de obtenção dos produtos deve buscar ao máximo a eficiência e baixo custo na produção.

Nesta linha de pensamento, com a grande evolução tecnológica nos métodos produtivos e a busca das organizações pela qualidade exigida pelo consumidor, o controle de qualidade se torna de fundamental importância. 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 precisão (TRENTIN, 2010).

A confiabilidade de entrega nos prazos estabelecidos e do fornecimento de produtos não defeituosos a parceiros e/ ou clientes são fatores que fazem com que a empresa se torne competitiva no mercado. Principalmente por estes fatores fica clara a importância de se buscar ferramentas precisas e eficientes que identifiquem falhas com maior sensibilidade possível, atuando de forma antecipada a possíveis danos ao processo e/ou produto.

Desta forma, com as produções em larga escala e esta competitividade do mercado, 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 monitorar os processos industriais. Com a utilização das cartas de controle, as variáveis avaliadas como fundamentais são monitoradas constantemente visando detectar a presença de causas especiais, de eventos defeituosos, os quais devem ser investigados e eliminados, e desta forma é conseguido um menor nível de variabilidade, garantindo uma melhor qualidade dos produtos.

Outro sistema importante é o de compensação ou regulação de processo conhecidos como Controle de Engenharia de Processos (CEnP), controle estocástico, ou de controle de retroação (*feedback*), que melhor se aplica a processos com mais de uma entrada e/ou saída (MONTGOMERY, 2004). Esta forma de controle consiste em subsistemas e processos reunidos com o propósito de controlar as saídas. É possível encontrar sistemas de controle ao longo da indústria regulando diferentes variáveis, como por exemplo, níveis de líquidos em reservatórios (NISE, 2002). O CEnP possui papel importante nos processos, pois monitora e controla as variáveis envolvidas de forma contínua, efetuando os ajustes necessários para mantê-lo dentro de determinados padrões pré-estabelecidos automaticamente, visando sustentar a qualidade dos produtos em um padrão alvo.

Um dos controladores mais tradicionais na indústria é certamente o Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Em uma pesquisa observou-se que de mais de 11.000 malhas de controle analisadas em diversas plantas, incluindo refinarias e outros, cerca de 97% utilizavam controle PID. Esta grande utilização se deve à simplicidade e bom desempenho que este controlador apresenta (CAMPOS & TEIXEIRA, 2010).

A busca pela máxima redução das variabilidades no processo é evidente, e o controle destas se torna algo indispensável. Para conseguir um controle mais robusto, que responda mais rapidamente a falhas, são indicadas duas formas: O CEP e o CEnP. Segundo Montgomery (2004) o CEP visa monitorar o processo para detectar causas especiais e redução da sua variabilidade enquanto o CEnP por sua vez, procura reduzir a diferença entre o valor obtido na saída em relação ao valor-alvo especificado. A integração destes dois sistemas de monitoramento e controle buscam minimizar a variabilidade e aumentar os níveis de precisão do processo, procurando perceber pequenas variações em intervalos curtos de tempo, evitando

correções bruscas posteriores e possíveis falhas de especificação (OGATA, 2003).

O CEP possui como principal aplicação indicar a necessidade de intervenção do processo quando detectar uma causa especial, já o CEnP tem por característica reagir, e efetuar uma ação de controle quando ocorrer uma perturbação e não faz tentativa ou distinções para remoção de causas especiais. Com a integração das duas técnicas o resultado será um CEnP com possibilidades de detectar causas especiais do qual poderá ser sinalizado para remoção desta. Desta forma serão evitadas possíveis não conformidades, prevenindo problemas, perdas na fabricação, rendimento e até mesmo possíveis paradas do processo.

1.1 O PROBLEMA

A crescente demanda de produtos de qualidade e de baixo custo pelos consumidores faz com que as indústrias busquem cada vez mais a máxima eficiência na produção. Desta forma, a tecnologia associada ao controle dos processos de fabricação possui grande relevância quando se necessita produzir produtos de qualidade em larga escala associado a gastos mínimos de matéria prima, para assim poder ofertar produtos a preços competitivos e mais baixos ao consumidor.

A grande maioria dos controladores de processos encontrados na indústria é o PID, devido principalmente a seu bom desempenho e simplicidade. Porém, este controlador perde em alguns aspectos, principalmente quando as variáveis controladas sofrem perturbações das quais o controlador não consegue corrigir, ou seja, é incapaz de detectar causas especiais. Exemplificando, no caso de um controle de nível de reservatório, no qual o reservatório possui vazamento maior que a capacidade física do processo de reposição (vazão de entrada menor que a vazão de saída), mesmo o controlador tomando a ação de controle máxima permissível. Na mesma linha de pensamento, outro caso possível e mais danoso ao processo, devido à sua difícil observação, é o caso de existir um vazamento do qual o controle PID consiga manter a variável na referência, porém atuando de forma mais intensa, ou seja, em intervalos de tempo menores que o normal, com um grande volume de reposição, e desta forma ocasionando um elevado gasto de matéria-prima, gerando custos indevidos.

Por outro lado o controle estatístico do processo (CEP), por meio das cartas de controle, é uma técnica estatística que permite a redução da variabilidade do processo, pois monitora as variáveis de interesse do mesmo, e alerta quando verificada a presença de causas especiais. Causas estas que não são naturais ao processo e que podem prejudicar a qualidade do produto. Quando detectada uma causa especial geralmente o operador é quem investiga e efetua a correção das variáveis do processo ou aciona o setor de manutenção, podendo demandar um tempo entre a identificação e a correção da anormalidade, diferentemente do PID, que atua de forma automática.

Desta forma, a integração entre as duas formas de controle combinaria as

principais características dos dois tipos de controles, a atuação PID automática e a detecção de causas especiais das cartas de controle. Esta junção tem sua maior contribuição e aplicação em sistemas automatizados de produção adicionados a grandes volumes de processamento.

1.2 OBJETIVOS

Na sequência são apresentados o objetivo geral e específicos traçados para este trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é o de propor uma integração entre o Controle Estatístico de Processo, por meio das cartas de controle estatísticas, e o Controle de Engenharia de Processos, mais especificamente com o controlador PID, com o intuito de aumentar a robustez do sistema controlado. Será buscada uma integração de forma que as variáveis relacionadas às características de qualidade sejam mantidas o mais próximo do seu valor alvo e principalmente dentro dos limites de especificação ou de aceitação do processo.

1.2.2 Objetivo Específico

Na busca pelo objetivo principal, alguns objetivos específicos devem ser atingidos para evolução deste trabalho. Assim têm-se:

- Estudo, definição e programação visando simulação de um processo que justifique a presença de controladores;
- Efetuar o Controle de Engenharia de Processos deste processo, utilizando-se um controlador PID;
- Realizar simulações em Matlab com o controlador PID operando isoladamente e avaliar seus resultados, de forma a criar um histórico de referência para comparação posterior com o sistema integrado às cartas de controle;
- Realizar a integração das duas formas de controle, empregando-se simulação em Matlab com o intuito de verificar a sua eficácia de controle;

- Verificar se as cartas de controle são capazes de detectar falhas do processo, mesmo o controlador procurando manter as variáveis controladas dentro das suas especificações durante as anormalidades;
- Serão também avaliadas situações onde as cartas de controle possam interagir na lei de controle do controlador, visando proporcionar menores impactos quando da ocorrência de falhas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção serão apresentados os principais tópicos acerca do tema proposto dividido em três partes. Primeiramente, serão abordadas as principais técnicas utilizadas no CEP, e com maior ênfase nas cartas de controle, mostrando suas características e aplicações. Após, será abordado o CEnP, mais especificamente o controlador clássico Proporcional-Integral-Derivativo (PID) e suas sintonizações. Por último são abordadas as integrações realizadas entre os dois sistemas, mostrando suas possíveis vantagens e características.

2.1 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO (CEP)

O controle da qualidade teve início na década de 20 nos Estados Unidos, desenvolvidas pelo Dr. Walter A. Shewhart, da empresa de telefonia *Bell Telephone Laboratories* a partir de avanços na tecnologia de medição e da aplicação industrial das cartas de controle. Em 1924, Walter Shewhart elaborou a primeira carta de controle usada para o processo de monitoração e controle. Ele propôs seu uso para a análise de dados amostrados, substituindo a simples detecção e correção de produtos defeituosos por estudo e prevenção dos problemas relacionados à qualidade, com o intuito de diminuir essa produção defeituosa, assegurando assim uma menor variabilidade e maior qualidade no processo (Ribeiro & Caten, 2012; Trentin, 2010).

A segunda guerra mundial foi importante também para a aceitação dos conceitos de controle estatístico da qualidade nas indústrias, pois as experiências dos tempos de guerra deixaram clara a necessidade das técnicas estatísticas para controlar e melhorar a qualidade do produto.

O processo de manufatura transforma entradas (controláveis ou difíceis de controlar) em produtos acabados que possui várias características de qualidade, as quais são utilizadas como uma medida da qualidade do processo. A carta de controle é uma das principais técnicas existentes do controle estatístico do processo ou CEP, pois se trata de uma técnica de monitoramento muito útil principalmente quando fontes não usuais de variabilidade estão presentes (ou causas especiais). A Figura 1 mostra uma típica carta de controle de médias. Este gráfico basicamente plota as médias das medidas de alguma característica de qualidade em amostras do processo distribuída no tempo (ou número da amostra). Ele possui uma linha central (LC) que representa o valor médio da variável monitorada do processo, onde a característica do processo deveria estabilizar se não houvesse variabilidade presente e limites superior e inferior (LSC e LIC), que são definidos estatisticamente em termos de desvios padrões, entre os quais os pontos amostrais sinalizam que o processo está sob controle (MONTGOMERY, 2004).

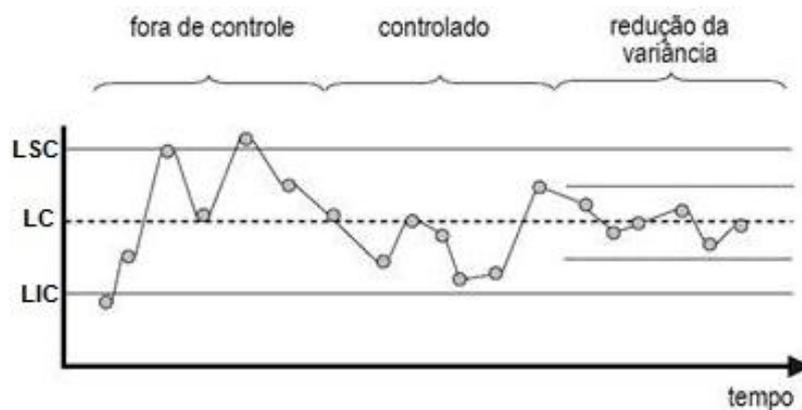


Figura 1 – Típica carta de controle.
Fonte: Adaptado de (Mendoza, 2008)

Quando alguma das amostras se posiciona fora dos limites, é interpretada uma evidência de que o processo está fora de controle, e então se torna necessária a investigação e a tomada de uma ação corretiva para encontrar e eliminar a causa (ou causas) especial que incitaram este comportamento.

Mesmo que todos os pontos estejam dentro dos limites em uma carta de controle, se eles se comportarem de maneira sistemática ou não aleatória, é uma indicação de que o processo está fora de controle. Para o processo ser interpretado como sob controle todos os pontos devem assumir um padrão essencialmente aleatório. Com a identificação deste comportamento não aleatório deve-se intervir com rapidez para eliminar as fontes de causas especiais, minimizando custos (MONTGOMERY, 2004).

Outra consideração importante quanto ao uso das cartas de controle é o tipo de variabilidade que o processo apresenta. Este pode ter um comportamento estacionário e não-estacionário, um comportamento estacionário é aquele em que os dados variam em torno de uma média fixa de uma maneira previsível, e do qual Shewhart entendia como sob controle. Já em uma variação não-estacionária os dados se comportam de maneira instável, sem sentido ou média fixa, esse comportamento é frequentemente observado em indústrias químicas e de processamento e é geralmente estabilizado através do controle de engenharia de processo (BOX; LUCEÑO; PANIAGUA-QUINOÑES, 2009).

Um fator importante é a correlação. Dados ditos autocorrelacionados possuem em suas observações sucessivas dependências, ou seja, os dados apresentam uma tendência a se mover em sequências mesmo que de forma moderadamente longas, que podem ser em torno da média se for estacionário, ou

de forma aleatória se for não-estacionária. Já os dados ditos não correlacionados (também chamados de ruído branco) apresentam dados independentes, ou seja, valores dos dados passados não nos diz nada a respeito dos valores futuros (BOX; LUCEÑO; PANIAGUA-QUINOÑES, 2009).

Além das cartas de controle de Shewhart, como os de controle para variáveis e atributos, variações destas foram desenvolvidas, visando melhorar a sensibilidade na detecção de mudanças de parâmetros do processo, devido ao fato das cartas de controle Shewhart possuir uma grande desvantagem, elas usam apenas a informação sobre o processo contida no último ponto plotado, e não considera a informação dada pela sequência inteira (MONTGOMERY, 2004).

As cartas de Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas (MMEP), do inglês *Exponentially Weighted Moving Average* (EWMA) e de Soma Cumulativa (CUSUM) podem ser usadas alternativamente às cartas de controle de Shewhart quando pequenas mudanças são de interesse. Para dados autocorrelacionados existem alternativas como as cartas de controle para observações individuais, as baseadas em decomposições ARIMA e as baseadas em regressões múltiplas (MONTGOMERY, 2004).

A carta de controle EWMA foi inicialmente proposta por Roberts (1959), ela é útil tanto para o controle da qualidade de itens manufaturados como no controle da qualidade em processos contínuos de produção. Ela tem como objetivo suprir a deficiência apresentada pela carta de Shewhart, e assim, utiliza todos os dados coletados anteriormente e dá menos peso, menor relevância ao dado, na medida em que ele for ficando mais “velho”.

O modelo que define o gráfico de controle EWMA é dado pela Equação (1).

$$Z_t = \alpha X_t + (1 - \alpha)Z_{t-1} \quad (1)$$

Na qual, Z_t é a previsão para característica da qualidade no período t , X_t é a característica da qualidade real para o período t , α constante de suavização ou de alisamento e Z_{t-1} previsão para característica da qualidade no período $t - 1$.

A escolha da constante α , tem um importante papel no tempo que se leva pra identificar a mudança. Pois o tempo pra se identificar a mudança, a grandeza da

mudança que se quer identificar e o parâmetro α estão diretamente relacionados. Quão menor o valor de α , maior a influência dos dados anteriores e vice-versa.

Os pesos dados a uma observação decrescem geometricamente com a distância entre esta observação e a observação atual. No caso em que há uma observação por vez, Borror, Montgomery e Runger (1999) concluíram que a carta de controle para média móvel exponencialmente ponderada é robusta à suposição de normalidade.

Segundo Montgomery (2004), os limites das cartas de controle são dados pelas Equações (2) e (3),

$$LIC = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\alpha}{(2-\alpha)} [1 - (1 - \alpha)^{2i}]} \quad (2)$$

$$LSC = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\alpha}{(2-\alpha)} [1 - (1 - \alpha)^{2i}]} \quad (3)$$

Que se aproximam assintoticamente para os valores das Equações (4) e (5), quando o gráfico já está rodando por vários períodos de tempo.

$$LIC = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\alpha}{(2-\alpha)}} \quad (4)$$

$$LSC = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\alpha}{(2-\alpha)}} \quad (5)$$

Na qual, μ_0 é dita a linha central ou valor alvo, L é dito distanciamento dos limites de controle ao valor alvo, e σ o desvio padrão dos dados coletados.

Montgomery (2004) comenta que esta carta é muito eficaz contra pequenas mudanças no processo. Os valores de L e α são ditos parâmetros do planejamento da carta, e escolhendo esses valores de forma coerente consegue-se melhorar o desempenho desta na detecção de pequenas mudanças.

Existem muitos estudos teóricos sobre as propriedades do comprimento médio da sequência (CMS) da carta de controle EWMA. Em seu livro, Montgomery

(2004) mostra através de uma tabela o desempenho do comprimento médio da sequência para vários esquemas de controle EWMA. Esta tabela apresenta valores de CMS para pares de L e α pelo valor da mudança na média, dado pelo múltiplo de σ .

A melhor forma de realizar este planejamento é especificar o CMS sob e fora de controle, e a magnitude da mudança no processo antecipadamente, e então faz-se a seleção da combinação de L e α que fornece o desempenho desejado.

De forma resumida, o EWMA fornece uma previsão de onde estará a média do processo no próximo intervalo de tempo. E os limites de controle podem ser usados para sinalizar quando um ajuste é necessário, e a diferença entre o alvo e a previsão da média pode ser usada para determinar quando o ajuste é necessário.

2.2 CONTROLE DE ENGENHARIA DE PROCESSOS

O primeiro controlador automático com realimentação usado em um processo industrial foi aceito como o regulador de esferas de James Watt, desenvolvido em 1769 para controlar a velocidade de um motor a vapor. Em 1868 J.C. Maxwell formulou a teoria matemática relacionada à teoria de controle usando um modelo de equações diferenciais de um regulador. 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. Com a evolução dos sistemas de controle, onde processos possuem muitas entradas e saídas, suas resoluções foram dificultadas, necessitando um grande número de equações. Porém, como na década de 60 se deu a disseminação dos computadores, foi possível analisar diretamente no domínio do tempo com o emprego de variáveis de estado os problemas mais complexos, assim a teoria de controle moderno pode ser implementada em sistemas atuais com precisão, importância e custo, como em sistemas militares, espaciais e industriais. É possível observar que o Controle de Engenharia de Processo (CEnP) precisa considerar ambas as abordagens, no domínio do tempo e no domínio da frequência, simultaneamente na análise e projeto de sistemas de controle (DORF; BIRSHOP, 2009).

Um sistema de controle é a interconexão de componentes que formam uma configuração de sistema e que produzirá uma resposta desejada do sistema. Um sistema de controle em malha aberta usa um dispositivo de atuação para controlar o processo diretamente sem usar realimentação. Já um sistema em malha fechada usa uma medida de saída e a realimentação desse sinal para compará-lo com a saída desejada (referência ou comando), a introdução da realimentação pode melhorar a exatidão, porém pode afetar a estabilidade da resposta do sistema (DORF; BIRSHOP, 2009).

Sistemas de controle são usados para alcançar maior produtividade e melhor desempenho de um dispositivo ou sistema, e a automação é usada para melhorar a produtividade e obter produtos de alta qualidade, pois se trata de um controle automático de processo. Com a demanda por produção flexível personalizada, a necessidade por automação e robótica flexível esta crescendo

(DORF; BIRSHOP, 2009).

2.2.1 Sistema de controle PID

Mais da metade dos controladores industriais em uso na atualidade utilizam o esquema de controle Proporcional Integral e Derivativo (PID) ou PID modificado. A maioria dos controladores PID é ajustada em campo, existindo assim diferentes formas de sintonia destes controladores sendo propostos na literatura. O uso das regras de sintonia contribui para melhora dos ajustes finos no controlador PID em campo, além dos métodos de sintonia automática que estão sendo desenvolvidos que possuem a capacidade de fazer a sintonia automática on-line. Existem também as estruturas PID modificadas, como os controladores I-PD e o controle PID com dois graus de liberdade que vem sendo usados na indústria, pois cada processo possui características individuais e desta forma estas modificações são feitas conforme a necessidade de projeto. Os controladores PID possuem uma vasta aplicabilidade e servem geralmente a maioria dos sistemas de controle, principalmente quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, desta forma, os métodos analíticos não são empregáveis (OGATA, 2003).

O 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. Para a implementação deste controlador três parâmetros devem ser determinados no processo: o ganho proporcional (K_p), ganho integral (K_i) e o ganho derivativo (K_d). A saída do controlador é dada pela soma destes três termos (DORF; BIRSHOP, 2009).

Além da forma integrada PID, estes controladores podem ter formas individuais ou em dois termos, como Controladores Proporcionais (P), Controladores Integrais (I), Controladores Proporcionais – Integrais (PI) e Controladores Proporcionais – Derivativos (PD).

A componente proporcional é dada pela diferença entre o valor alvo desejado e a variável de processo, esta diferença é dita como o erro gerado pela realimentação. O ganho proporcional (K_p) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro, por exemplo, se o termo de erro tem uma magnitude de 10 e um ganho proporcional de 5, a resposta proporcional de seria de 50. O Aumento do

ganho proporcional produz um aumento na velocidade da resposta do sistema de controle, por outro lado, se o ganho proporcional é elevado, ele pode ocasionar oscilação e levar o sistema à instabilidade (NIC, 2011).

A componente integral é dada pela soma dos erros ao longo do tempo, desta forma, mesmo um valor pequeno de erro irá produzir um aumento na componente integral lentamente. Assim, a menos que o erro seja nulo, a resposta integral irá aumentando ao longo do tempo, por isso sua característica é de zerar o erro em regime permanente. Deve-se tomar cuidado quanto à saturação da ação integral (devido aos limites físicos da planta e atuadores) que podem fazer com que o valor em regime permanente fique afastado do valor alvo desejado (NIC, 2011).

A componente derivativa tem por característica atenuar a saída se a variável de processo sofre um incremento rapidamente, pois a derivada de resposta é proporcional à taxa de variação da variável de processo. Definindo um valor alto para K_d e conseqüentemente o tempo derivativo (T_d) o sistema de controle reagirá mais bruscamente à mudanças de erro, e desta forma a velocidade da resposta de controle do sistema é aumentada. Portanto, um tempo derivativo (T_d) pequeno em um sistema de controle é mais utilizado, pois a derivada de resposta é muito sensível ao ruído no sinal da variável de processo, e desta forma, se o sinal de realimentação do sensor é ruidoso ou se a resposta do sistema de controle é muito lenta, a derivada de resposta pode tornar o sistema de controle instável (NIC, 2011).

A Figura 2 mostra uma configuração genérica de um controle PID aplicada a uma planta qualquer. Segundo Ogata (2003) se um modelo matemático da planta pode ser obtido, então é possível aplicar várias técnicas de projeto para a determinação dos parâmetros do controlador que irão regir o comportamento do sistema em malha fechada. Por outro lado, se a planta for complexa ao ponto de ser difícil de obtermos um modelo matemático, a abordagem analítica do projeto do controlador não será possível, e desta forma, é necessário recorrer a abordagens experimentais de sintonia dos controladores PID.

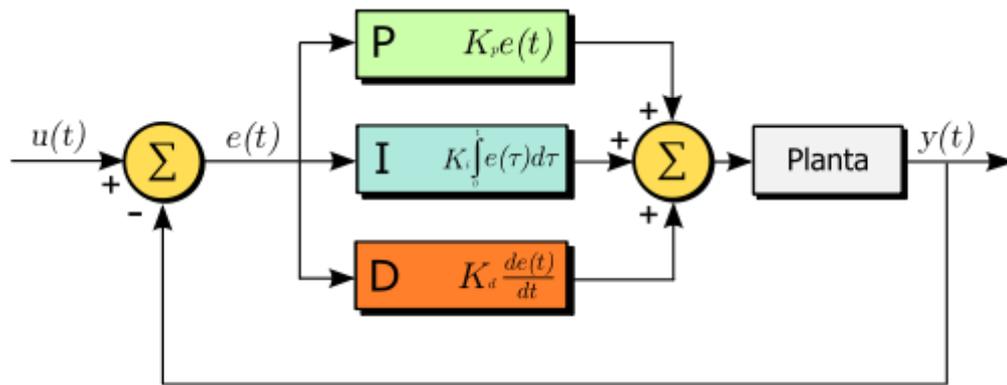


Figura 2 - Controle PID de uma planta qualquer.
Fonte: (Grupo La Resistencia, 2012).

O PID une as ações proporcional, integral e derivativa em um só controlador, atuando tanto no regime transitório quanto no regime permanente, fazendo um meio termo entre o PI e o PD. A Equação (6) mostra a fórmula para o cálculo do controlador PID,

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (6)$$

no qual, $e(t)$ é o erro entre a referência e o valor alvo, K_p é o ganho proporcional, K_i o ganho integral e K_d o ganho derivativo. Na escolha do tipo de controlador a ser empregado, deve ser levada em consideração a natureza da planta industrial, condições de operação e também de segurança, disponibilidade, confiabilidade, precisão, peso e tamanho dos componentes.

Os sistemas de controle geralmente são testados com sinais de entrada simples, em função do tempo t , permitindo análise experimental e matemática. Os principais sinais de entrada utilizados são as funções degrau, rampa, impulso e senoidais.

A resposta total de um sistema corresponde a soma da resposta natural e da resposta forçada, onde a resposta natural é intrínseca ao sistema, ela descreve o modo pelo qual o sistema dissipa ou acumula energia, ou seja, a forma ou natureza da resposta sendo dependente somente do sistema, não da entrada, enquanto a forma ou a natureza da resposta forçada é dependente da entrada (NISE, 2002).

No projeto de um sistema de controle deve ser possível prever o seu comportamento dinâmico, baseado em seus componentes. Um sistema instável não

pode ser projetado para atender uma resposta transitória específica ou um requisito de erro de regime permanente, desta forma, a análise da estabilidade de sistemas é um dos problemas mais importantes. Para Nise (2002), um sistema é estável se toda entrada limitada gerar uma saída limitada e um sistema é dito instável se alguma entrada limitada gerar uma saída ilimitada, sendo que não é possível prever algo a respeito do sistema quando a entrada é ilimitada. Um sistema é estável se a resposta natural tender a zero e instável se a resposta natural tender ao infinito, quando o tempo tender a infinito. Um sistema é estável de forma marginal se a resposta natural não decair nem crescer, mas permanecer constante ou oscilar.

Portanto, o primeiro critério a se analisar antes de projetar um controlador para qualquer sistema é verificar se este é estável, 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, é possível 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 (OGATA, 2003).

2.3 INTEGRAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO E DE ENGENHARIA DE PROCESSO

Há uma grande distinção entre os profissionais responsáveis pelo Controle Estatístico e de Engenharia de Processo. Em uma empresa estes profissionais geralmente trabalham em departamentos diferentes, e possuem formação técnicas em áreas distintas. Desta forma, estas técnicas se desenvolveram de forma separada no meio industrial. O CEP possui uma longa história de uso bem sucedido na fabricação discreta de peças e o CEnP em processos contínuos, tais como os encontrados nas indústrias químicas e de processamento. Essa separação das duas técnicas tem desaparecido com a evolução dos processos (híbridos ou distintos em uma mesma organização) e com a evolução da tecnologia em automação e a busca pela melhor qualidade dos produtos (TRENTIN, 2010).

O CEP é geralmente empregado com a finalidade de melhorar a qualidade dos produtos e se trata de uma atividade de cima para baixo, dirigida pela gerência e de alta visibilidade, com ênfase em pessoas, métodos e procedimentos. Já o CEnP possui enfoque sobre o processo, e atua de forma mais estratégica ao nível operacional, porém as duas técnicas possuem um objetivo em comum que é a redução de variabilidade no processo. A compensação realizada pelo CEnP é baseada em um modelo dinâmico dada pela relação entre a entrada e a saída do processo, se ele opera adequadamente a variabilidade é reduzida, porém quando ocorrem perturbações externas ou causas especiais que estão fora de abrangência desse modelo dinâmico, as regras de compensação não conseguem agir de forma a corrigir esta falha e então o processo tem sua variabilidade aumentada. Aplicando o CEP de forma específica, estas causas especiais podem ser detectadas e eliminadas fazendo assim com que o processo combinado CEnP/CEP seja mais eficiente do que apenas um deles aplicado isoladamente (MONTGOMERY, 2004).

Segundo Montgomery *et al.* (2004) a integração entre o CEnP e CEP tem resultados desejáveis e promissores. O CEnP pode ser usado para minimizar desvios do valor alvo desejado para distúrbios que ocorrem continuamente e são parte do próprio processo, e o CEP, aplicado aos desvios do valor alvo na saída, pode ser usado para identificar e conseqüentemente eliminar as causas especiais.

A integração das duas técnicas de controle, visando unir suas

características para melhoria dos sistemas produtivos é relatada por diversos autores, como por exemplo, Montgomery, Keats, Runger, e Messina (1994), Shao (1998) e Montgomery (2004). Com a integração, a variabilidade dos processos pode ser melhor detectada e controlada reduzindo-se perdas e melhorando o seu desempenho.

Montgomery, Keats, Runger e Messina (1994) concluíram com em seu trabalho de integração das duas técnicas de controle que em várias plantas químicas, de processo e em ambientes de fabricação computadorizadas, que as técnicas de controle de engenharia e monitoramento estatístico de processo combinadas é uma importante ferramenta pronta para ser usada na melhoria da qualidade do processo.

3 METODOLOGIA

Para que seja possível a aplicação das técnicas de controle das áreas estatísticas e de engenharia é imprescindível um processo que apresente variáveis que justifiquem a necessidade de controle, ou seja, um processo do qual pelo menos duas variáveis (como por exemplo, temperatura e vazão) necessitem ser mantidas em um valor alvo e que, quando fora de limites aceitáveis possam causar danos, perdas de matéria prima, retrabalhos entre outros problemas que certamente irão gerar gastos indevidos ou riscos à segurança. A grande maioria dos processos industriais possui inúmeras variáveis, porém, uma grande parte das variáveis existentes não necessita ser controlada, ou mesmo monitorada, pois não apresentam risco ao processo. Desta forma, é de fundamental importância uma análise rigorosa quanto a escolha das variáveis a serem controladas e monitoradas para garantir o melhor custo benefício possível, pois a implementação de controladores podem acarretar em custos elevados, devido aos atuadores e sensores necessários, e portanto, deve-se tomar cuidado para não inserir controladores em variáveis que, se apenas monitoradas possam facilmente se manter em controle e/ou não afetar o processo de forma considerável.

Neste trabalho será empregada a simulação numérica em software comercial específico. Para isso será necessário definir um processo e obter seu respectivo modelo matemático com os comportamentos das suas variáveis. Com o emprego da simulação numérica, o sistema de controle poderá ser diretamente avaliado e testado com o comportamento das variáveis geradas (TRENTIN, 2010).

Definido o processo e suas variáveis controláveis, o próximo passo é efetuar a sua modelagem. Estes modelos podem ser físicos ou matemáticos. Modelos físicos são protótipos e plantas piloto enquanto modelos matemáticos podem ser ditas como a representação dos aspectos essenciais de um sistema, que dificilmente aborda todas as variáveis envolvidas no processo. Trata-se de um sistema de equações com um conjunto de dados de entrada, cuja solução é representativa da resposta do processo. Um conjunto de equações componentes de um modelo é apenas uma aproximação do processo real, desta forma, ele não pode incorporar todas as características existentes em um processo real, deve-se então

buscar a melhor relação entre o que se deseja e a dificuldade de obtê-la (GARCIA, 2005).

Para algumas aplicações pode ser necessário usar modelos que relacionem as variáveis do sistema em termos de expressões matemáticas como equações diferenciais ou diferença, dependendo se será trabalhado no domínio da frequência ou do tempo respectivamente. Os modelos matemáticos podem ser caracterizados por diversos parâmetros, as principais classificações destes modelos são definidas de acordo com o tipo de equação que é usada em sua formulação, das quais podemos deduzir se o sistema é dinâmico ou estático, linear ou não linear, se é para uma ou mais variáveis de entrada e de saída (modelos SISO, MISO, MIMO), paramétricos ou não paramétricos, em que domínio se está trabalhando (tempo ou frequência), tempo contínuo ou discreto, determinístico ou estocástico (GARCIA, 2005).

Outro tópico importante quanto aos modelos matemáticos, são os modos de obtenção, que pode ser de forma teórica, através das leis da física e/ou química, empírica ou heurística, que é feita através da observação direta dos dados ou por analogia, do qual se emprega equações que descrevam um sistema análogo ao real (GARCIA, 2005).

Esses tópicos serão retomados quando da descrição do processo do qual será feita a modelagem matemática, e também serão abordados outros fatores relevantes para o entendimento geral sobre a modelagem de sistemas.

Para justificar a presença de controladores, as variáveis controladas devem possuir uma considerável relevância no processo, ou seja, caso esta(s) variável não esteja dentro de padrões aceitáveis, estas podem ocasionar danos ao processo que acarretem em prejuízos não toleráveis.

Uma vez realizada a modelagem matemática do processo o próximo passo é projetar o CEnP, através do controlador PID. Para o projeto será necessário conhecer as principais características do sistema e definir as variáveis que serão controladas e em quais serão introduzidas as ações de controle para que estas se mantenham o mais próximo possível do valor alvo estipulado, sendo este valor o ideal, do qual se consiga o melhor rendimento de produção/especificação.

A modelagem da planta, bem como o controle de engenharia através do PID e a carta de controle EWMA serão simulados em software de simulação. Como

as cartas de controle estatístico têm como base dados históricos, será criado um histórico para parametrização destas por meio da simulação de períodos replicados, com a planta operando apenas pelo controle de engenharia.

Para uma simulação mais próxima possível à realidade serão realizadas coletas de dados de três dias típicos de trabalho de uma caldeira em uma unidade frigorífica, sua operação no sábado, domingo e de uma quinta-feira, esta por se considerar um dia de produção estabilizada.

Com estas informações será possível representar seu comportamento em uma semana típica de trabalho. Os dados solicitados foram coletados pelos operadores da caldeira de hora em hora, conforme um relatório de monitoramento padrão utilizado na indústria. Alguns outros dados da caldeira serão fornecidos pelos responsáveis do setor por meio de manuais e de entrevistas pessoais.

Será levantado junto aos responsáveis pela caldeira seu regime de trabalho. No local são usadas duas caldeiras, uma de maior capacidade de produção e outra, a qual foi tomada como base neste estudo, de menor capacidade. A “pequena”, assim denominada na empresa, opera auxiliando a “grande” durante a semana, operando apenas em alguns períodos de maior demanda de vapor durante a produção dos setores de Abate (onde possui grande demanda devido a esterilização de facas, higienização e máquinas de cozimento) e Refinaria (onde são produzidos e embalados os torresmos e outros subprodutos como farinha de carne, e para isso demandam vapor através dos Digestores), e a noite, auxiliando principalmente a produção dos setores de Refinaria e Graxaria (onde são processados outros subprodutos, como banha rama, e também utiliza Digestores). Durante os Sábados, no qual não há abate, a caldeira pequena opera sozinha, sendo suficiente para atender a produção da Refinaria. Nos Domingos não há produção, portanto permanece parada e retorna a operar somente na segunda-feira, a partir das 8:00 horas.

Assim, será possível obter a simulação do processo com o controlador operando de forma autônoma e isolada, registrando seu comportamento. Num segundo momento serão implementadas as cartas de controle, as quais sinalizarão ocorrências de anormalidades, caso ocorram. E, num terceiro momento as cartas de controle irão auxiliar a operação do controlador, buscando correções enquanto anormalidades forem indicadas pelas mesmas, auxiliando o CEnP na busca em

manter as variáveis críticas do processo o mais perto possível dos seus alvos.

Com isso será realizada a comparação entre as formas de controle, ou seja, com a planta controlada apenas pelo controle de engenharia, com os dois controladores operando de forma autônoma. Por fim com a integração, onde o controle estatístico estará auxiliando na lei de controle do controlador PID quando detectada uma falha.

Para auxiliar na mensuração desta melhoria e/ou influência, será utilizado o Erro Quadrático Médio (EQM) apurado entre os valores instantâneos das variáveis e seus respectivos valores alvo. Em modelagem estatística, o EQM é usado para quantificar em que situações o modelo melhor se ajustou aos dados. Ele fornece um meio de avaliar a melhor alternativa. Ter um Erro Quadrático Médio de zero (0) é o ideal, mas na maioria das situações nunca é possível, este valor de zero significa que o estimador prevê observações com precisão perfeita.

Porém, o EQM coloca mais peso em grandes erros do que em pequenos, enfatizando dados discrepantes de maneira inconsistente com a mediana de dados de amostra (SEUBERT, 2014). Resumindo, se trata da soma das diferenças entre o valor estimado e o valor real dos dados, ponderados pelo número de termos, como mostra da Equação (7).

$$EQM = \sum_i \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (7)$$

no qual, y_i é o valor da variável, \hat{y}_i é o valor alvo e n é o número de dados do intervalo considerado.

E para o teste final, visando comprovar a proposição da integração, serão simuladas algumas falhas de natureza conhecida e em instantes predeterminados para testar a identificação e funcionalidade do controle proposto e tirada as conclusões devidas. Nesta etapa final as sequências de simulação e comparação serão as mesmas da fase anterior.

4. MODELAGEM DA PLANTA E PROJETO DOS CONTROLADORES

Neste tópico será abordada a modelagem do processo, suas formulações e deduções, também consta o projeto do controlador PID para a planta modelada, com sua sintonização e adequação. O desenvolvimento da construção da carta de controle EWMA, tendo como referência os dados históricos gerados pela planta controlada, e as simulações com seus resultados obtidos, por meio da simulação numérica, obedecendo aos cenários criados, também são apresentados.

4.1 DETERMINAÇÃO DO PROCESSO

Neste estudo optou-se por utilizar como base, o funcionamento de uma caldeira de vapor. Esta definição foi em função da sua grande importância no meio industrial. As caldeiras possuem várias aplicações industriais e são largamente utilizadas, seja para transporte de calor em temperaturas de 0 a 200°C, chamadas calor de aquecimento, como em frigoríficos, ou no uso do vapor para acionamento de eixos em temperaturas maiores que 200°C, como em máquinas a vapor (BOTELHO; BIFANO, 2011).

No caso em questão será dada ênfase às caldeiras com aplicação em frigoríficos, ou seja, caldeiras utilizadas para o transporte de calor, pois em unidades frigoríficas necessita-se do calor em diversos pontos, para o processo de escaalda no abate, bem como para higienização em vários setores. A melhor solução econômica e operacional é o aquecimento da água, transformando-a em vapor e então a enviando aos pontos de consumo.

Uma caldeira, ou vaso de pressão possui operações das quais se justifica a presença de controladores, devido aos riscos envolvidos. O vapor tem 10% do poder de explosão da pólvora, e caso os níveis de água dentro de uma caldeira cheguem a níveis críticos, a pressão interna pode se tornar tão alta ao ponto da estrutura da caldeira não suportá-la e vir a explodir (como uma granada), lançando fragmentos em altas velocidades para todos os lados, gerando risco de vida para pessoas próximas. Sendo assim, uma situação indesejada em qualquer operação de caldeiras (BOTELHO; BIFANO, 2011).

A função fundamental do sistema de controle é manipular a relação entrada/saída de energia ou material, fazendo com que as variáveis do processo sejam mantidas dentro de limites estabelecidos. Portanto, um sistema de controle deve regular uma grandeza a ser controlada, corrigindo uma variável do processo, que é chamada de variável manipulada. Exemplificando, em um trocador de calor, o sistema de controle regula a variável controlada temperatura do fluido aquecido, corrigindo a variável manipulada vazão de vapor de forma a manter a temperatura no seu valor desejado (valor de ajuste) (BEGA, 2003).

Uma variável controlada de uma caldeira é o nível do fluido a ser aquecido (no caso a água), representada pelo seu volume no interior da caldeira

(V_L), que deve ser mantido em um valor alvo para que atenda a demanda de vapor requerida na indústria, e para tal, deve-se atuar então sobre a variável manipulada, que neste caso é a vazão de entrada de água (Q_L). Com a inserção de calor (q) através da queima do combustível na fornalha, a água se transforma em vapor. Desta forma o seu volume é reduzido e o nível de água em seu interior deve ser repostado.

Outra variável controlada será a pressão de vapor (P_V), a qual deverá estar dentro dos limites operacionais da caldeira, principalmente abaixo da pressão máxima de trabalho, mas também próxima ao valor alvo estipulado para manter a taxa de vazão de saída de vapor. Caso contrário, além da queda de produção de vapor a baixas pressões, há o risco de explosão da caldeira em altas pressões. Como controle deve-se atuar sobre a quantidade de calor adicionado ao processo (q), que se trata da variável manipulada, pois o calor influencia diretamente à variação da temperatura da água no interior da caldeira (T_L), da qual possui relação direta com a pressão de vapor, considerando que não há grandes variações no volume.

As relações entre as variáveis controladas e manipuladas não são diretas, pois dependem de outras variáveis do vaso de pressão que também variam, como massa específica, temperatura e vazão de vapor, tornando o equacionamento complexo. Como o objetivo principal deste trabalho não é a modelagem de um sistema em si, e sim o controle deste, a modelagem foi obtida com base em Garcia (2005), o qual apresenta o desenvolvimento de um vaso de pressão. Ainda seguindo Garcia (2005), algumas simplificações propostas foram realizadas, como por exemplo, desconsiderar a condensação do vapor nas paredes e na interface líquido/vapor e as perdas de calor para atmosfera. Isto se faz necessário devido às dificuldades de se determinar estas variáveis de forma coerente para simulação do modelo matemático.

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO SISTEMA

O método de modelagem foi feita com base em equações envolvendo relações matemáticas e físicas, onde foi desenvolvido um equacionamento físico/matemático de um vaso de pressão (caldeira). O equacionamento de um vaso de pressão segue leis da termodinâmica. Também foram coletados dados de uma caldeira real, para então realizar a simulação do comportamento de algumas das variáveis de entrada e saída de forma análoga à observada em campo, e usadas equações para descrever o comportamento de outras variáveis de entrada e saída. Assim foi possível obter um comportamento semelhante ao de uma caldeira em operação.

4.2.1 Modelagem físico/matemática

Como citado anteriormente, foram desprezados alguns fenômenos e assumidas algumas hipóteses na modelagem matemática como: a energia cinética e potencial e o *momentum* do fluido foram desprezados, as pressões e temperaturas foram consideradas uniformes na área líquida e de vapor, mas não necessariamente iguais entre si, o líquido foi considerado incompressível, ou seja, sua massa específica (ρ_L) e o calor específico (c_P) do fluido foram considerados constantes.

Para a modelagem de sistemas termo-hidráulicos é necessário associar equações de balanço de massa e *momentum* dos sistemas fluídicos com a equação modificada de balanço de energia dos sistemas térmicos. Resumindo, é preciso três equações de balanço de força, uma equação de balanço global de massa e uma de conservação de energia (Garcia, 2005).

Com o intuito de diminuir a complexidade que a modelagem de uma caldeira conduz, foi assumido que o volume da fase de vapor é suficientemente pequeno de forma que a sua dinâmica possa ser considerada desprezível. Se apenas alguns *mols* de líquido têm de ser vaporizado para alterar a pressão na fase de vapor, pode-se assumir que esta pressão é sempre igual à pressão de vapor do líquido a qualquer temperatura, $P_L = P_v$ e assim o fluxo de vapor é dado pela Equação (8).

$$W_v = \rho_v Q_v \quad (8)$$

Considerando as equações da termodinâmica, a Equação (9) é o balanço de massa da fase líquida, a qual fornece a variação do volume de água dentro da caldeira em função do tempo através de sua relação com a vazão de entrada de água e a vazão de vapor saturado de saída.

$$\rho_L \frac{dV_L}{dt} = \rho_e Q_e - \rho_v Q_v \quad (9)$$

Na qual, ρ_L é a massa específica da água no interior da caldeira, ρ_v a massa específica do vapor saturado, ρ_e a massa específica da água que entra na caldeira, todos dados em kg/m³, Q_e a vazão volumétrica de entrada de água na caldeira, e Q_v a vazão volumétrica de saída do vapor saturado, dados em m³/min.

A Equação (10) considera o balanço de energia para a fase líquida, a qual nos fornece a temperatura da água no interior da caldeira em função do tempo, considerando que já se possui a variação do volume dada pela Equação (9). É considerada a entalpia do vapor que deixa a caldeira, dada por $C_p T_L + \lambda_v$.

$$C_p \rho_L \frac{d(V_L T_L)}{dt} = \rho_e C_p Q_e T_e - \rho_v Q_v (C_p T_L + \lambda_v) + q \quad (10)$$

Na qual, q é o calor adicionado ao sistema através da queima de combustível na fornalha da caldeira dado em kcal/min, C_p o calor específico da água dado em kcal/kg.°C, T_L a temperatura da água no interior da caldeira, T_e a temperatura da água de entrada dado em graus Celsius e λ_v o calor latente dado em kcal/kg.

Se o vapor e o líquido estão em equilíbrio, então a pressão de equilíbrio é chamada pressão de vapor. Quando a pressão de vapor se iguala à pressão atmosférica, o líquido entra em ebulição. A pressão de vapor varia em função exclusiva da temperatura de forma exponencial. Portanto, com a variação da temperatura dentro da caldeira é possível encontrar, através de um dos vários métodos encontrados na literatura o valor da pressão de vapor da água dentro da caldeira. Utilizou-se então a versão modificada da equação de Antoine, proposto em

(Garcia, 2005, p. 412) através da Equação (11).

$$\log(P_v) = A + \frac{B}{T} + C \cdot \log T + D \cdot T + E \cdot T^2 \quad (11)$$

Na qual, A, B, C, D e E são coeficientes de regressão específicos para cada substância, T a temperatura da água no interior da caldeira dado em K e P_v pressão de vapor dado em mmHg (convertido para kgf/cm², sendo que 1,0 mmHg são 0,0013595kgf/cm²), é possível encontrar o valor da pressão de vapor aproximado à temperatura em que o líquido se encontra.

Com a pressão de vapor, a equação de estado para o vapor é utilizada para calcular ρ_v . Usando a lei dos gases perfeitos, desconsiderando qualquer mistura, a Equação (12) fornece a massa específica do vapor saturado.

$$\rho_v = \frac{MP_v}{RT_L} \quad (12)$$

Na qual, M é a massa molar da água dada em kg/mol e R é a constante universal dos gases perfeitos dado em m³.(kgf/cm²)/K.mol.

Com as Equações dos controladores (13) e (14), relativos ao calor adicionado pela lenha e a vazão de entrada de água na caldeira que regem a atuação dos controladores em função das variáveis controladas, atuando sobre as variáveis manipuladas q e Q_e pode-se ajustar as variáveis controladas P_v e V_L e assim reduzir os riscos de explosão e ter um controle sobre a vazão de vapor demandado na saída da caldeira para o processo.

$$q = f(P_v) \quad (13)$$

$$Q_e = f(V_L) \quad (14)$$

4.2.2 Comportamento das variáveis do modelo e período de simulação

Os dados registrados pelos operadores, conforme os relatórios de

monitoramento são: Pressão (kgf/cm^2), Temperatura do vapor saturado ($^{\circ}\text{C}$), Temperatura da água de alimentação ($^{\circ}\text{C}$), Consumo de Lenha (m^3/h), leitura do hidrômetro (m^3/h) e a Produção de Vapor (kg/h).

Outros dados adquiridos são principalmente os dados nominais de placa, como Pressão máxima de operação (kgf/cm^2), capacidade de produção (kg/h) de vapor, além de dados complementares, como capacidades máximas de vazão, de água de entrada e vazão de vapor, conforme os diâmetros de encanamentos/tubulação e bombas instalados.

Como citado, os dados coletados e regime de trabalho utilizado para a simulação são os da caldeira de menor capacidade de produção, de cerca de 2400 a 2600 kg de vapor por hora, que opera com uma pressão de trabalho alvo de $6,5\text{kgf/cm}^2$.

Para a simulação foi adotado um intervalo de tempo discretizado de minuto a minuto. Assim, todos os dados foram convertidos para esta base de tempo. Através de uma análise estatística, os dados coletados foram analisados quanto ao seu ajustamento a distribuições de probabilidade. Confirmadas as distribuições de probabilidade que melhor os dados se ajustam, estas puderam ser utilizadas como base para o *software* de cálculo numérico simular o comportamento aleatório das variáveis independentes minuto a minuto.

Visando facilitar o entendimento, as comparações e também os tempos envolvidos no processo de produção de vapor, o período considerado na simulação foi o de uma semana típica de trabalho, com a unidade de tempo em minutos, ver Figura 3. O período inicia no domingo às 17:00 ($t=1$) escolhido de forma aleatória, e encerra o ciclo no domingo 17:00 ($t=10080$). O período diário típico de produção é das 8:00 (8:00 de segunda em $t=900$) até as 15:00 e das 22:00 até a 00:00, sendo que no sábado sua operação começa mais cedo das 5:00 ($t=8220$) até as 19:00 ($t=8820$) e então é desligada, ou seja, não é inserida mais calor e nem água no sistema. Até a próxima segunda às 8:00 se mantém inoperante.

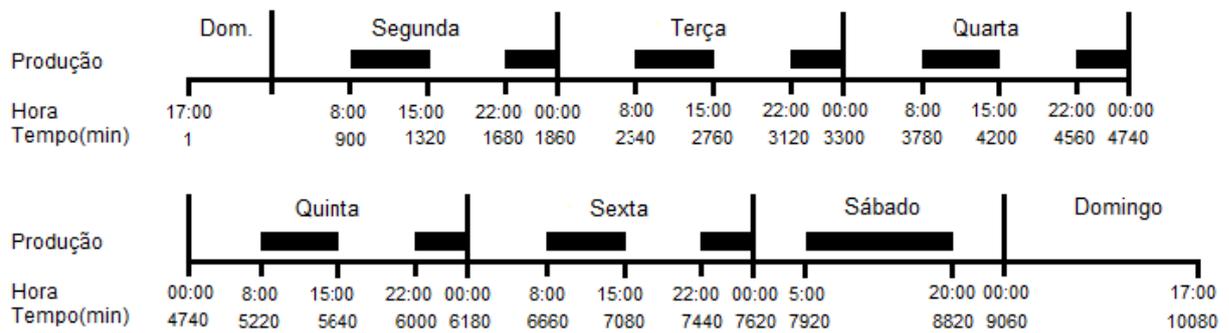


Figura 3– Semana típica de trabalho da caldeira.
Fonte: Autoria Própria.

As unidades das grandezas coletadas não foram as mesmas das utilizadas nas simulações. Portanto foram necessárias conversões das unidades, assim sendo, o consumo de lenha (m^3/h), a leitura do hidrômetro (m^3/h) e a produção de vapor (kg/h) foram convertidos. O calor fornecido ao sistema é baseado no consumo de lenha de eucalipto, segundo Foelkel (2010) o peso de um metro cúbico estéreo (de madeira empilhada) varia com diversos fatores, mas de maneira geral ele varia entre 300 a 400kg de madeira seca por estéreo, o dobro (600 a 800kg) para uma madeira a 50% de umidade (umidade próxima ao que se tem com a madeira verde) e com a madeira a 30% de umidade, esse valor passa a 430 a 570kg. Na maioria das vezes são postas lenhas secas, portanto um valor plausível, considerado com base em informações dos operadores, foi de $450\text{kg}/\text{m}^3$, e segundo Botelho e Bifano (2011, p.35) o calor de combustão da lenha é de aproximadamente $4.000\text{kcal}/\text{kg}$, sendo ainda que 1 hora são 60min, $1,0\text{m}^3/\text{h}$ equivalem à $30.000\text{kcal}/\text{min}$.

A vazão de entrada de água é baseada na leitura de um hidrômetro, sendo que este é contabilizado em m^3/h , convertido para m^3/min , assim $1,0\text{m}^3/\text{h}$ equivalem a $0,0333\text{m}^3/\text{min}$.

A vazão de saída de vapor é baseada na produção de vapor dada em kg/h , considerando que a $6,5\text{kgf}/\text{cm}^2$ de pressão o volume específico do vapor saturado é $0,2609\text{m}^3/\text{kg}$ e da mesma forma 1h são 60min, $1.000\text{kg}/\text{h}$ equivalem a $4,3480\text{m}^3/\text{min}$.

A partir dos dados convertidos foi feita sua análise, através de um *software* estatístico, e através da função de ajuste de distribuição, utilizando o teste de normalidade estatística de *Kolmogorov-Smirnov* (K-S), avaliando sua adequação a uma Distribuição de Probabilidade Normal. Foi possível verificar que todos os

dados coletados tiveram uma boa aderência a esta distribuição. Assim, na Tabela 1 são mostrados os valores das médias (\bar{x}), desvio padrão (S) e fator P do teste de normalidade para cada uma das variáveis selecionadas, em seu período de trabalho.

Tabela 1- Valores de média, desvio padrão e valor P do teste, obtidos de normalidade dos dados K-S.

Variável	Dias de Semana						Sábado		
	Diurno			Noturno			Diurno		
	\bar{x}	S	P	\bar{x}	S	P	\bar{x}	S	P
Pressão de Vapor	6,588	0,439	0,523	6,750	0,437	0,942	6,707	0,468	0,949
Temp. de Vapor	149,830	7,549	0,904	145,783	2,136	0,697	139,98	10,527	0,878
Temp. da Água de Entrada	86,113	6,482	0,789	90,166	3,152	0,800	84,083	5,599	0,536
Produção de Vapor	7,578	2,606	0,840	18,175	5,516	0,901	7,999	3,613	0,526
Vazão de Entrada de Água	0,025	0,008	0,961	0,062	0,019	1,000	0,026	0,013	0,992
Calor adicionado	46543	1418,8	0,514	29887	13604	0,934	27532	6757,3	0,798

Fonte: Autoria Própria.

Com os dados ajustados a uma distribuição normal, com os parâmetros determinados, e com o auxílio do *software* Matlab, foi possível fazer a geração destes comportamentos considerando uma semana típica de operação.

Complementando a modelagem físico/matemática tem-se uma simulação próxima à situação real, pois com os dados gerados foi possível ratificar esta modelagem. Como validação foi utilizada a comparação das respostas com os dados obtidos da caldeira real. Além disto, com os dados coletados referentes à Pressão de trabalho da caldeira, não utilizado na modelagem da planta (pois se trata de uma incógnita nas equações de balanço desenvolvidas anteriormente), este foi utilizado para validação da mesma.

Neste sentido, a Figura 4 mostra o comportamento da variável Pressão do Vapor, valores reais e os simulados com base nos reais gerados através de seu comportamento estatístico como uma distribuição normal com médias e variâncias que foram apresentadas na Tabela 1. Esta variável foi comparada com seu comportamento simulado através da resolução matemática de suas equações de estado em um intervalo de tempo, das 8:00 até as 15:00 horas, ou seja, de 900 até

1320 minutos, que correspondem ao período de trabalho diurno da segunda feira.

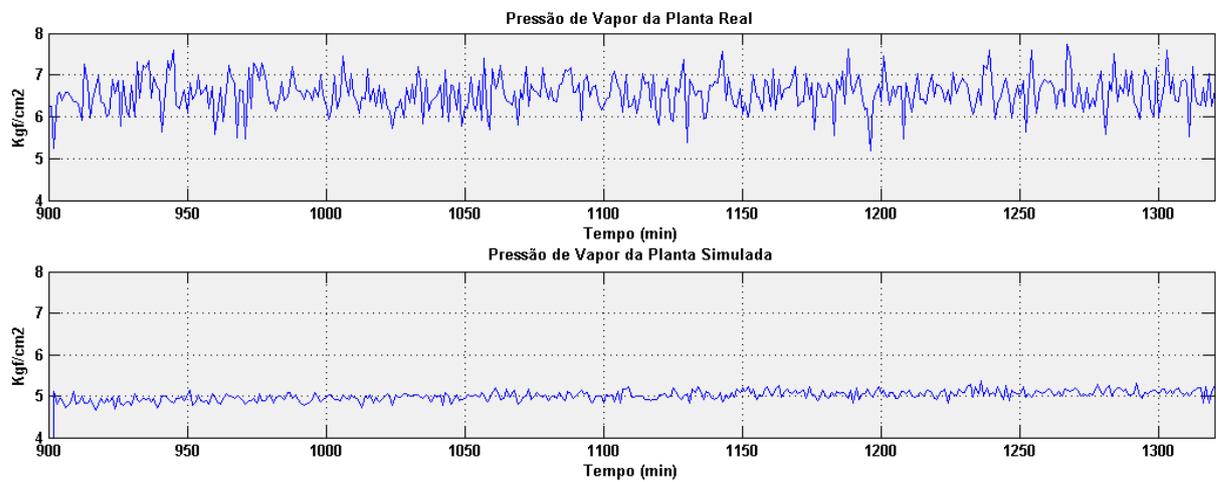


Figura 4 - Comparativo entre pressões dados reais x simulado.
Fonte: Aatoria Própria.

Com base na Figura 4 é possível observar que o comportamento da variável nos dois casos é muito parecido, porém na simulação através da resolução de sua equação de estado seu comportamento possui menor variabilidade, enquanto que os dados coletados possuem maior variabilidade. Mesmo com esta diferença, o modelo foi validado pelos responsáveis técnicos da operação da caldeira, sendo estas variações atribuídas a outras variáveis não consideradas na modelagem, ou mesmo simplificações do modelo.

4.3 PROJETO DO CONTROLADOR PID

Como já citado, o controlador PID é um sistema de controle muito utilizado devido principalmente a sua simplicidade e eficiência. Em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, esse controlador se torna muito útil.

Devido ao fato da planta proposta neste trabalho se enquadrar nesta situação complexa, e não possuir um modelo matemático definido, não foi possível aplicar as várias técnicas de projeto para determinação dos parâmetros do controlador. Essa sintonização é importante, pois fornece as especificações dos regimes transitórios e permanente do sistema a malha fechada, e com isso garante certas especificações de desempenho do mesmo, mas infelizmente não foi possível ser empregada.

Desta forma é recorrido a abordagens experimentais de sintonia do controlador PID, que é baseada em questões empíricas, analisando quando a resposta se aproxima da melhor sintonização possível. Devido ao fato da planta ser abordada em software neste trabalho, obter as respostas por estes meios não se torna algo tão complexo quanto seria aplicá-lo na prática, em sistemas que possuam uma resposta lenta, como é geralmente o caso de sistemas térmicos.

Para diminuir a quantidade de tentativas, foram feitas simulações seguindo uma sequência previamente elaborada, que consiste em primeiramente com os ganhos assumindo valores baixos, e após cada ganho, individualmente, assumindo valores grandes, enquanto os outros são mantidos baixos, e depois aos pares assumindo valores grandes e um mantido baixo. Desta forma, analisando as respostas obtidas é possível observar uma tendência a melhor sintonização, e aí sim feitos os ajustes finos quanto a estes valores de ganhos.

Após esta análise foi proposta uma sintonização, considerada a melhor possível para o comportamento em questão, com os ganhos K_p , K_i e K_d com valores de 90, 120 e 1 respectivamente para o controle de nível da caldeira, e 1000, 3500 e 60 respectivamente para o controle de pressão de vapor da caldeira. A resposta do sistema de controle de volume de líquido no interior da caldeira é mostrada na Figura 5, e a Figura 6 mostra o controlador de pressão de vapor. Salientando que os valores de alvo para o controle de nível e de pressão, são 6 m^3 e

6,5 Kgf/cm² respectivamente.

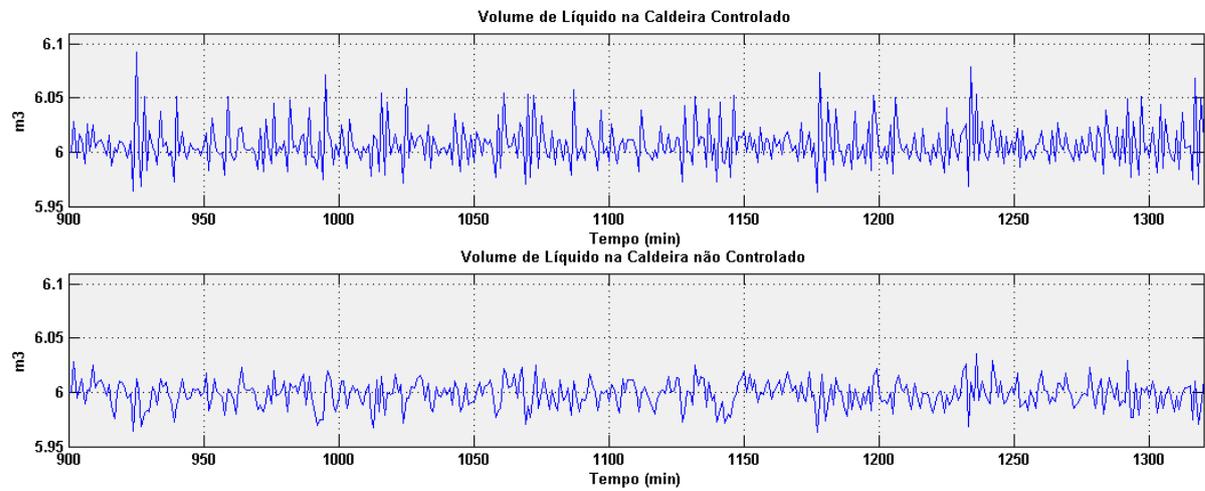


Figura 5 - Comparativo entre volume de líquido na caldeira não controlado e controlado.
Fonte: Autoria Própria.

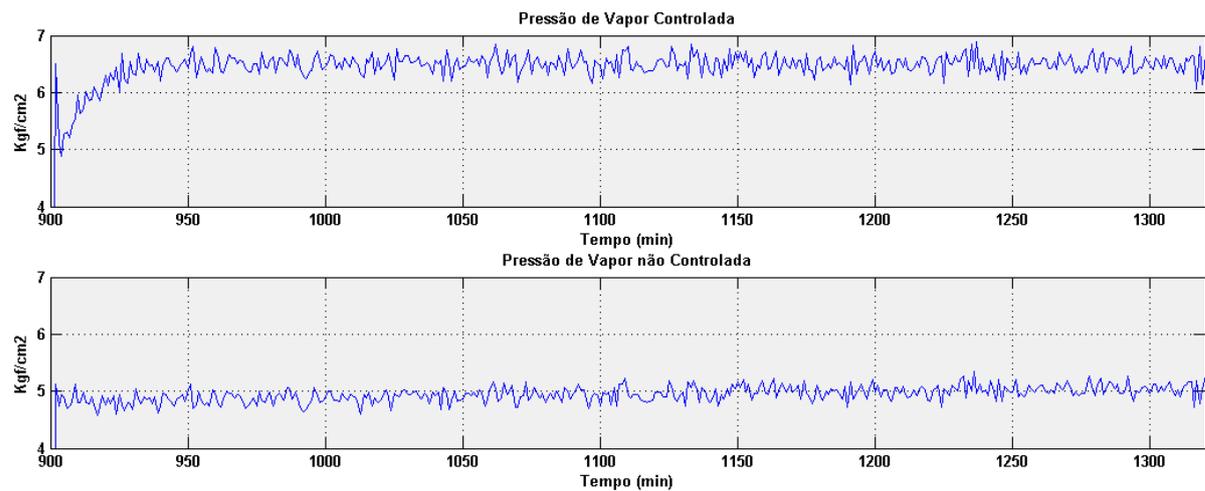


Figura 6 - Comparativo entre pressão de vapor na caldeira controlado e não controlado.
Fonte: Autoria Própria.

4.4 PROJETO DA CARTA DE CONTROLE

A escolha da melhor carta de controle para monitoramento de um processo específico deve ser feita considerando as características deste, o comportamento dos dados, a correlação, entre outras.

Entre as possíveis escolhas para este trabalho, a carta de controle EWMA foi escolhida por apresentar como característica importante a possibilidade de detecção de pequenas mudanças do processo, de ser robusta na presença de variáveis correlacionadas, além de ser, de certa forma, mais fácil de estabelecer e operar que sua equivalente CUSUM (MONTGOMERY, 2004).

A parametrização das cartas de controle foi realizada com base nos valores históricos, registrados pelas primeiras rodadas do sistema. Com estes dados capturados e o comportamento analisado, pôde-se perceber os comportamentos e os ajustes necessários.

Como primeiro passo é especificado os comprimentos médios de sequência, bem como a magnitude da mudança no processo, como orienta Montgomery (2004), sendo que são escolhidos valores diferentes para as duas variáveis de controle. O valor do comprimento médio de sequência (CMS) pode ser entendido como o número médio de amostras necessárias para que seja detectada uma mudança. O CMS depende do tamanho de amostra e da dimensão da mudança que se deseja detectar, isto é, número de desvios padrões que a média pode variar. Para detectar mudanças de menor magnitude é utilizado tamanho de amostras maiores, caso o interesse seja em mudanças de maior magnitude podem ser utilizados amostras menores (LOPES, 2013).

Desta forma, como o processo a ser controlado não sofre grandes variações em pequenos intervalos de tempo podem ser usadas amostras maiores, e consultando a tabela apresentada por MONTGOMERY (2004, pg. 271) um CMS de 28,8 se torna satisfatório, com 0,5 para magnitude da mudança para variável volume de líquido na caldeira, resultando em valores de L e α de 2,615 e 0,05 respectivamente.

Na mesma linha de pensamento, para a variável pressão de vapor, o valor escolhido de CMS foi de 10,5 e 1,0 para magnitude da mudança, resultando em valores de L e α de 2,962 e 0,2 respectivamente.

Em geral, uma boa regra empírica é usar valores menores de α para detectar menores mudanças. Outra padronização é usar os limites três-sigmas, ou $L = 3,0$, que funciona razoavelmente bem, particularmente com valores maiores de α , embora, quando pequeno haja uma vantagem em reduzir esse limite para valores entre 2,6 e 2,8 (MONTGOMERY, 2004).

Os valores alvos são os mesmo utilizados no controlador PID, e com os valores apresentados, os limites de monitoramento da carta de EWMA podem ser calculados e após vários períodos de tempo em que a carta EWMA esteja rodando, assim os valores podem ser considerados como os estacionários, conforme os valores mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores dos limites superiores e inferiores das cartas EWMA para cada cenário proposto.

	Diurno		Noturno		Sábado	
	LSC	LIC	LSC	LIC	LSC	LIC
Volume de Líquido (m³)	6,0613	5,9387	6,0886	5,9114	6,0587	5,9413
Pressão de Vapor (kgf/cm²)	6,9047	6,0953	7,5586	5,4414	7,3555	5,8722

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 7 mostra a carta de controle EWMA aplicada à variável volume de líquido controlado para o regime de trabalho diurno semanal e a Figura 8 para variável pressão de vapor controlada para o mesmo período. A título de exemplificação, ambas as Figuras retratam uma segunda-feira típica de operação diurna.

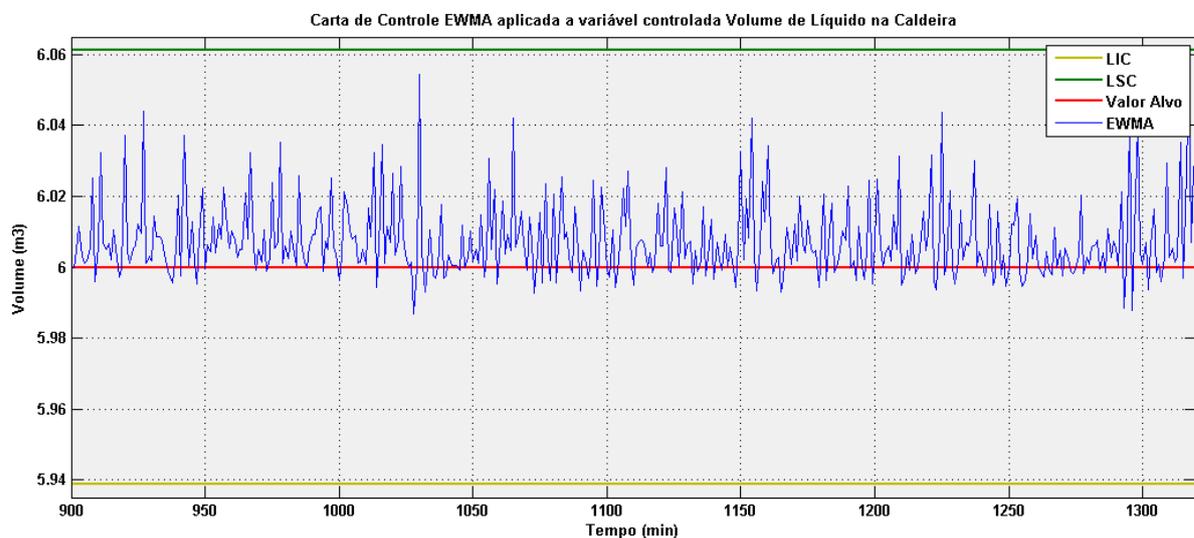


Figura 7 - Carta de controle EWMA aplicada ao volume de líquido da caldeira.
Fonte: Aatoria Própria.

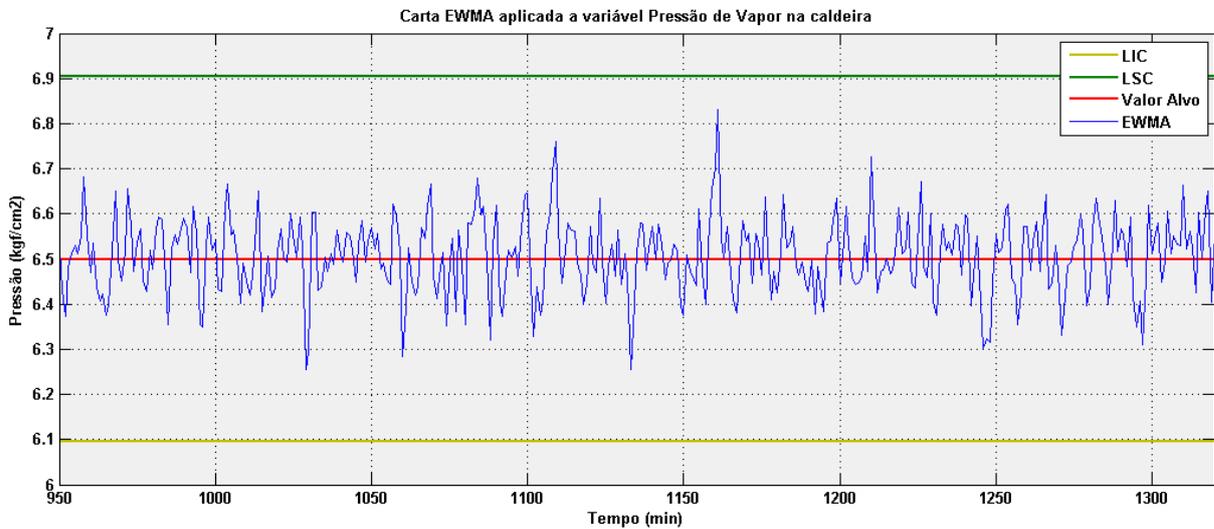


Figura 8 - Carta de controle EWMA aplicada à pressão de vapor na caldeira.
Fonte: Aatoria Própria.

4.5 INTEGRAÇÃO ENTRE OS CONTROLADORES

A integração entre os dois métodos de controle teve a intenção de aumentar a robustez e a confiabilidade no sistema de controle. Sendo que o CEnP, através do PID providenciará as correções de forma automática através da leitura das variáveis envolvidas, garantindo assim um controle contínuo do processo. Enquanto o CEP, através da carta de controle EWMA, fará o monitoramento das variáveis de controle, e detectada uma falha, através dos limites de controle desta, da qual o controle PID não consiga corrigir, ela além de sinalizar ao operador uma condição adversa com mais rapidez, também deverá atuar sobre a lei de controle do PID a fim de melhorar a eficiência do controle.

A integração neste trabalho se dará de duas formas, como previamente descrito, a primeira e mais comum é a simples utilização dos dois controles combinados, como apresentado nas Figuras 7 e 8, sendo que nelas o sistema está sob controle e não fica evidenciada a melhoria proposta. E a segunda, a ser abordada na sequência, na qual a carta de controle contribui na ação de controle do controlador PID.

Para explicar a contribuição que a integração produz, é necessário

avaliar condições onde há uma causa especial, principalmente em situação que o controlador PID não consiga corrigir a falha, portanto, sai dos limites de controle EWMA e tendem a se distanciar dos valores-alvo cada vez mais se nenhuma ação for tomada. Com a sinalização da carta EWMA, esta falha seria sinalizada aos operadores, e estes atuariam sobre a causa, e após um período para sua correção o processo voltaria a ficar sob controle, diminuindo custos e aumentando a confiabilidade do processo.

Para exemplificar, é simulada uma falha ocorrida devido à atuação do relé de sobrecarga do motor da bomba, desligando a mesma, no período de menor variabilidade, que é compreendido como o regime de trabalho diurno, das 8:00 às 15:00 horas de segunda a sexta. Nesta situação a falha considerada ocorreu durante a jornada da segunda-feira, próximo às 10:00 ou minuto 1020. A Figura 9 mostra o processo saindo de controle e a ação de controle do controlador PID tentando corrigir a falha. Com o desligamento da bomba o sistema não consegue repor a água dentro da caldeira, mesmo o controlador mandando abrir mais a respectiva válvula, além de o operador não perceber o problema de imediato. Na Figura 9, para esta simulação, a carta EWMA foi desabilitada, deixando de monitorar o processo.

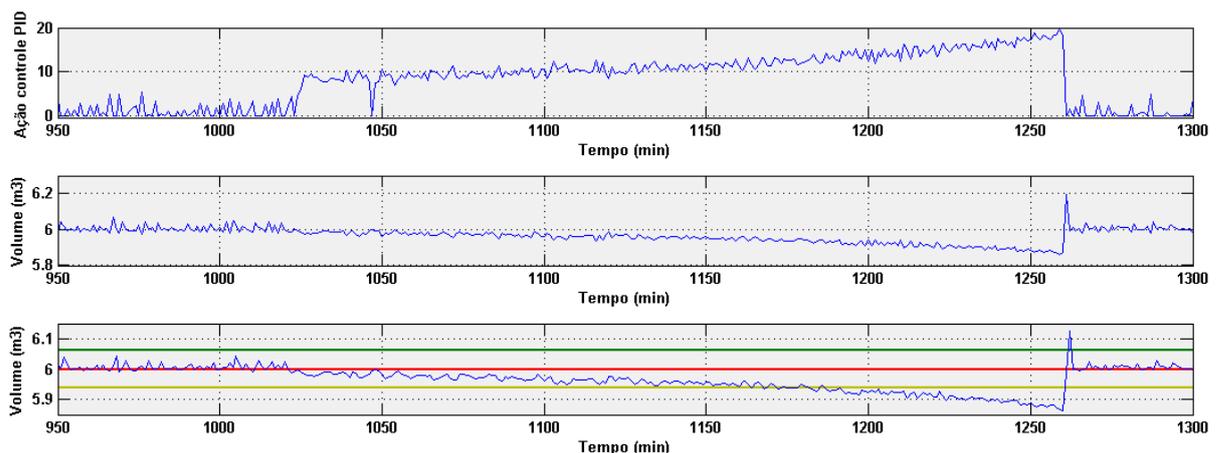


Figura 9 - Variável Volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA não sinalizando - falha da bomba.

Fonte: Autoria Própria.

A atuação do relé que desliga a bomba se dá às 10:00, que corresponde ao minuto 1020 da segunda-feira e a percepção do operador quanto a falha só acontece após 3 horas e 40 minutos, quando observando o manômetro da caldeira visualizou que a pressão estava em níveis elevados e o tempo até o electricista

atender o chamado e solucionar o problema são mais 20 minutos (tempo definido arbitrariamente, baseado nas informações dada pelos operadores), totalizando 4 horas, ou seja, no minuto 1260 a falha é sanada.

A Figura 10 mostra o mesmo processo saindo de controle, ocasionado pela mesma falha da bomba no mesmo instante. Porém, aproximadamente no minuto 1159 (na escala de tempo determinada no trabalho, compreendido na jornada de segunda feira, período diurno) a falha é sinalizada pela carta EWMA, o operador percebendo a sinalização, comunica a um electricista que 20 minutos depois rearma o relé (ou seja, aproximadamente no minuto 1184) da sinalização a falha é removida e o sistema voltou a operar sob controle.

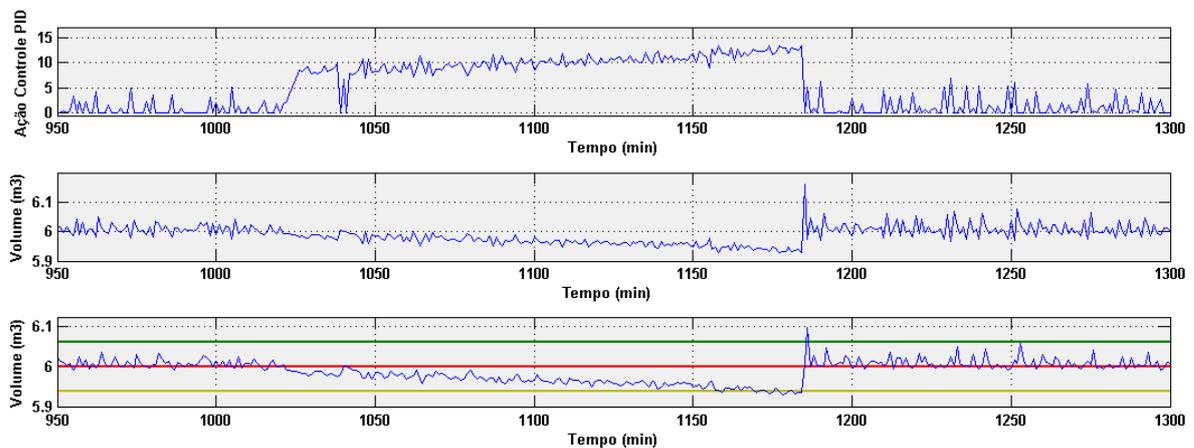


Figura 10 - Variável Volume - Ação Controlador PID e Carta de Controle EWMA sinalizando - falha da bomba.

Fonte: Autoria Própria.

Com os valores do Erro Quadrático Médio (EQM) em relação aos valores alvo, é possível traduzir em um valor o benefício que a integração pode trazer para o sistema em que é aplicado, para este exemplo o EQM para o primeiro caso é 0,0176 e para o caso onde a carta EWMA sinaliza, o valor é 0,0047. Percebe-se que o EQM se aproximou de zero, o que significa que os valores amostrados estão mais próximos ao valor alvo.

A segunda fase da integração proposta neste trabalho, além da sinalização da carta EWMA já realizada, é o controle estatístico contribuir na lei de controle do controlador PID quando detectada uma causa especial por este.

Desta forma, quando a carta EWMA sinalizar que a variável controlada está fora dos limites de controle, ao mesmo tempo ela também irá acrescentar uma

ação de controle ao controlador PID. Para o exemplo de falha utilizado anteriormente (atuação da proteção da bomba) este procedimento não obteria êxito, pois de qualquer forma não seria capaz de fornecer água a caldeira. Mas, supondo um segundo caso, onde haja um vazamento na tubulação, a ação adicional da carta EWMA seria reforçar a ação de abrir ainda mais o registro de água para tentar manter a variável volume de líquido dentro da caldeira, dentro dos limites da carta, enquanto o operador não viesse a sanar a falha sinalizada.

A Figura 11 mostra o caso onde há um vazamento que faz com que o nível da caldeira caia aproximadamente $1,93 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ ou 1,93 L/min. Nesta situação os controles ainda são independentes, a carta EWMA nesta fase ainda não influencia na lei de controle do controlador PID.

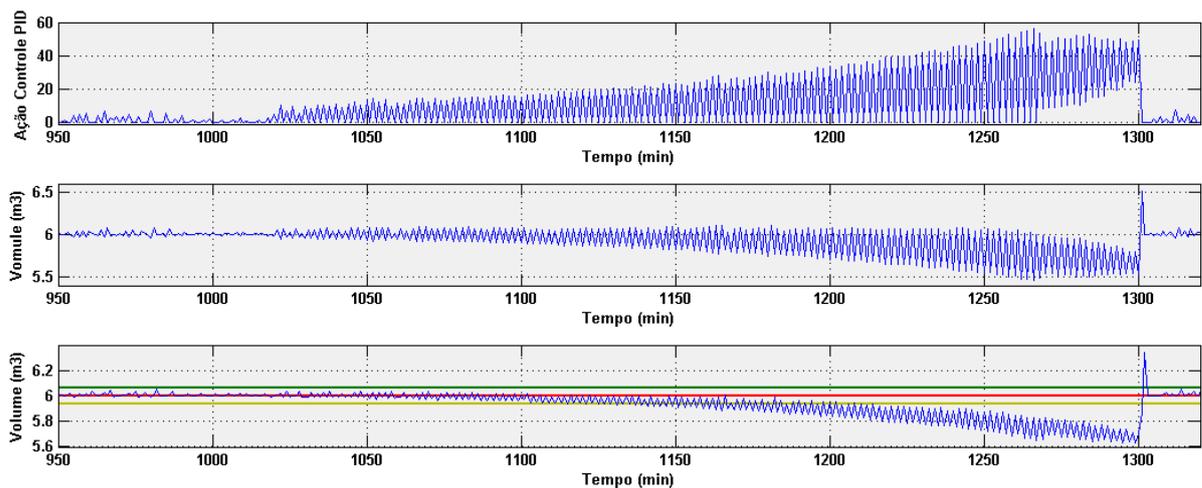


Figura 111 – Variável volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando sem auxiliar o Controlador PID - falha devido a vazamento na tubulação de alimentação de água caldeira.

Fonte: Autoria Própria.

A Figura 12 mostra a mesma simulação, porém agora a carta EWMA além de sinalizar a falha, ajuda na lei de controle do controlador PID, através de uma ação proporcional ao erro. A equação que rege essa ação foi inserida de modo a atuar proporcionalmente ao erro (como um CEnP Proporcional) quando a variável controlada extrapola os limites da carta EWMA. Esta contribuição é somada às contribuições proporcionais, integrais e derivativas do PID, e assim a equação 6 é modificada, sendo então a lei de controle regida pela equação (14).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) + K_{EWMA} e(t) \quad (14)$$

E o ganho K_{EWMA} , de forma análoga à sintonização do PID foi realizada por abordagens experimentais de sintonia, baseada em questões empíricas, analisando quando a resposta se aproximou da melhor sintonização possível, e assim, se assumiu um valor de 50 de ganho, sendo avaliado o período de trabalho de menor variabilidade.

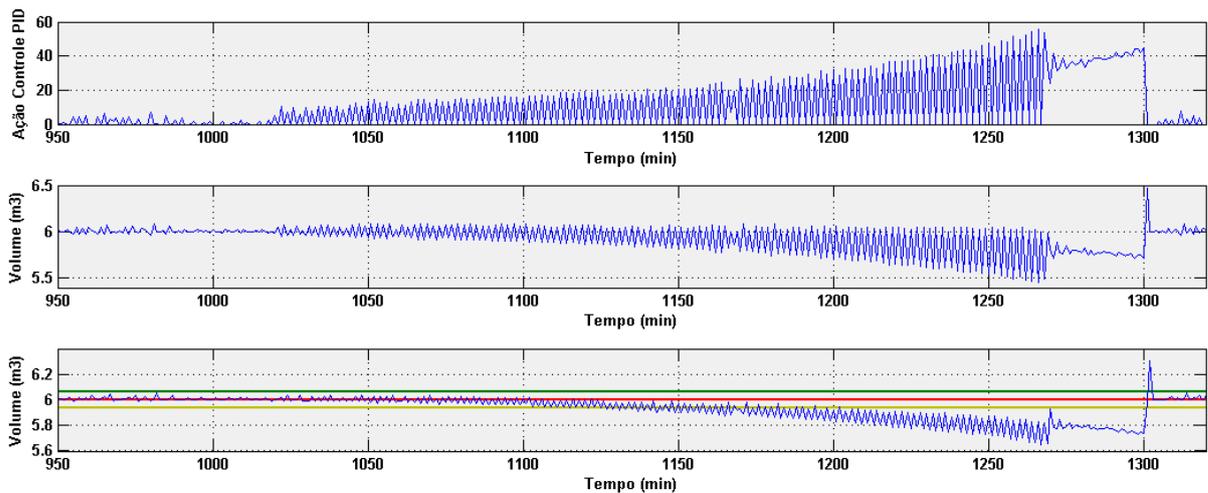


Figura 12 - Variável volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao Controlador PID - falha devido a vazamento na tubulação de alimentação de água caldeira.

Fonte: Autoria Própria.

Da mesma forma, avaliando os valores dos EQM's é possível mensurar o ganho proporcionado ao sistema controlado. O valor do EQM para o caso onde não há a contribuição na ação de controle do PID pela carta de controle EWMA é de 0,0047, enquanto que para o caso onde há a contribuição, esse valor reduz para 0,0045. Vale salientar que para estas simulações foram salvos um único conjunto de dados, ou seja, foram alterados somente os métodos de controle para assim evidenciar através dos valores dos EQM's a melhoria da robustez do sistema de controle, sem sofrer influência de mudanças de temperatura ambiente ou diferença de poder calorífico da lenha utilizada para gerar o calor.

5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Foram criados três cenários diferentes para ser possível mensurar as vantagens e desvantagens do controle proposto. Esses três cenários são baseados nas demandas de vapor que variam durante sua operação semanal. Nos períodos diurnos de segunda a sexta, a operação é dita de baixa exigência, e apresenta menor variabilidade, devido ao fato de ela apenas auxiliar a caldeira “grande” nos períodos de maior demanda, pois é alimentada toda a fábrica.

Nos períodos noturnos de segunda a sexta, a operação é dita de exigência intermediária, e apresenta maior variabilidade que no período diurno, pois neste período de operação a caldeira “pequena” trabalha sozinha alimentando a demanda de vapor para os setores de industrializados, refinaria e graxaria, salientando que estes setores já não estão em seus picos de produção, sendo que os digestores (maior carga de vapor para este período) trabalham de forma menos intensa, levando mais tempo para o cozimento do que nos períodos diurnos.

Nos sábados, a operação é dita de alta exigência, e apresenta a maior variabilidade, pois de forma semelhante ao período noturno, ela trabalha sozinha e alimenta os mesmos setores, porém a demanda de vapor solicitada pelos digestores é maior, pois é processado de forma mais intensa os subprodutos.

Para cada cenário deste será apresentada as respostas do sistema com a planta: Controlada apenas pelo PID, com a operação do PID e da carta de controle EWMA em paralelo (sem interferência da carta de controle), a integração com a carta EWMA auxiliando na lei de controle do controlador PID e por fim é inserida uma falha para evidenciar a eficácia do controle proposto, na ocorrência de uma causa especial. As falhas adotadas foram escolhidas baseadas nos relatos dos operadores quando questionados em quais eram as falhas mais freqüentes, o tempo de reparo desta falhas também foram levantados, e em média levam de 20 a 30 minutos dependendo do mecânico, portanto serão utilizados tempos dentro desta faixa para as simulações a seguir.

Para o primeiro cenário de baixa exigência, com o controlador PID trabalhando de forma isolada, é alcançado um controle em tempo real das variáveis de interesse, que faz com que elas fiquem próximas do valor de referencia estipulado. Em um primeiro instante o comparativo é feito com o controlador PID e a

planta sem o controle de engenharia aplicado, ou seja, feito o controle através de operadores que acompanham de hora em hora a pressão da caldeira e reabastecem a fornalha com quantidade e frequência predeterminada baseado no histórico de funcionalidade da caldeira e experiência dos operadores. Além de serem orientados na ocorrência de falta de vapor em pontos da fábrica pelos encarregados dos setores, que obtêm esta informação através do acompanhamento das temperaturas dos processos em que o vapor é utilizado. Exemplificando, quando a temperatura de um esterilizador está abaixo do mínimo exigido este informa aos operadores que provêem o aumento de temperatura gerando mais vapor, inserindo calor ao sistema.

A Figura 13 mostra a comparação da variável pressão controlada pelo PID e o comportamento da mesma sem um controle de engenharia aplicado conforme os períodos do cenário de menor exigência já comentado e ilustrado pela Figura 3.

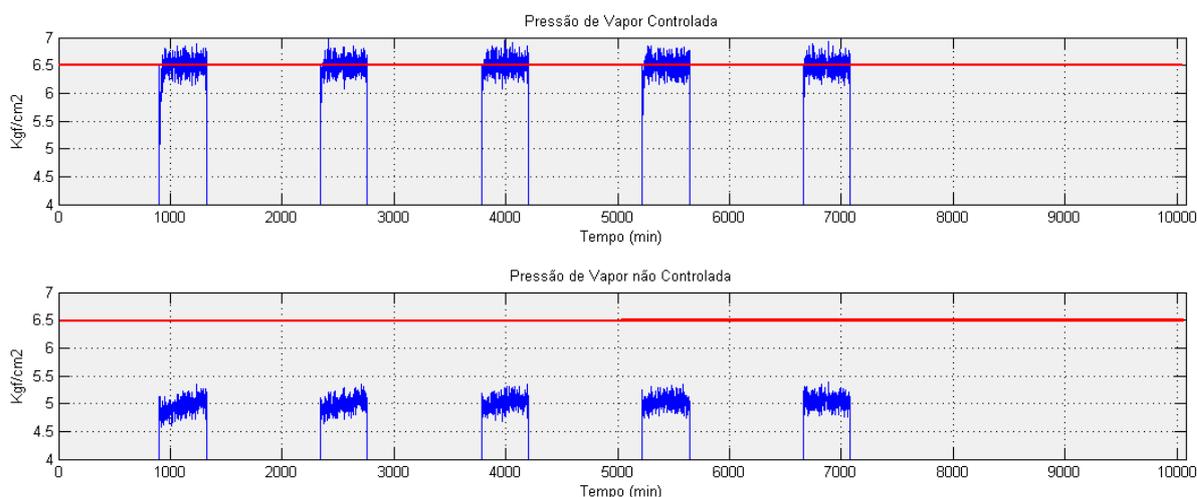


Figura 13 - Variável Pressão – Controlado x não Controlado - Período de menor exigência.
Fonte: Autoria Própria.

Se pode notar na Figura 13 que em um período típico noturno, a variável sem o controlador PID se mantém abaixo dos 6,5 kgf/cm² solicitados, provavelmente devido as simplificações realizadas na modelagem, pois observando a Figura 4 pode-se notar uma diferença considerável entre as pressões reais coletadas e da simulação da planta modelada, porém é possível observar também uma maior oscilação em torno do valor alvo, devido a não estar implementado um controle de engenharia. Já com o controlador atuando, esta mesma variável se mantém próxima ao valor alvo, como o desejado. A Figura 14 mostra a mesma comparação para variável volume.

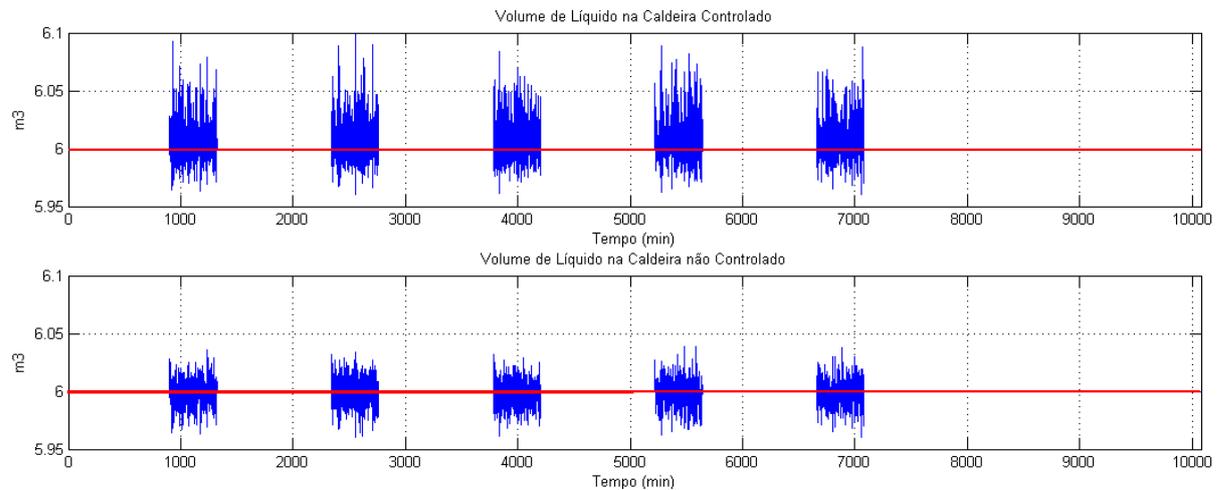


Figura 14 - Variável Volume - Controlado x não Controlado - Período de menor exigência.
Fonte: Autoria Própria.

Entretanto para a variável volume a modelagem atendeu de forma bem satisfatória, oscilando próxima ao valor alvo. É possível observar também que não houve um ganho no controle, na verdade ocorreu um aumento na variabilidade do processo, devido a fatores desconhecidos.

Porém, quando acontece alguma falha da qual o controlador PID não consegue resolver, o resultado é que as variáveis de controle se afastam indefinidamente do valor alvo estipulado e o sistema é dito fora de controle, como foi apresentado na Figura 9.

Para este mesmo cenário o controle estatístico através da carta de controle EWMA é implementado em conjunto ao controle PID.

Quando o sistema está sob controle, as variáveis se mantêm dentro dos limites da carta de controle EWMA, pois o controle PID consegue manter as variáveis, volume e pressão, próximas ao valor alvo. A Figura 15 explana a comparação da variável pressão controlada pelo controle PID isolado e a operação deste com a carta de controle EWMA. É possível notar uma diferença no comportamento da variável, pois eles são determinados a partir da equação (1) que utiliza todos os dados coletados anteriormente e dá menor relevância ao dado conforme o tempo decorre. A Figura 16 apresenta o mesmo para a variável volume.

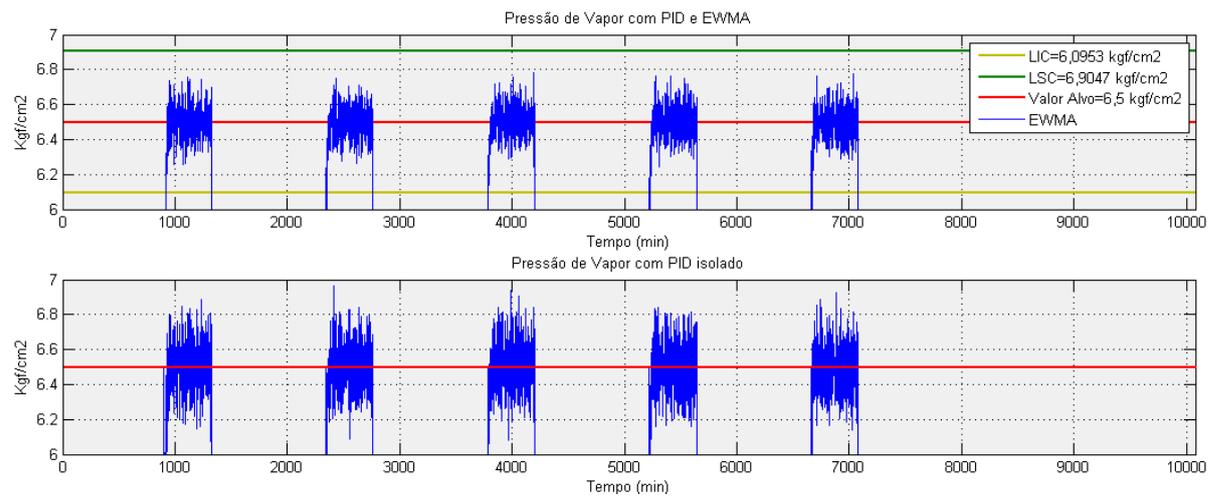


Figura 15 - Variável Pressão - PID isolado x integração PID e EWMA - Período de menor exigência.

Fonte: Autoria Própria.

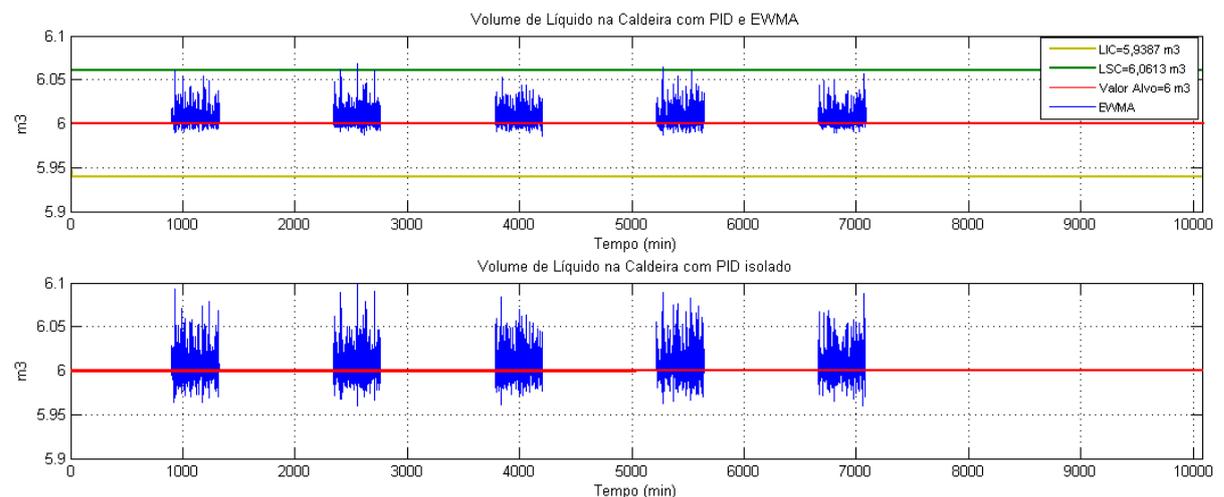


Figura 16 - Variável Volume - PID isolado x integração PID e EWMA - Período de menor exigência.

Fonte: Autoria Própria.

É importante ressaltar que para a variável controlada volume, durante os intervalos de operação, foi considerado que o volume de água dentro da caldeira se mantém em 6m^3 , por isso os pontos que estão fora de controle sinalizadas no início e término de cada jornada de trabalho. A variável pressão, neste período fora de operação não foi avaliada, pois não é de interesse quando não há necessidade de controle.

Fazer a avaliação do sistema de controle com a carta de controle EWMA auxiliando na lei de controle do controlador PID estando este sob controle não traria nenhum resultado perceptível, que o diferencie da integração dos controladores,

portanto esta tentativa de melhoria da robustez do controle será explanada juntamente à inserção de uma causa especial ao sistema, e assim feitas as devidas comparações.

Para este cenário, este tema foi abordado no subitem anterior, sendo que as Figuras 11 e 12 vieram a evidenciar o ganho estimado, confirmado pelos valores dos EQM's.

Vale ressaltar que para cada modo de operação, diurno, noturno e nos sábados foram produzidos limites de controle da carta EWMA diferentes, pois o seu modo de operação é diferenciado nestes três turnos, estes valores foram apresentados na Tabela 2. Assim, onde é previsto uma maior variabilidade, que é o caso do período noturno, estes limites assumem valores maiores, pois o desvio padrão que é utilizado para o cálculo destes limites se torna maior.

Para o segundo cenário, que corresponde ao de exigência intermediária ou período noturno, são feitas as mesmas análises. Primeiramente com o controle PID isolado comparado ao sistema sem controle, mostrado na Figura 17 para a variável pressão e Figura 18 para o volume.

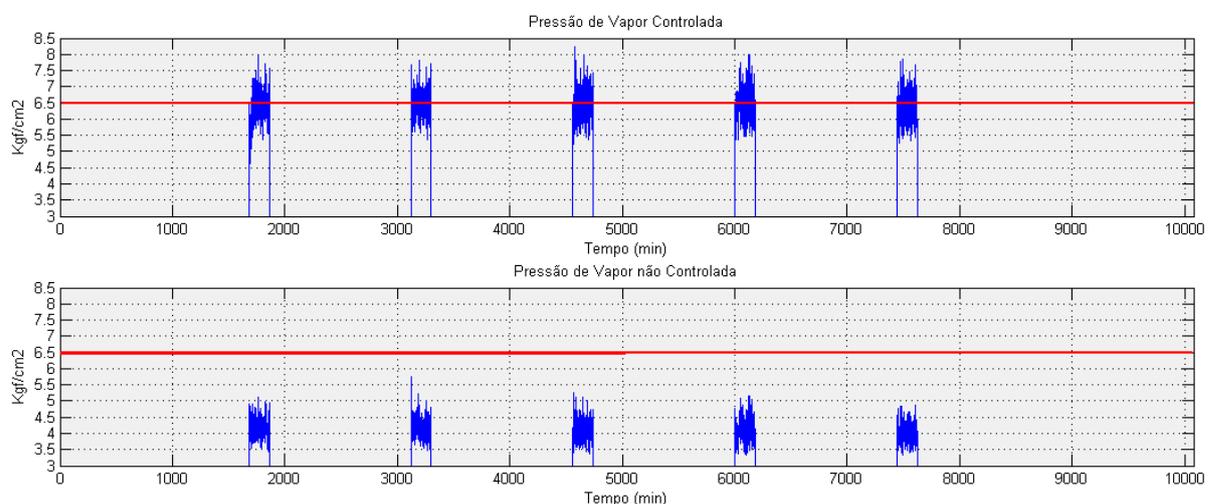


Figura 17 - Variável Pressão - Controlado x não Controlado - Período de exigência intermediária.

Fonte: Autoria Própria.

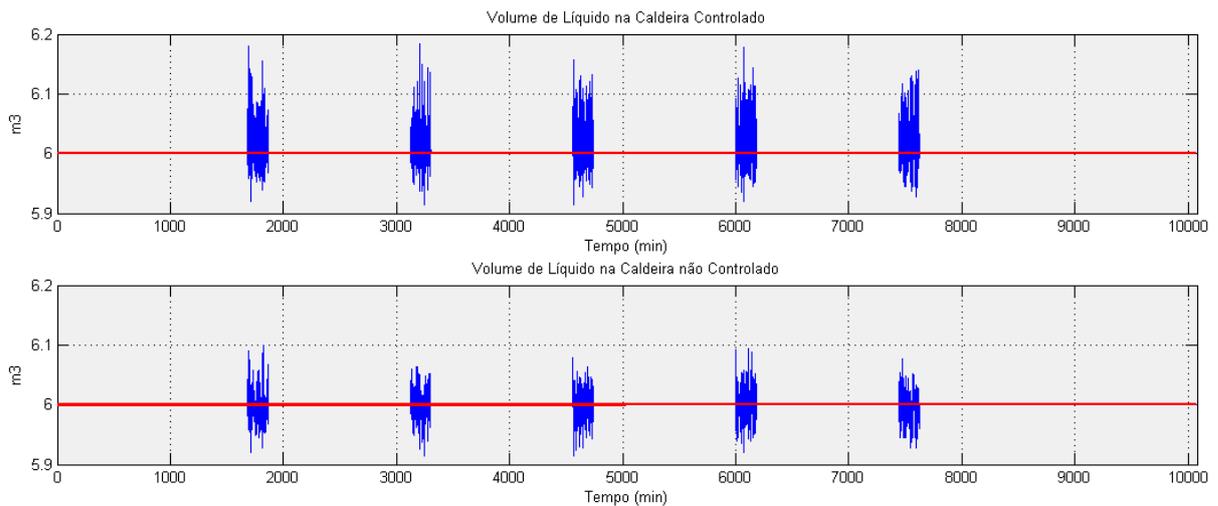


Figura 18 - Variável Volume - Controlado x não Controlado - Período de exigência intermediária.

Fonte: Autoria Própria.

De forma semelhante ao primeiro cenário a melhora proporcionada com o controle PID é visível, a variável volume que havia apresentado maior variabilidade repetiu esse comportamento, porém é possível observar que os dados se concentram na maioria acima do valor alvo, fator este favorável ao sistema, devido a diminuição do risco de faltar vapor para a produção.

As Figuras 19 e 20 mostram a comparação entre o sistema controlado pelo PID e a integração PID e EWMA para as variáveis pressão e volume respectivamente.

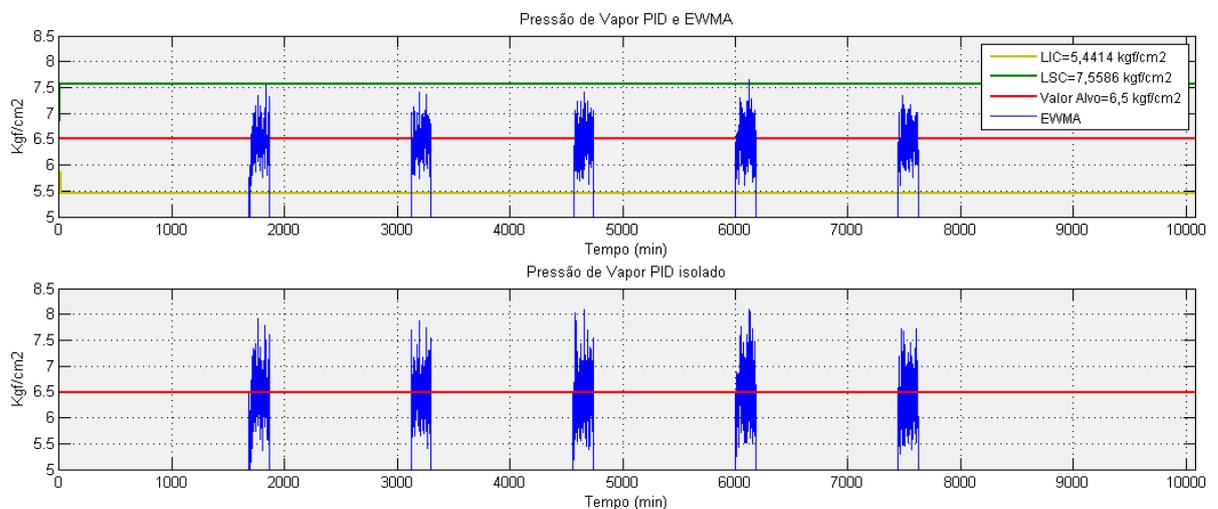


Figura 19 - Variável Pressão – PID isolado x integração PID e EWMA – Período de exigência intermediária.

Fonte: Autoria Própria.

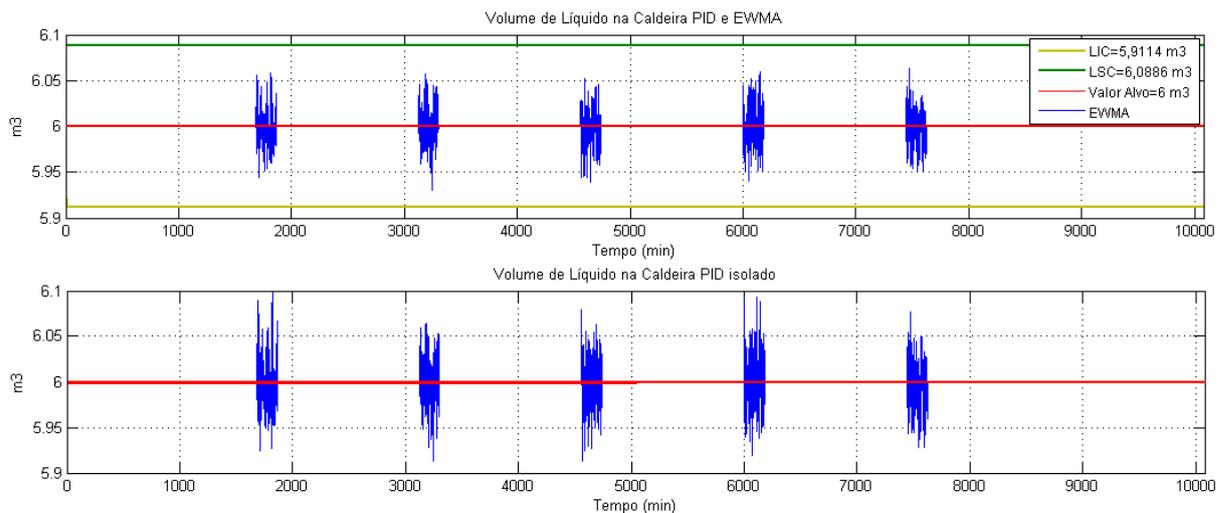


Figura 20 - Variável Volume – PID isolado x integração PID e EWMA – Período exigência intermediária.

Fonte: Autoria Própria.

Como já mencionado, as vantagens proporcionadas pelo controle integrado ficam visíveis na ocorrência de causas especiais, das quais o controle PID não consiga manter a variável sob controle. Portanto, para evidenciar a melhoria será inserida uma falha no sistema e então avaliada as respostas do sistema com o controle integrado, e com a carta de controle EWMA auxiliando na lei de controle do PID como feito para o período de menor exigência.

Desta forma, considerando que a carta de controle EWMA não sinalize a causa especial, às 09:20 da noite de quarta-feira, que corresponde ao minuto 4580 um vazamento faz com que o nível da caldeira caia aproximadamente $2,50 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ ou 2,5 L/min. O tempo decorrido entre os operadores da caldeira perceberem o vazamento e o reparo ser feito é de 2 horas, ou seja, no minuto 4700. Sendo que destas 2 horas, 1 hora e 30 minutos foi o tempo despendido para o operador visualizar durante uma inspeção da estrutura da caldeira o vazamento e 30 minutos o tempo para realização dos reparos. As Figuras 21 e 22 explanam o comportamento das variáveis pressão e volume na caldeira respectivamente, para o período de trabalho da quarta feira à noite, comparando o comportamento da respectiva variável, com a integração do controle e a ação de controle do PID.

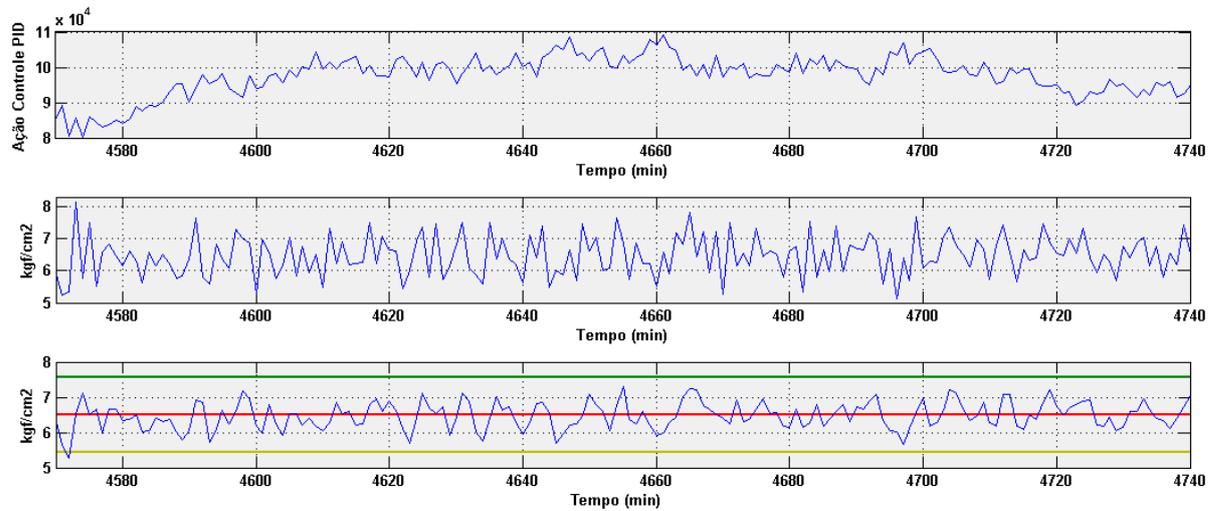


Figura 21 - Variável Pressão - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA não sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.

Fonte: Autoria Própria.

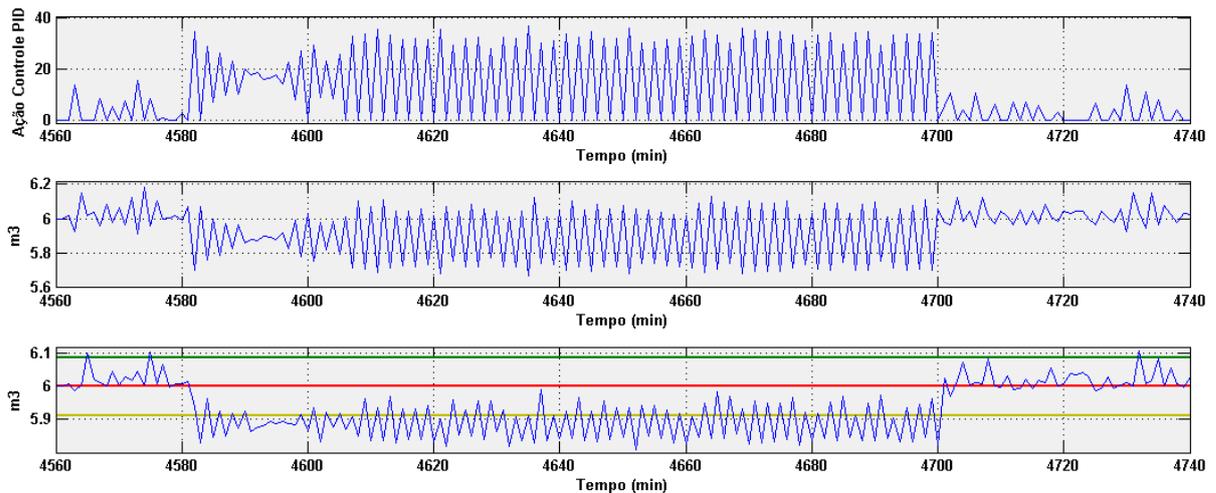


Figura 22 - Variável Volume - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA não sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.

Fonte: Autoria Própria.

O valor do EQM da variável pressão para este caso onde a carta não sinaliza é de 0,3890 e para a variável volume é 0,0268.

As Figuras 23 e 24 explicam a mesma situação, porém agora, a carta de controle sinaliza a falha aproximadamente no minuto 4582 (que corresponde ao momento em que a variável ultrapassa o LIC), sendo que 30 minutos depois o vazamento é considerado consertado (minuto 4610).

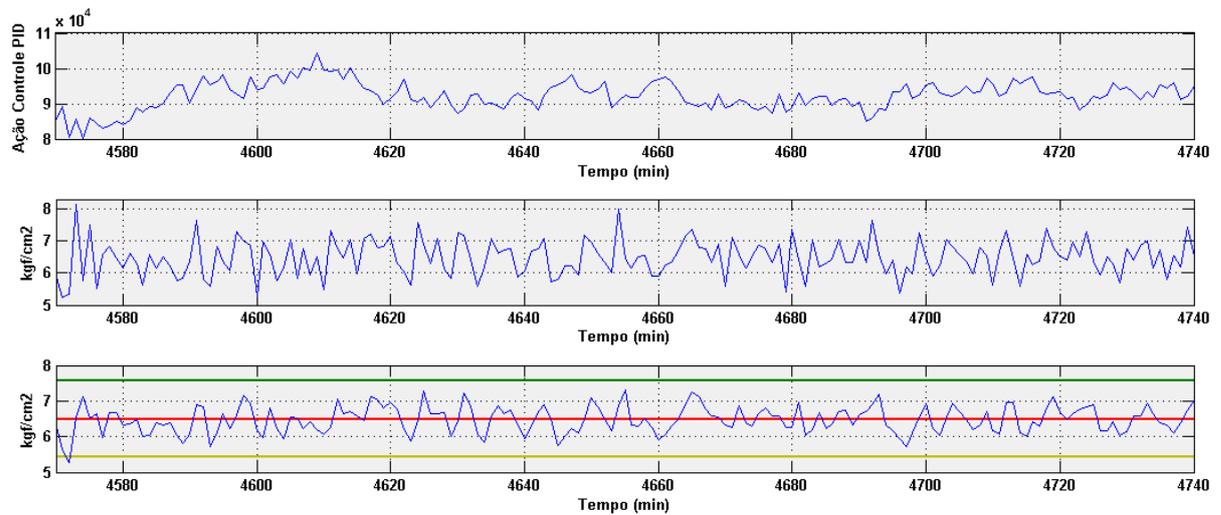


Figura 23 - Variável Pressão - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.

Fonte: Autoria Própria.

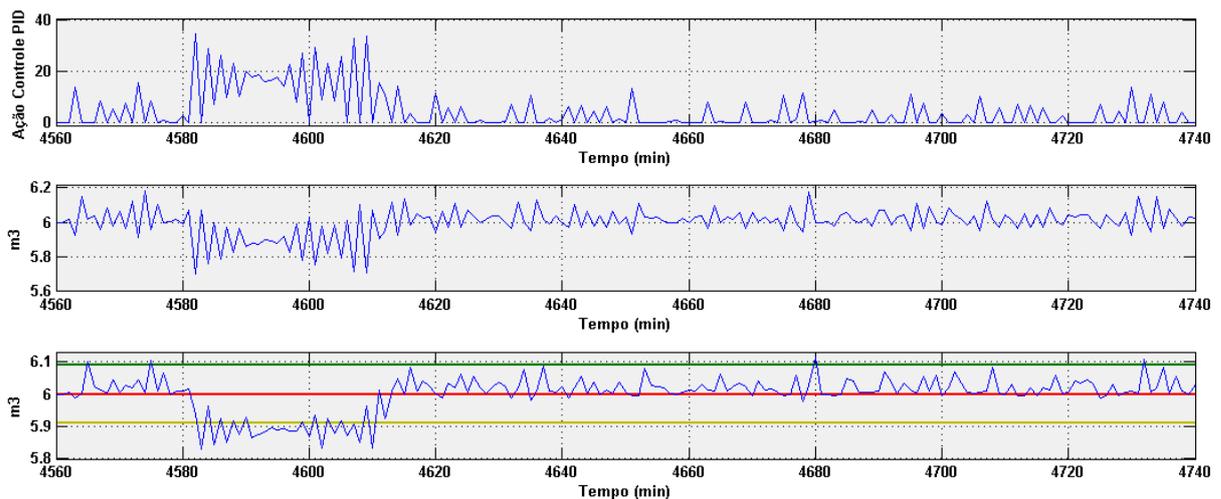


Figura 24 - Variável Volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.

Fonte: Autoria Própria.

Já para este caso onde a carta EWMA sinaliza a falha os valores dos EQM's ficam em 0,3188 e 0,0067 para pressão e volume respectivamente, evidenciando a melhoria, pois se percebe que este se aproxima de zero, ou seja, que a variável tem um comportamento mais próximo ao valor alvo.

A última simulação deste segundo cenário, mostrado através das Figuras 25 e 26, geradas a partir da mesma falha devida ao vazamento, comparando as mesmas variáveis, porém agora, com a carta EWMA auxiliando na lei de controle do PID. O auxílio ao PID é regido pela equação (14), e como já mencionado a sintonização do PID foi realizada por abordagens experimentais de sintonia, e então

foi assumido um valor de 50 de ganho para a variável Volume, e um ganho de 100 para a variável Pressão.

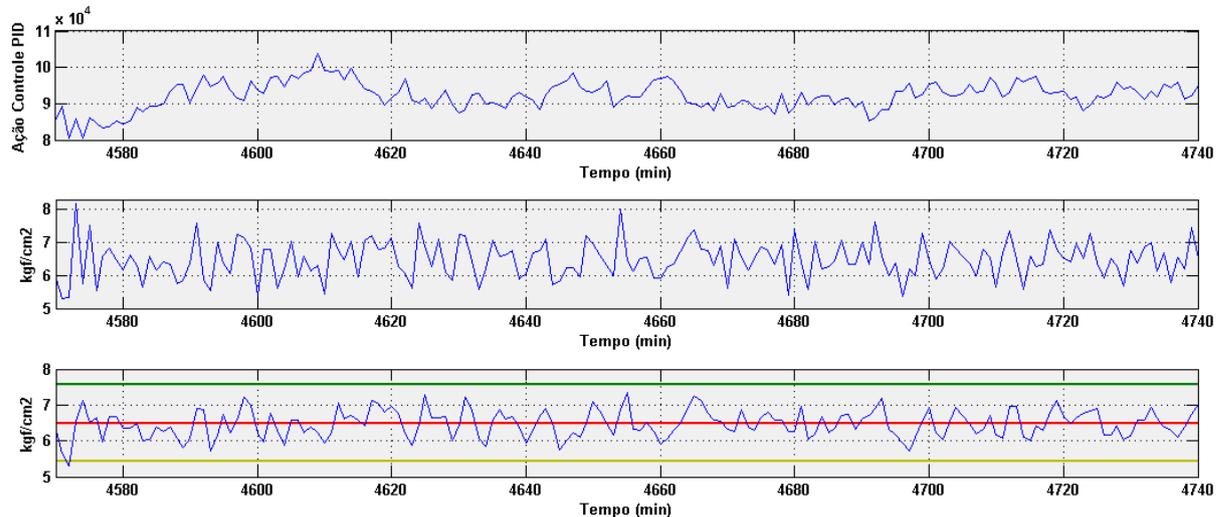


Figura 25 - Variável Pressão - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao PID - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.
 Fonte: Autoria Própria.

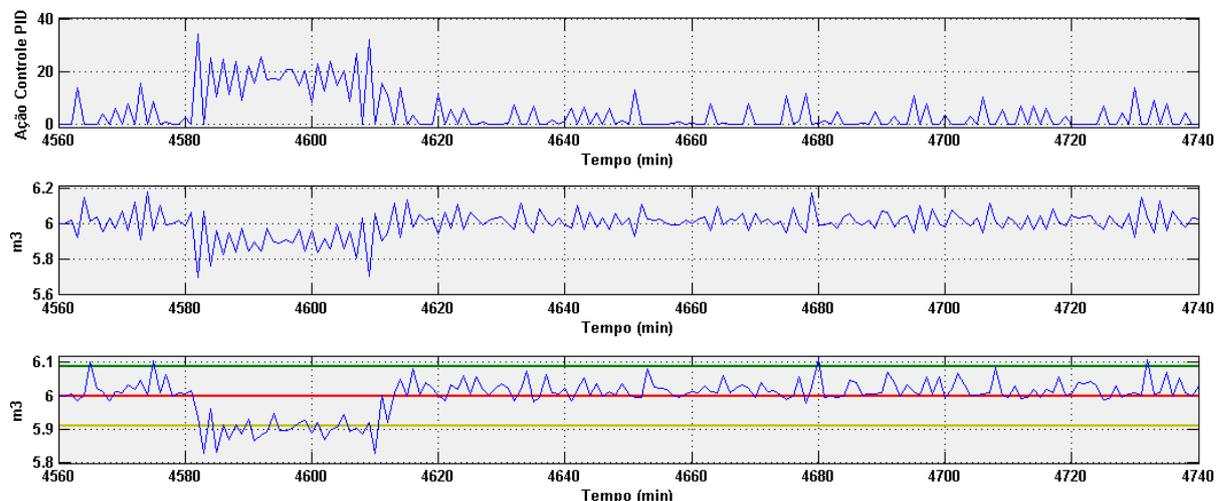


Figura 26- Variável Volume - Ação Controle PID e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao PID - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.
 Fonte: Autoria Própria.

E validando o ganho com este auxílio da carta EWMA ao controle PID, os valores de EQM's reduzem para 0,3153 e 0,0055 para a pressão e volume respectivamente.

O terceiro e último cenário é o de maior exigência e corresponde a operação de sábado da caldeira. As mesmas análises são feitas, assim, as Figuras 27 e 28 explanam o controle PID isolado comparado ao sistema sem controle para

as variáveis pressão e volume respectivamente.

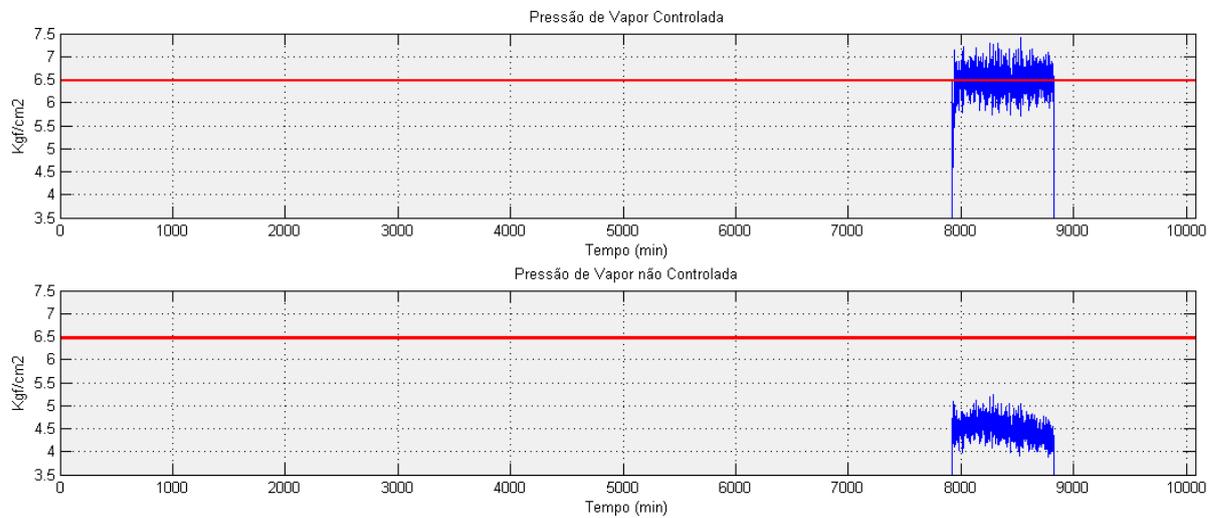


Figura 27 - Variável Pressão - Controlado x não Controlado - Período de maior exigência.
Fonte: Autoria Própria.

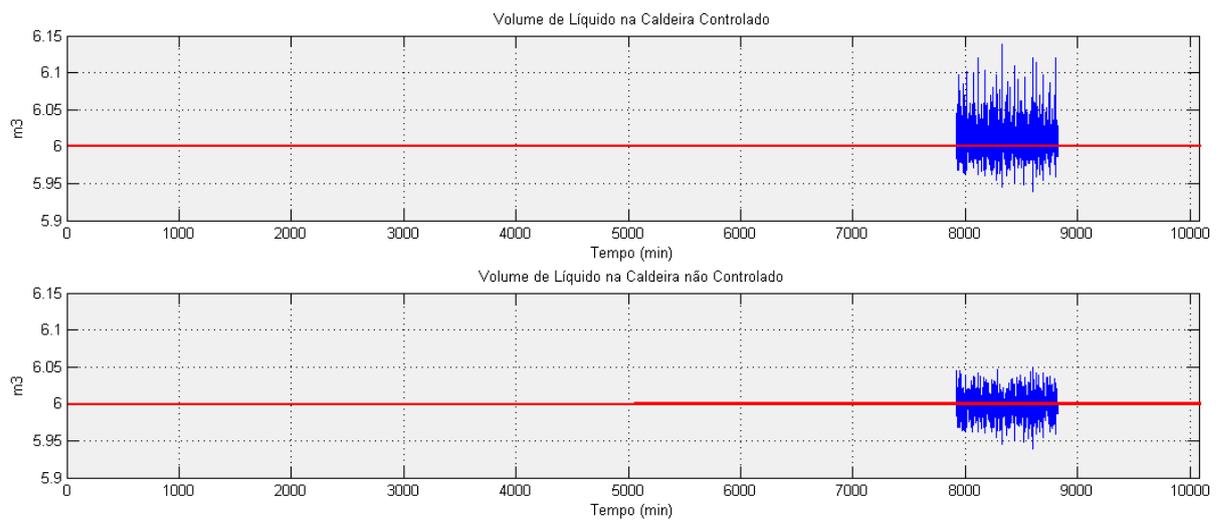


Figura 28 - Variável Volume - Controlado x não Controlado - Período de maior exigência.
Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 29 e 30 explanam a comparação entre o sistema controlado pelo PID e a integração PID e EWMA para as variáveis pressão e volume respectivamente.

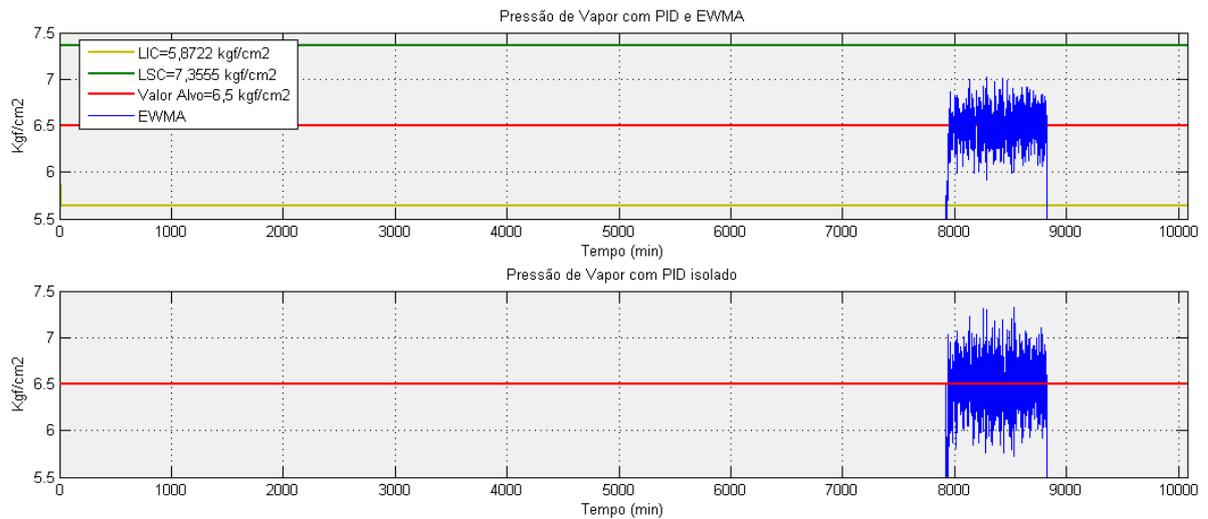


Figura 29 - Variável Pressão – PID isolado x integração PID e EWMA – Período de maior exigência.

Fonte: Autoria Própria.

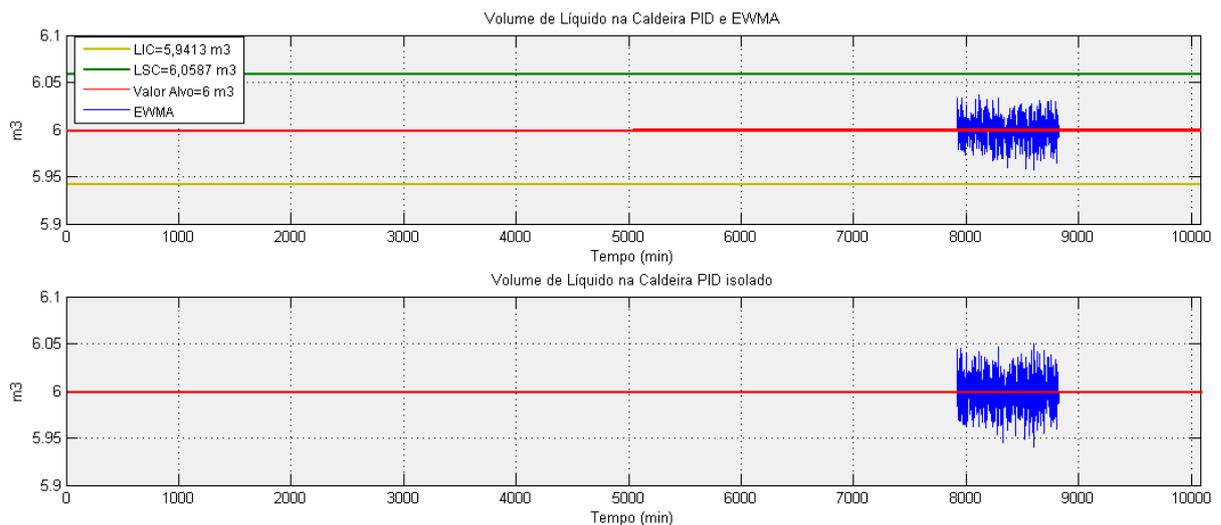


Figura 30 - Variável Volume – PID isolado x integração PID e EWMA – Período de maior exigência.

Fonte: Autoria Própria.

Considerando o caso onde a carta de controle EWMA não sinalize a causa especial, e haja um vazamento que faz com que o nível da caldeira caia aproximadamente $3,70 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, ou 3,7 L/min. A falha ocorre as 08:00 de sábado, que corresponde ao minuto 8100, sendo que o tempo decorrido entre os operadores da caldeira perceberem o vazamento e os mecânicos responsáveis resolverem o problemas é de 4 horas no minuto 8340, pois não havia o material necessário para o reparo em estoque no almoxarifado, sendo que levou 3 horas entre a chegada do material e o reparo, e 1 hora para percepção do vazamento dada também pela inspeção rotineira da estrutura da caldeira. As Figuras 31 e 32

explicam o comportamento das variáveis pressão e volume na caldeira respectivamente, comparando o comportamento da respectiva variável, com a integração do controle e a ação de controle do PID.

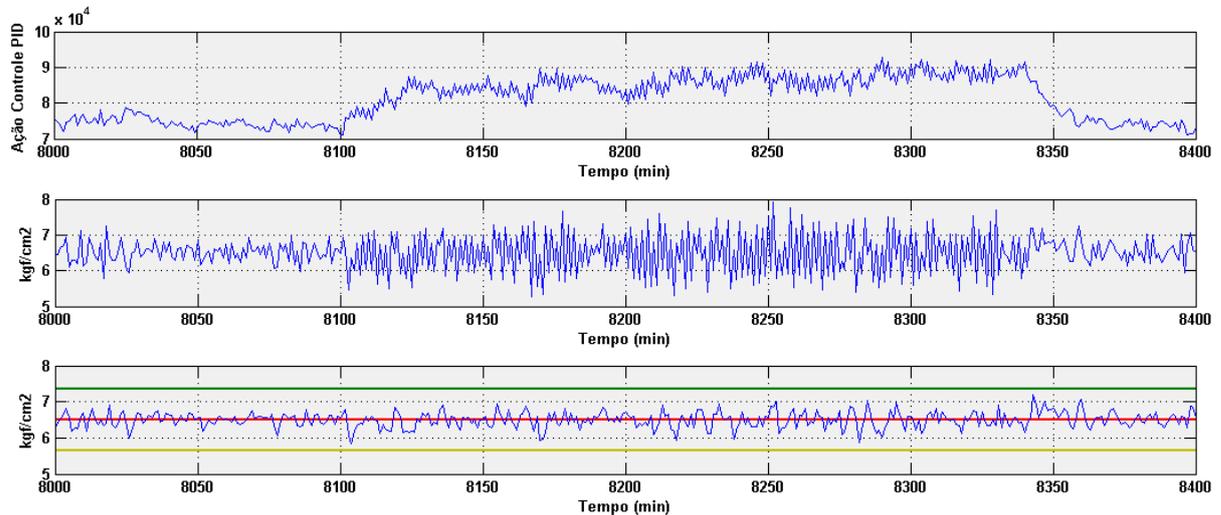


Figura 31 - Variável Pressão - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA não sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.
 Fonte: Autoria Própria.

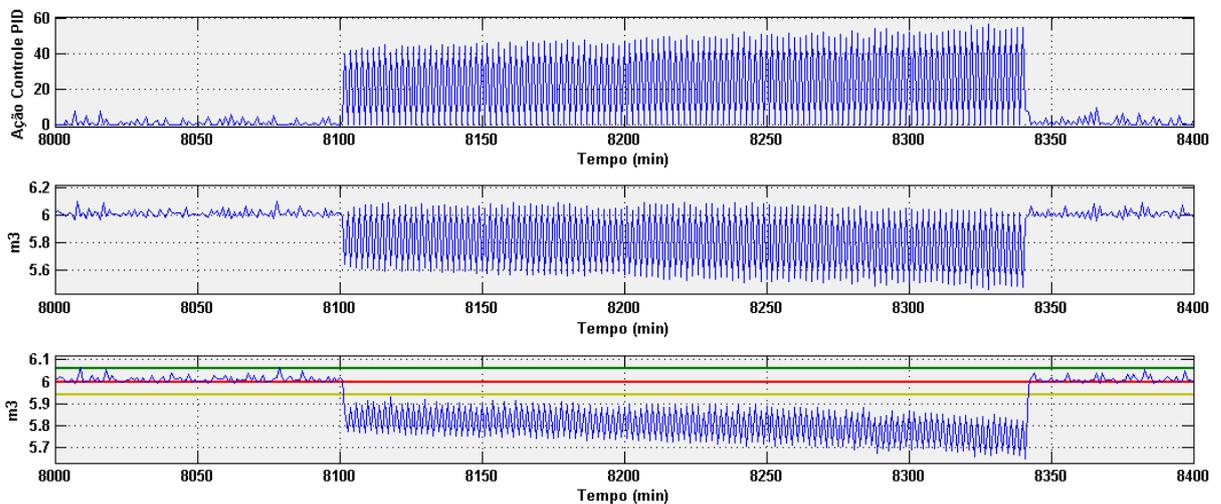


Figura 32 - Variável Volume - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA não sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.
 Fonte: Autoria Própria.

Os valores dos EQM's de pressão e volume sem a carta de controle EWMA sinalizar são respectivamente 0,199991325 e 0,028037119.

As Figuras 33 e 34 explicam a mesma situação, porém agora, a carta de controle sinaliza a falha aproximadamente no minuto 8101.5 (que corresponde ao momento em que a variável ultrapassa o LIC), sendo que havia apenas dois

mecânicos de plantão e estes estavam realizando um trabalho em altura e foram necessárias 2 horas até o término deste trabalho e o reparo da tubulação com vazamento (minuto 8221.5).

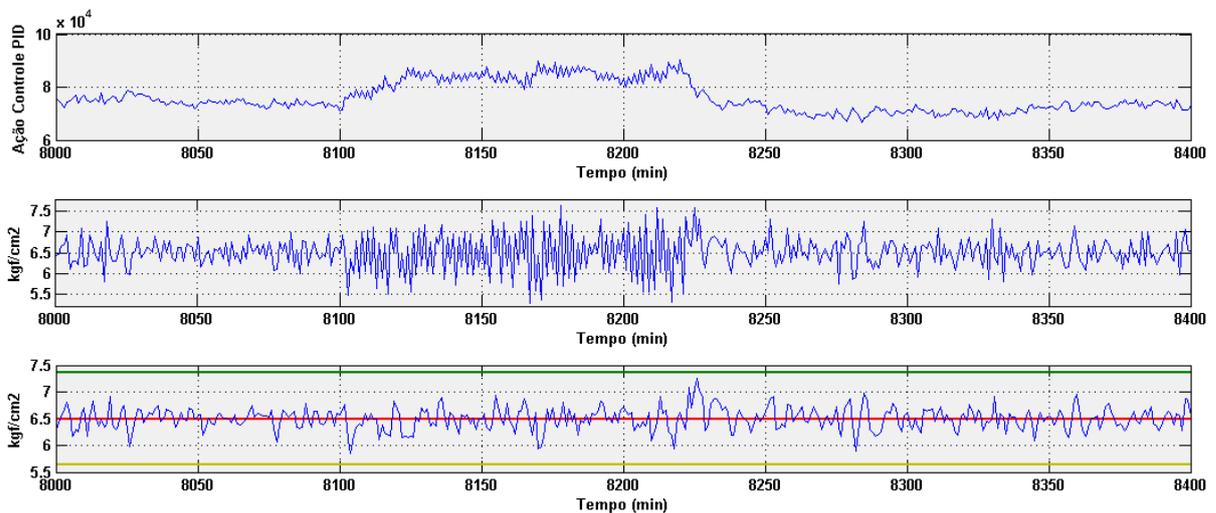


Figura 33 - Variável Pressão - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.

Fonte: Autoria Própria.

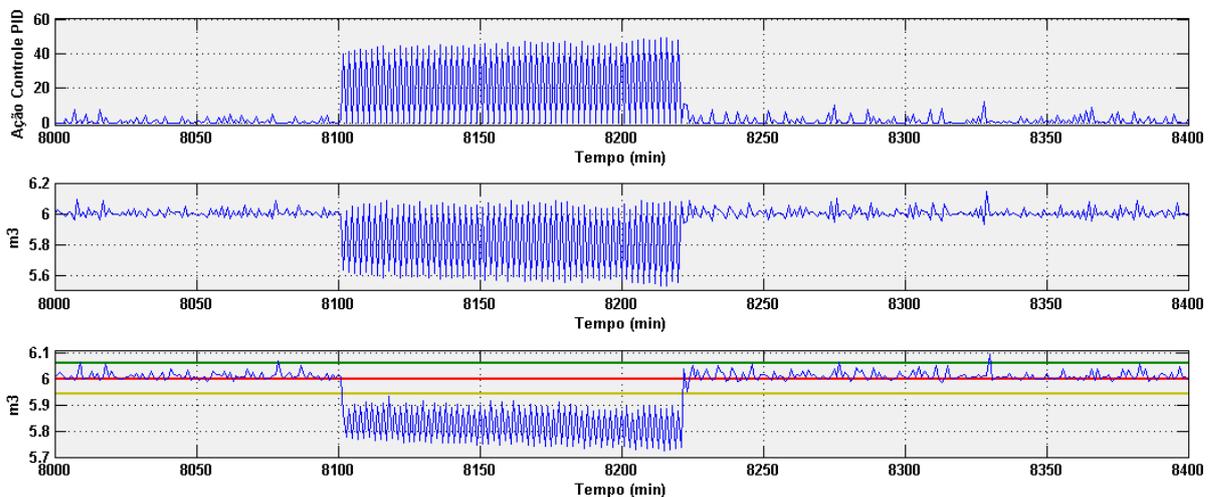


Figura 34 - Variável Volume - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA sinalizando - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.

Fonte: Autoria Própria.

Os valores dos EQM's de pressão e volume com a carta sinalizando, mas sem auxiliar são respectivamente 0,1516 e 0,0127.

A última simulação, mostrada através das Figuras 35 e 36, geradas a partir da mesma falha devida ao vazamento, comparando as mesmas variáveis, porém agora, com a carta EWMA auxiliando na lei de controle do PID. Foi assumido

um valor de 100 de ganho para a variável Volume, e um ganho de 1000 para a variável Pressão.

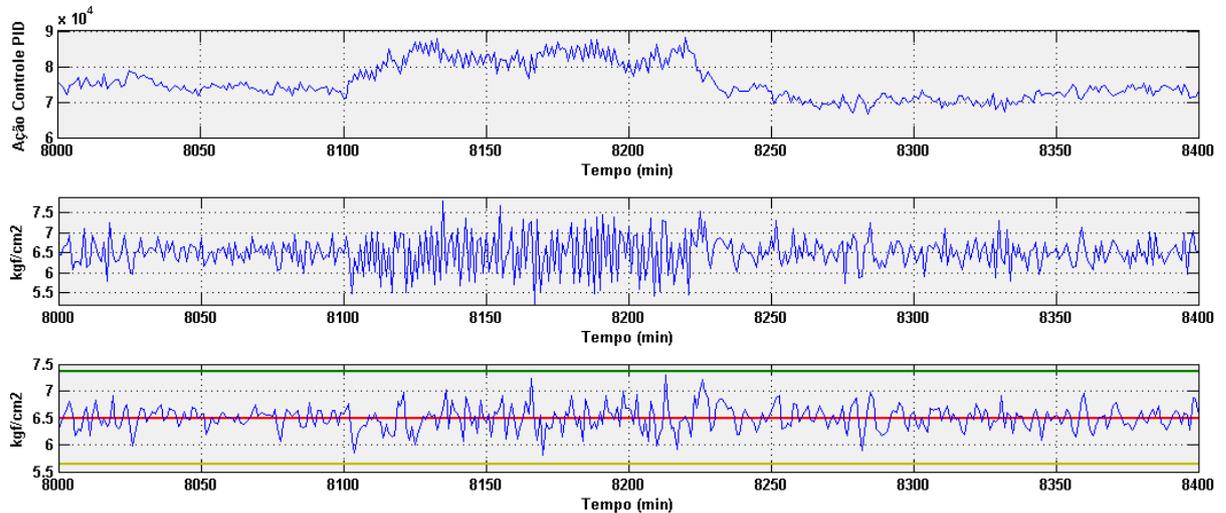


Figura 35 - Variável Pressão - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao PID - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.
Fonte: Autoria Própria.

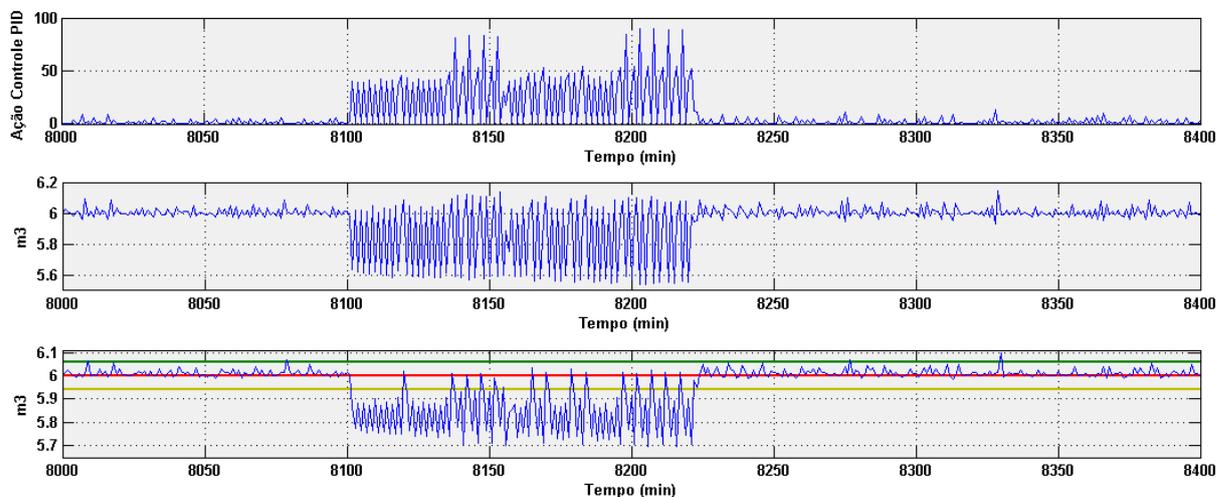


Figura 36 - Variável Volume - Ação do Controlador e Carta de Controle EWMA sinalizando com auxílio ao PID - Falha devido a um vazamento de água de alimentação da Caldeira.
Fonte: Autoria Própria.

O valor do EQM para a variável pressão é de 0,1550, enquanto para o volume é 0,0114. Porém, como já comentado, o EQM é um somatório dos erros enfatizando dados discrepantes, assim, mesmo tendo mais amostras próximas ao valor alvo, as magnitudes das variações são maiores, gerando valores de erros maiores, fazendo com que o EQM para a variável pressão para este caso seja maior do que o caso onde a carta de controle EWMA não auxilie o PID, porém no caso em

questão o foco de controle era o volume em função do vazamento.

A Tabela 3 agrupa os valores dos EQM's para cada cenário, facilitando a visualização dos benefícios agregados a cada tentativa de melhora do controle.

Tabela 3 - Valores dos EQM's para cada Cenário.

Variável	Cenário 1 – Menor Variabilidade		Cenário 2 – Variabilidade Intermediária		Cenário 3 – Maior Variabilidade	
	Pressão	Volume	Pressão	Volume	Pressão	Volume
PID Isolado	0,1334	0,0176	0,3890	0,0268	0,1999	0,0280
PID/EWMA	0,0779	0,0047	0,3188	0,0067	0,1516	0,0127
PID/EWMA auxiliando	0,0753	0,0045	0,3153	0,0055	0,1550	0,0114

Fonte: Aatoria Própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A operação de caldeiras utilizadas em frigoríficos, que utilizam lenha como fonte de calor, normalmente são controladas pelos operadores sem dispor de sistemas de controle automáticos. Para implementar este sistemas de controle a este tipo de caldeira, o processo necessitaria passar por ajustes, como um sistema automatizado de alimentação da fornalha.

Foram propostos alguns cenários típicos de operação da caldeira, não sendo abrangidos todos seus modos de operação, mas foi possível chegar a resultados satisfatórios, levando em consideração os resultados obtidos, e sendo possível perceber que o sistema de controle se comporta de forma adequada nos três cenários distintos propostos.

É possível observar que o sistema sem o controle PID pode se tornar falho e dispendioso, pois em alguns casos ele não consegue manter as variáveis nos alvos solicitados, e desta forma não são atingidas as condições de qualidade que são necessárias para que o produto final saia em boas condições de qualidade e, portanto, há a perda de matéria prima, e a necessidade de retrabalhos. Portanto, se mostra interessante a implementação de um controle retroativo, como o PID utilizado neste trabalho.

Não existem muitas modelagens de caldeiras para transporte de calor, portanto, houve uma dificuldade a mais para realizar a modelagem da planta, e a validação da mesma, pois foram necessários dados de caldeiras reais para tal. Existem níveis de modelagem, desde os mais complexos que abrangem quase todas as variáveis envolvidas até as mais simples, das quais desconsideram muitos fatores. Assim, a seleção do nível de aprofundamento que seria dado à modelagem esbarrou na dificuldade matemática e física de simular esta em *software*, porém, a abordagem selecionada foi considerada satisfatória pelos responsáveis e operadores da caldeira de onde foram levantados os dados, e ratificado através dos resultados de simulação obtidos comparados com os dados coletados.

O controle de Engenharia através do controlador PID foi aplicado de forma satisfatória, pois observando os valores dos EQM é possível dizer que as variáveis ficaram mais próximas aos valores alvo, comparado à mesma sem nenhum controle, principalmente na ocorrência de falhas.

Outro ponto observado que obteve êxito em seus resultados foi o de utilizar a integração entre os dois métodos de controle. É possível observar que o sistema trabalhando com o controlador PID isolado não consegue corrigir algumas formas de falhas que são passíveis de ocorrer, e desta forma, o sistema sai de controle e podem ocasionar danos, tanto ao produto, como no exemplo dado em que quando há falta de água na caldeira a vazão de vapor é reduzida, tanto na operação, que com esse volume baixo de água, a pressão do sistema se eleva, podendo gerar riscos de explosão, caso o problema não seja resolvido.

No estudo é possível observar uma melhoria no processo quando, além de sinalizar a falha, a carta EWMA auxilia na lei de controle do PID. A variável controlada volume se mantém mais pontos dentro da faixa de controle das cartas quando a lei de controle do PID é auxiliada pela carta EWMA e desta forma, é mantido um maior volume de água dentro da caldeira na ocorrência da falha simulada.

Portanto, foi comprovada que a integração proporciona um controle mais robusto para o sistema proposto neste trabalho, pois se mostrou na prática um controle efetivo em tempo real através do PID, capaz de monitorar, sinalizar e até mesmo auxiliar o controle PID quando é percebida uma causa especial, do qual o controle PID isolado não conseguiria manter o sistema sob controle.

7 TRABALHOS FUTUROS

Como citado anteriormente, a planta deveria sofrer alterações para a implementação do controle, portanto, propor outra planta da qual seja mais prática a aplicação poderia vir a ser interessante, pensando em implementar o sistema em uma operação real.

Além disto, existem várias combinações possíveis entre os dois métodos de controle, sendo que podem ser utilizados diferentes métodos de controle estatístico e métodos de controle retroativo, e neste trabalho não foram estudadas quais combinações trariam melhores resultados.

A integração proposta, com a carta EWMA auxiliando na lei de controle do PID, foi realizada com uma ação proporcional somada ao equacionamento do PID, sendo que não houve um estudo abrangendo mais possibilidades, portanto, estudar outras formas de auxílio da carta EWMA na lei de controle do PID e avaliar qual traria melhor resultado viria a agregar a proposta.

REFERÊNCIAS

- Araújo, F. M. (Fevereiro de 2007). *Sistemas de Controle*. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.
- Bega, E. A. (2003). *Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras* (3ª ed.). Rio de Janeiro: Interciência.
- Botelho, M. H., & Bifano, M. H. (2011). *Operação de Caldeiras - Gerenciamento, Controle e Manutenção*. São Paulo: Blucher.
- Box, G. E., Luceño, A., & Paniagua-Quiñones, M. d. (2009). *Statistical Control by Monitoring and Adjustment*. New Jersey: Wiley.
- Campos, M. M., & Teixeira, H. C. (2010). *Controles Típicos de equipamentos e processos industriais* (2 ed.). São Paulo: Blucher.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2009). *Sistemas de Controle Modernos*. Rio de Janeiro: LTC.
- Foelkel, C. (2010). *Pergunte ao Euca Expert*. Acesso em 18 de Março de 2014, disponível em Eucalyptus Online Book & Newsletter: <http://www.celso-foelkel.com.br/>
- Garcia, C. (2005). *Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos*. São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo.
- Lopes, L. R. (2013). Gráfico de controle estatístico de qualidade para indicador estratégico da secretaria da fazenda do governo do Piauí. *Estágio Supervisionado em Estatística 2*. Brasília, DF, Brasil: Universidade de Brasília.
- Luyben, W. L. (1996). *Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers* (2nd ed.). McGraw-Hill International Editions.
- Mendoza, M. (2008). *Gerência: Qualidade e Testes*. Acesso em 20 de Novembro de 2013, disponível em Linha de Código: <http://www.linhadecodigo.com.br/artigo/1988/extraindo-metricas-em-projetos-de-tecnologia-de-informacao.aspx>
- Montgomery, D. C. (2004). *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade* (4.ed. ed.). Rio de Janeiro: LTC.

Montgomery, D. C., Keats, J. B., Runger, G. C., & Messina, W. S. (Abril de 1994). Integrating Statistical Process Control and Engineering Process Control. *Journal of Quality Technology* .

National Instruments Corporation. (13 de Dezembro de 2011). *Explicando a Teoria PID*. Acesso em 13 de Dezembro de 2013, disponível em National Instruments: <http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>

Nise, N. S. (2002). *Engenharia de Sistemas de Controle* (3 ed.). Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.

Ogata, K. (2003). *Engenharia de Controle Moderno* (3 ed.). São Paulo: Perason Prentice Hall.

Ribeiro, J. L., & Caten, C. S. (2012). Série monográfica Qualidade . *Controle Estatístico do Processo* . Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil: FEEng.

Seubert, C. (28 de Agosto de 2014). *Definition of a Mean Square Error*. Acesso em 1 de Setembro de 2014, disponível em eHow Brasil: http://www.ehow.com/facts_6887166_definition-mean-square-error.html

Shao, Y. E. (1998). Integrated Application of the cumulative score control chart and engineering process control. *Statistica Sinica* 8 , 239-252.

Soares, P. M. (1996). Discretização de Controladores Contínuos. *Dissertação*, 115. Porto: DEEC/FEUP.

Trentin, M. G. (2010). Monitoramento e Controle Estatístico integrado ao Controle de Engenharia de Processo. *Tese*, 216. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.