

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO CRUZ CAMPOS

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUTENÇÃO
INTELIGENTE**

Porto Alegre

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Carlos Eduardo Pereira

Porto Alegre
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO CRUZ CAMPOS

APLICAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUTENÇÃO INTELIGENTE

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Universidade de Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira, UFRGS

Doutor pela Universidade de Stuttgart – Stuttgart, Alemanha

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr., UFRGS

Doutor pela Université Paul Sabatier – Toulouse, França

Eng. Nelson Yang, Gerdau Riograndense Aços Longos

Engenheiro Eletricista pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, Junho de 2009.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, irmão e cunhada, por terem me proporcionado todo o apoio necessário durante a realização deste trabalho e por terem sido compreensivos em momentos em que não pude atendê-los.

Agradeço ao Eng. Nelson Yang por todas suas contribuições e orientações no trabalho e pela sugestão da aplicação do trabalho no sistema da calha de frenagem.

Agradeço a todos os colegas da Gerdau Riograndense, especialmente a Carlo Graf Ruecker, Vanderlei da Rosa Raupp, Matias Schultz Azambuja, Daniel Rocha Steffens, Fábio Januário de Souza e Vinícius Dalben, pelo apoio e contribuições que fizeram.

Agradeço ao gerente da Manutenção da Gerdau Riograndense, Paulo Fernando Berger, por ter me proporcionado a oportunidade de realizar o Projeto de Diplomação dentro da empresa.

Agradeço ao meu orientador Prof. Carlos Eduardo Pereira pela proposta de trabalho interessante em área relacionada ao meu estágio e pelos recursos fornecidos.

Agradeço a Luiz Fernando Gonçalves pelas orientações referentes ao Watchdog Agent.

Agradeço a Janice, secretária do GCAR, por me ajudar na entrega de relatórios e outros documentos.

Agradeço a todos os amigos que, de alguma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho e amenizaram as dificuldades que apareceram ao longo do caminho.

Finalmente, agradeço a Deus, pois ele é quem me deu força, sabedoria, motivação e capacidade para realizar este trabalho. A ele dedico o mesmo.

RESUMO

A Manutenção não somente desempenha um papel fundamental na indústria, mas também tem uma participação grande nos custos gerados, devido ao tempo fora de produção para a realização de intervenções. Com a evolução das tecnologias, a Manutenção também tem agregado novos conceitos com o objetivo de transferir o foco de falhar e corrigir para prever e prevenir. Isso é possível porque a falha é antecedida por um processo de degradação que pode ser acompanhado a partir do monitoramento de parâmetros-chave do processo ou sistema. É nessa visão que se baseia a Manutenção Inteligente, integrando técnicas de monitoramento, predição de falhas e diagnose da degradação de maneira automática. Nesse trabalho estuda-se a aplicação da Manutenção Inteligente com o uso do Watchdog Agent™, ferramenta desenvolvida pelo IMS Center, em um sistema crítico de uma usina siderúrgica do Grupo Gerdau, conhecido como Calha de Frenagem. Introduce-se o sistema da Calha de Frenagem, o Watchdog Agent e as técnicas por ele utilizadas, e realiza-se uma análise das alternativas para se determinar a solução de Manutenção Inteligente mais apropriada ao sistema em questão. Além disso, algumas ferramentas foram desenvolvidas e implementadas com o objetivo de preparar um cenário adequado ao Sistema de Manutenção Inteligente. Incluem-se nessas ferramentas um software de geração de dados históricos e um software de estratificação de dados estatísticos relevantes. O software de geração de dados históricos foi desenvolvido como uma adaptação do sistema supervisor vigente, a partir da investigação do protocolo de comunicação utilizado.

Palavras-chaves: Manutenção. Manutenção Inteligente. Watchdog Agent™. Calha de Frenagem. Sistema supervisor. Comunicação de dados.

ABSTRACT

Maintenance has an essential role in industry, but it also has a negative effect in generating costs, due to the down-time required to repair systems. With the evolution of technologies, Maintenance has been including new concepts in order to shift the focus from fail and fix to predict and prevent. This is possible because the failure is preceded by a degradation process which can be followed through monitoring key parameters of the process or system. Intelligent Maintenance is based on this vision, integrating automation with techniques of monitoring, failure prediction and degradation of equipment diagnosis. This work studies the application of Intelligent Maintenance by using the Watchdog AgentTM, a tool developed by the IMS Center, on a critical system of a steel plant of Grupo Gerdau, known as the Sliding Wall (Calha de Frenagem, in Portuguese). The Sliding Wall System, the Watchdog Agent and its techniques are introduced, and an analysis of the alternatives to determine the most appropriate solution of Intelligent Maintenance for the system is realized. Furthermore, some tools were developed and implemented in order to prepare a scenario for the Intelligent Maintenance System. Among these tools is a software for generating historical data and another software for stratification of the relevant statistical data. The software for generating historical data was developed as an adaptation of the existing supervisory system, through investigating the communication protocol utilized.

Keywords: Maintenance. Intelligent Maintenance. Watchdog AgentTM. Sliding Wall. Supervisory system. Data communication.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	CONTEXTO DO PROJETO	13
2.1	Explorando Conceitos de Manutenção	13
2.1.1	Manutenção Corretiva e Manutenção de Emergência	14
2.1.2	Manutenção Preventiva	15
2.1.3	Manutenção Preditiva	16
2.1.4	Manutenção Proativa	18
2.1.5	Manutenção Inteligente	18
2.1.6	Manutenção Autônoma	19
2.1.7	Manutenção Centrada em Confiabilidade	19
2.1.8	Síntese comparativa dos conceitos de Manutenção	21
2.2	A Calha de Frenagem	22
2.2.1	Função da Calha de Frenagem	23
2.2.2	Descrição do funcionamento	25
2.2.3	Controle de posicionamento da Calha de Frenagem	28
2.2.4	Software de monitoramento dos movimentos da calha de frenagem	32
2.2.5	Principais falhas	35
2.2.6	Causas diagnosticadas	38
2.2.7	Soluções em caso de falhas na calha de frenagem	40
3	ANÁLISE DE ALTERNATIVAS	42
3.1	Watchdog Agent	43
3.2	DST (Decision Support Tool)	44
3.3	Funcionalidades do Watchdog Agent	45
3.3.1	Ferramentas de processamento de sinais e extração de características	46
3.3.2	Ferramentas de análise do desempenho	48
3.3.3	Ferramenta de predição do desempenho	49
3.3.4	Ferramenta de diagnóstico do desempenho	50
3.4	Monitoramento online	52
3.5	Monitoramento consistente	52
3.6	Histórico de falhas disponível	53
3.7	Seleção da solução apropriada	61
4	MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS	64
4.1	Montagem do sistema de monitoração da comunicação	65
4.2	Interpretação do protocolo de comunicação	67
4.3	Desenvolvimento de software de leitura e tratamento dos dados	68
4.4	Propostas para o futuro	71
5	RESULTADOS ALCANÇADOS	73
6	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS	75
	ANEXO I – INVESTIGAÇÃO DOS DADOS DE COMUNICAÇÃO	77
	ANEXO II – CONCLUSÕES SOBRE O PROTOCOLO DO BODAC	87

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Evolução temporal de um certo parâmetro monitorado.....	17
Figura 2 Curva da banheira	20
Figura 3 Síntese comparativa dos conceitos de Manutenção	21
Figura 4 A Calha de Frenagem e o Leito de Resfriamento.	23
Figura 5 Barra vinda da área de corte deslizando na parede da calha de frenagem.....	25
Figura 6 Coleta e frenagem da barra (A) e chegada da barra (B).....	26
Figura 7 Transferência da barra (A) para o leito de resfriamento.....	27
Figura 8 Transferência da barra (A) para o grelhado e descarga da barra (B).....	28
Figura 9 Cartão de controle de posicionamento da calha de frenagem	29
Figura 10 Válvula de controle proporcional (marcada em vermelho)	29
Figura 11 Transdutor magneto-estrutivo (régua)	30
Figura 12 Esquema do funcionamento do cartão da Rexroth.....	30
Figura 13 Tela inicial do software Bodac	32
Figura 14 Parâmetros do software que podem ser modificados	33
Figura 15 Sinais de interesse durante o ciclo da calha de frenagem.....	34
Figura 16 Transferência da cantoneira em funcionamento normal da calha.....	36
Figura 17 Funcionamento anormal da calha quando transfere uma cantoneira.....	37
Figura 18 Watchdog Agent, da IMS Center	43
Figura 19 Módulos do Watchdog Agent.....	46
Figura 20 Evolução da duração da descida.....	57
Figura 21 Evolução do desvio padrão das durações da subida (200 amostras).....	57
Figura 22 Evolução da duração do ciclo.....	58
Figura 23 Evolução da duração da subida	58
Figura 24 Evolução do erro de posição ao descer.....	59
Figura 25 Evolução do erro de posição ao subir.....	59
Figura 26 Evolução da média dos erros de posição ao descer (200 amostras).....	60
Figura 27 Evolução do desvio padrão dos erros de posição ao descer (200 amostras)	60
Figura 28 Interface da ferramenta de seleção dos métodos do Watchdog Agent	62
Figura 29 Esquema de ligação dos elementos de comunicação	66
Figura 30 Bancada de simulação para o cartão HACD	67
Figura 31 Interface para investigação do protocolo de comunicação	68
Figura 32 Esquema do funcionamento do MyBODAC.....	70
Figura 33 Formulário de aquisição dos dados de comunicação.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Histórico de falhas da calha de frenagem, Março 2008 (parcial).....	54
Tabela 2 Mensagem do BODAC fora do Motion Data	87
Tabela 3 Resposta do HACD fora do Motion Data	87
Tabela 4 Mensagem 1 do BODAC em Motion Data.....	88
Tabela 5 Mensagem 2 do BODAC em Motion Data.....	88
Tabela 6 Mensagem 3 do BODAC em Motion Data.....	88
Tabela 7 Mensagem 4 do BODAC em Motion Data.....	89
Tabela 8 Mensagem 1 do BODAC em Motion Data.....	89
Tabela 9 Mensagem 1.1 do HACD em Motion Data	90
Tabela 10 Mensagem 1.1 do HACD em Motion Data	90
Tabela 11 Mensagem 1.2 do HACD em Motion Data	90
Tabela 12 Mensagem 1.2 do HACD em Motion Data	90
Tabela 13 Mensagem 1.3 do HACD em Motion Data	91
Tabela 14 Mensagem 1.3 do HACD em Motion Data	91
Tabela 15 Mensagem 1.3 do HACD em Motion Data	91
Tabela 16 Mensagem 2 do BODAC em Motion Data	92
Tabela 17 Mensagem 2.1 do HACD em Motion Data	92
Tabela 18 Local das DO no byte enviado	92
Tabela 19 Mensagem 2.2 do HACD em Motion Data	92
Tabela 20 Mensagem 3 do BODAC em Motion Data	93
Tabela 21 Mensagem 3 do HACD em Motion Data	93
Tabela 22 Mensagem 3 do HACD em Motion Data	94
Tabela 23 Mensagem 3 do HACD em Motion Data	94
Tabela 24 Mensagem 3 do HACD em Motion Data	94
Tabela 25 Mensagem 3 do HACD em Motion Data	95
Tabela 26 Mensagem 3.1 do HACD em Motion Data	95
Tabela 27 Mensagem 3.1 do HACD em Motion Data	95
Tabela 28 Mensagem 3.2 do HACD em Motion Data	96
Tabela 29 Mensagem 4 do BODAC em Motion Data	96
Tabela 30 Mensagem 4 do HACD em Motion Data	97

LISTA DE ABREVIATURAS

ABB: Asea Brown Boveri

AR: Auto-regressão

ARMA: Autoregressive moving average

BODAC: Bosch Rexroth Operator Interface for Digital Axis Controllers

CMAC: Cerebellar model articulation controller

CPU: Central Processing Unit

CV: Confidence value

DST: Decision support tool

FFT: Fast Fourier Transform

HACD: Hydraulic Axis Controller Digital

IMS: Intelligent Maintenance Systems

LTI: Linear time-invariant

OBE: On-board electronics

PID: Proporcional-integral-derivativo

PLC: Programmable logic controller

PLT: "Plot"

VBA: Visual Basic for Applications

WA: Watchdog AgentTM

1 INTRODUÇÃO

O mundo de hoje tem se tornado cada vez mais centrado em um objetivo generalizado de lucro máximo e custo mínimo. Na indústria, de igual forma, são exploradas técnicas que possibilitem uma maior produção com as menores despesas possíveis. Por essa razão, os produtores de hoje tem buscado resolver um problema que representa uma grande parcela das perdas em uma fábrica: as horas de máquina parada.

As atividades de manutenção desempenham um papel fundamental na indústria desde o seu surgimento. Máquinas que funcionam eternamente não existem, pois todos os equipamentos que possamos imaginar, desde um rolamento que permite a rotação de um eixo, até um CLP que controla o funcionamento de uma máquina inteira, tudo tem uma vida útil e um dia deixa de funcionar.

Até algumas décadas atrás, a manutenção conhecia um só conceito: máquinas deviam produzir enquanto pudessem, sem nenhum tipo de intervenção. Quando não pudessem mais cumprir sua função, uma correção deveria ser aplicada para trazer de volta o funcionamento normal.

O grande problema em questão é que as paradas de máquina quando ocorrem falhas podem ser danosas e de difícil solução. Além das horas de produção perdidas com os reparos, certas falhas causam danos graves em outras peças além daquela em que se originou a falha. Algumas vezes, falhas representam até mesmo um perigo à vida humana.

Com o objetivo de reduzir esse problema e os custos que ele acarreta, tem-se considerado um novo conceito de manutenção na qual o foco não está na falha, mas no controle da degradação que antecede a falha em equipamentos. Conhecido como Manutenção Inteligente, esse novo conceito visa aplicar técnicas e utilizar equipamentos de última geração para monitorar máquinas, prever falhas e diagnosticar o tipo de degradação antes mesmo

delas ocorrerem. Dessa forma, evitam-se danos materiais e humanos e horas de produção perdidas em excesso.

Neste trabalho, estuda-se detalhadamente o conceito de Manutenção Inteligente e como se pode usufruir os seus recursos da melhor maneira possível em um sistema específico de uma indústria siderúrgica.

2 CONTEXTO DO PROJETO

Nada mais conveniente do que começar um estudo sobre Manutenção Inteligente definindo os diversos conceitos de Manutenção. Além de situar leitores sem conhecimentos prévios no assunto, procura-se estabelecer, na medida do possível, as fronteiras de cada um dos tipos de Manutenção que existem atualmente.

Mais adiante, se exporá o sistema onde será realizado um estudo de aplicação da Manutenção Inteligente: a calha de frenagem. O estudo está sendo desenvolvido junto do Grupo Gerdau, na unidade Riograndense localizada em Sapucaia do Sul, RS.

2.1 EXPLORANDO CONCEITOS DE MANUTENÇÃO

Difícil tarefa é distinguir cada um dos conceitos de manutenção. Há consideráveis divergências entre as definições de diferentes autores e, por vezes, existem mais de uma denominação para uma única definição. Isso faz com que as estratégias de Manutenção se confundam em um aspecto ou outro.

No entanto, é possível estabelecer uma comparação e apontar diversas semelhanças que nos permitem entender os fundamentos da Manutenção. Aqui os conceitos são expostos um a um e enquadrados em definições mais genéricas, e as diferenças são apontadas quando existirem. Nessa parte, toma-se como referência principal a obra *Manutenção Centrada em Confiabilidade* (MOUBRAY, 2003). Além dessa obra, consultaram-se diversas outras fontes, como sites de empresas, enciclopédias livres, etc. Essas fontes não foram referenciadas uma a uma ao longo do texto devido a que as definições aqui expostas são uma compilação de diversos textos. Tal compilação foi feita com o objetivo de se destacar aspectos comparativos entre os diferentes conceitos da manutenção.

Os tipos de Manutenção que serão tratados são:

Manutenção de Emergência

Manutenção Corretiva

Manutenção Preventiva

Manutenção Preditiva

Manutenção Proativa

Manutenção Inteligente

Manutenção Autônoma

Manutenção Centrada em Confiabilidade

2.1.1 Manutenção Corretiva e Manutenção de Emergência

Esses são os dois conceitos mais antigos da manutenção. Ambos referem-se ao tratamento do problema somente quando este ocorre, impedindo o funcionamento normal de uma máquina ou linha de produção. A necessidade das intervenções ocorre de maneira aleatória, e o tempo de execução depende das condições do momento.

Embora sejam muito semelhantes, podemos destacar a diferença que existe entre elas pelo fato que a Manutenção de Emergência é ainda mais primitiva em sua filosofia. Segundo João Roberto Caruso Taiti (TAITI, 2009), o seu objetivo principal é trazer o ritmo de produção de volta à normalidade, o mais depressa possível. As causas que levaram à falha ocorrida não são estudadas com cuidado nesse momento e a linha de produção volta a funcionar, ainda que de maneira precária ou provisória.

Já a Manutenção Corretiva não visa somente à volta de uma operação normal da linha de produção, mas visa a evitar que o problema volte a ocorrer. Na proporção em que se conhecem as máquinas, essa técnica é preferida, pois ela evita perdas maiores, tanto materiais quanto humanas.

Tome-se como exemplo um rolamento que quebrou durante a operação de uma determinada máquina. No caso da Manutenção de Emergência, a ação a tomar seria

simplesmente trocar o rolamento por um novo. Já na Manutenção Corretiva, seria necessário analisar a causa da falha (desalinhamento, desbalanceamento, lubrificação precária, etc.) e agir sobre ela também. A segunda alternativa é muito mais confiável, pois evita que o dano volte a se repetir até mesmo de maneira pior: na segunda vez em que a falha ocorresse, uma engrenagem poderia quebrar ao mesmo tempo em que o rolamento, por exemplo.

As etapas necessárias no trabalho de Manutenção Corretiva são (AES, 2007):

1. Localizar o problema
2. Diagnosticar as causas
3. Definir mão-de-obra, ferramentas e procedimentos
4. Executar
5. Verificar
6. Registrar o trabalho

2.1.2 Manutenção Preventiva

Manutenção Preventiva é definida como o conjunto de práticas periódicas e programadas como lubrificação, limpeza, ajustes e substituição de peças e componentes, com o fim de evitar falhas inesperadas do sistema (IEEE, 1994).

A partir de estudos estatísticos, é possível determinar-se o tempo de vida médio de diversos componentes de equipamentos. Com isso, deve-se programar a substituição dos mesmos dentro de um período ótimo. Esse período é suficientemente curto para que poucas peças alcancem de fato a falha, e suficientemente longo para que a frequência de trocas não seja elevada a ponto de se tornar mais cara do que uma ação corretiva. Desta maneira, o período entre a realização de duas trocas é calculado de tal forma que os custos sejam mínimos.

As etapas necessárias no trabalho de Manutenção Preventiva são (AES, 2007):

1. Determinar os modos de falha e suas causas
2. Determinar os intervalos entre falhas
3. Definir ferramentas, mão-de-obra e procedimentos
4. Definir programa de intervenção
5. Executar
6. Verificar
7. Registrar o trabalho

A prática da Manutenção Preventiva tem uma eficiência bastante questionável. Baseando-se em estatísticas, componentes em bom estado são frequentemente substituídos, enquanto que os locais que deveriam realmente receber intervenção podem não ser tratados. Além disso, as estatísticas precisam ser extremamente confiáveis, o que nem sempre é o caso. As condições de operação de cada máquina mudam de local para local e também com o tempo. Utilizar estatísticas genéricas pode ser traiçoeiro e levar a resultados insatisfatórios de redução de custos.

Cabe também ressaltar que intervenções periódicas frequentes aumentam a chance de mudanças involuntárias na montagem, projeto e configuração de segurança do equipamento.

2.1.3 Manutenção Preditiva

Manutenção Preditiva é definida como o monitoramento e a análise das condições de uma máquina. O monitoramento pode ser feito em cima de um determinado parâmetro de operação da máquina (vibração, temperatura, contaminação, propagação acústica, etc.), desde que haja um sistema de aquisição de dados apropriado. O parâmetro monitorado deve estar diretamente relacionado com a eficiência da máquina ou processo, possibilitando o acompanhamento da evolução da degradação. Dessa forma, evita-se que a máquina pare ou

opere com um desempenho abaixo do tolerável. A figura abaixo mostra a evolução típica de um parâmetro monitorado.

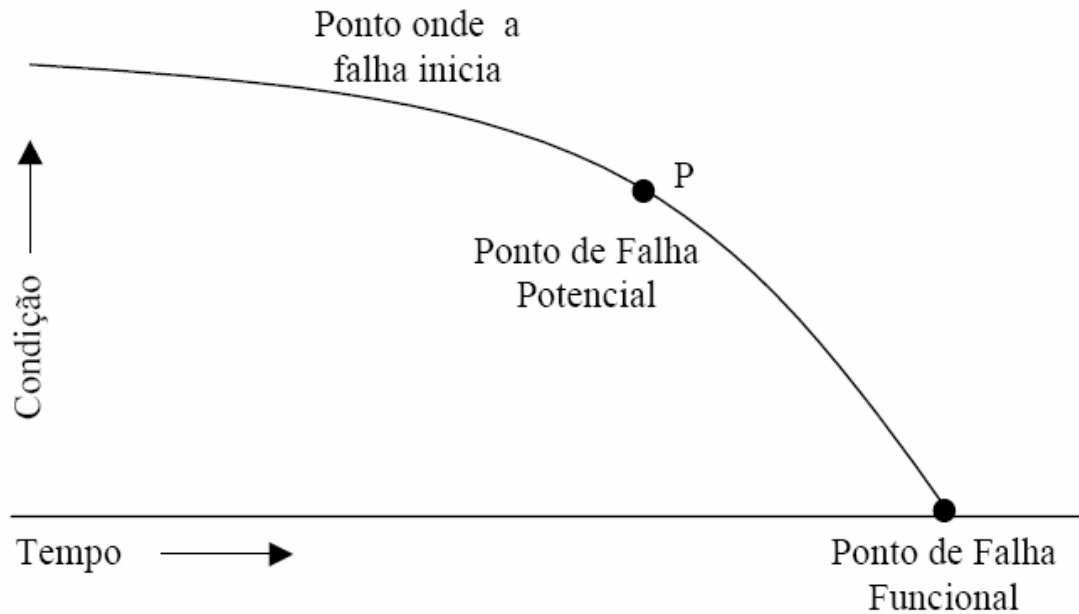


Figura 1 Evolução temporal de um certo parâmetro monitorado.

À medida que o parâmetro monitorado se aproxima de valores críticos, uma atenção maior é consagrada ao equipamento, ou seja, o intervalo entre as medidas do parâmetro diminui. Antes que o parâmetro alcance um valor inaceitável, programa-se a reparação ou substituição do componente cuja degradação foi diagnosticada. Dessa forma, maximiza-se a utilização da máquina evitando-se os danos das paradas inesperadas. Os diagnósticos são realizados a partir de técnicas que dependem do parâmetro monitorado.

As etapas necessárias no trabalho de Manutenção Preditiva são (AES, 2007):

1. Definir parâmetros de controle
2. Instrumentalizar
3. Treinar
4. Monitorar
5. Analisar

Manutenção Preditiva é chamada também de Manutenção Baseada na Condição (ou, do inglês, *Condition Based Maintenance*), ou até mesmo Manutenção Preventiva por Estado (em contraposição à Manutenção Preventiva por tempo, explanada no tópico anterior).

2.1.4 Manutenção Proativa

A Manutenção Proativa é uma evolução em relação à Preditiva e à Preventiva (DIAGNETICS, 2009). Isso se deve ao fato de que o monitoramento das condições da máquina se faz com o foco nas causas e não nos sintomas da degradação. Dessa maneira, a Manutenção Proativa visa agir de modo a evitar a própria degradação.

A Manutenção Proativa é assim definida por considerar a contaminação de óleos hidráulicos e lubrificantes como a principal causa que conduz à falha das máquinas. Assim, ao invés de se monitorar a vibração produzida por um rolamento (parâmetro que indica sintomas de degradação), faz-se uma análise da contaminação do lubrificante do mesmo (parâmetro que indica as causas da degradação).

Outra técnica de Manutenção Proativa é a realização de um alinhamento fino de eixos antes de se colocar a máquina em funcionamento. Aqui, de igual modo, a intervenção se faz de maneira a evitar a degradação.

No entanto, a Manutenção Proativa pode ser considerada, no caso da análise da contaminação de óleos, simplesmente como sendo uma Manutenção Preditiva que se utiliza de técnicas de análise da contaminação de lubrificantes. Isso é até mesmo mais coerente pelo fato que a análise da contaminação de lubrificantes pode ser mais eficiente para algumas aplicações, mas, para outras, há outras técnicas mais indicadas.

2.1.5 Manutenção Inteligente

Manutenção Inteligente é um conceito de manutenção assim chamado por utilizar as mais avançadas tecnologias de Automação nas atividades da manutenção (IMS CENTER,

2009). Na prática, Manutenção Inteligente pode ser enquadrada como Manutenção Preditiva, já que a estratégia é a mesma: monitorar as condições da máquina com o fim de evitar a falha.

A evolução que este conceito apresenta é o uso das mais modernas tecnologias de automação para fazer o trabalho da Manutenção Preditiva que resta além do monitoramento de um determinado parâmetro. Manutenção Inteligente envolve monitorar, alertar, diagnosticar, programar a intervenção e providenciar (ou solicitar) todos os recursos necessários à execução da tarefa pela equipe de manutenção. Tudo isto é feito por um sistema automático, que faz o diferencial deste conceito de Manutenção.

Mais adiante neste trabalho, serão abordados com detalhes os recursos e as características destes sistemas, visando estudar a viabilidade de sua aplicação em uma dada máquina.

2.1.6 Manutenção Autônoma

A Manutenção Autônoma, conhecida também como TPM (Total Productive Maintenance ou, em Português, Manutenção Produtiva Total), é a designação de tarefas simples e rotineiras da manutenção aos próprios operadores da máquina. Tais tarefas podem ser a lubrificação, limpeza, eliminação de vazamentos, etc., que não envolvem os conhecimentos técnicos da equipe de manutenção. Essa estratégia otimiza a solicitação dos trabalhadores e, por conseguinte, reduz custos.

No entanto, essa filosofia é questionável, pois fica em aberto a definição de quais tarefas um operador pode executar com segurança e sem os conhecimentos técnicos necessários.

2.1.7 Manutenção Centrada em Confiabilidade

Manutenção Centrada em Confiabilidade não se refere a uma política de manutenção em si, mas é uma disciplina que visa determinar a política de manutenção que deve ser

adotada pela empresa. A filosofia da MCC (ou RCM, do inglês, *Reliability Centered Maintenance*) não é manter as máquinas em operação ideal e sem falhas, mas realizar uma análise econômica que aponta a política de manutenção mais rentável para cada caso (MOUBRAY, 2000).

A MCC serve-se de análises estatísticas e probabilísticas, aplicando conceitos como Confiabilidade e Taxa de Falhas. Uma de suas principais características é a construção da Curva da Banheira, mostrada na figura a seguir.

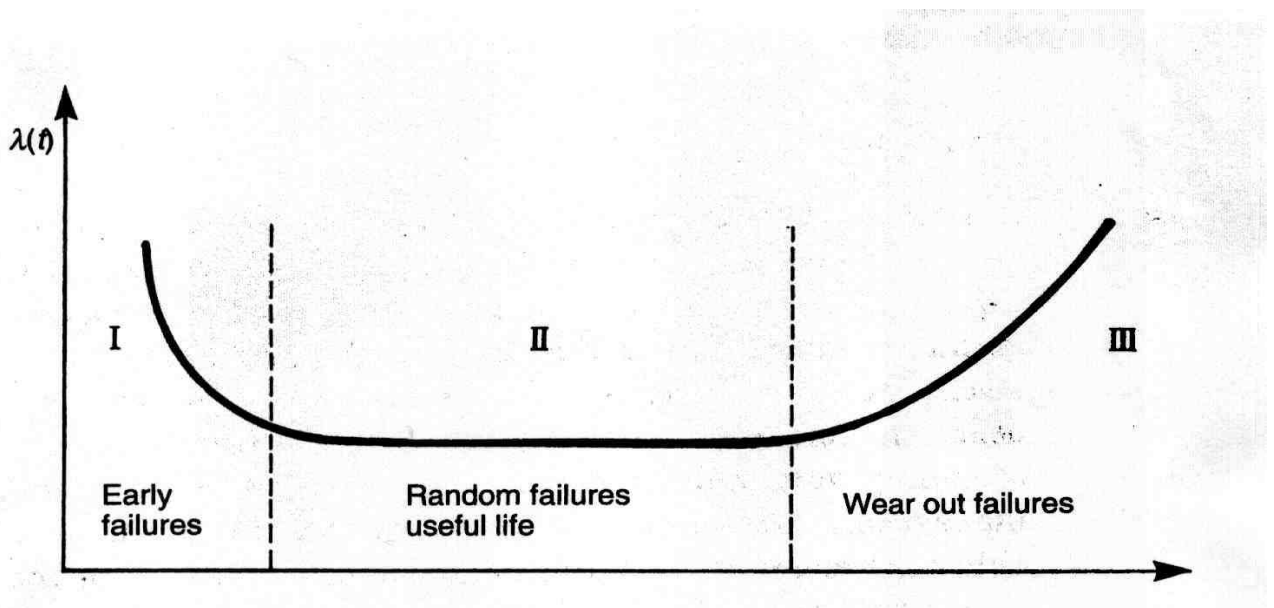


Figura 2 Curva da banheira

A Curva da Banheira representa os possíveis comportamentos de um equipamento ou componente com relação à evolução temporal da Taxa de Falha. Ela indica a probabilidade de que um item falhe em determinado momento de operação.

As etapas básicas da execução da MCC são (AES, 2007):

1. Definição dos requisitos operacionais
2. Análise funcional
3. Elaboração da Análise de Modos e Efeitos de Falhas
4. Aplicação do diagrama de decisões
5. Definição da política de manutenção

2.1.8 Síntese comparativa dos conceitos de Manutenção

O diagrama a seguir apresenta uma visualização dos conceitos de Manutenção. Aqui se destacam os aspectos evolução técnica, custos de implementação, proximidade conceitual e papel desempenhado dentro da manutenção.

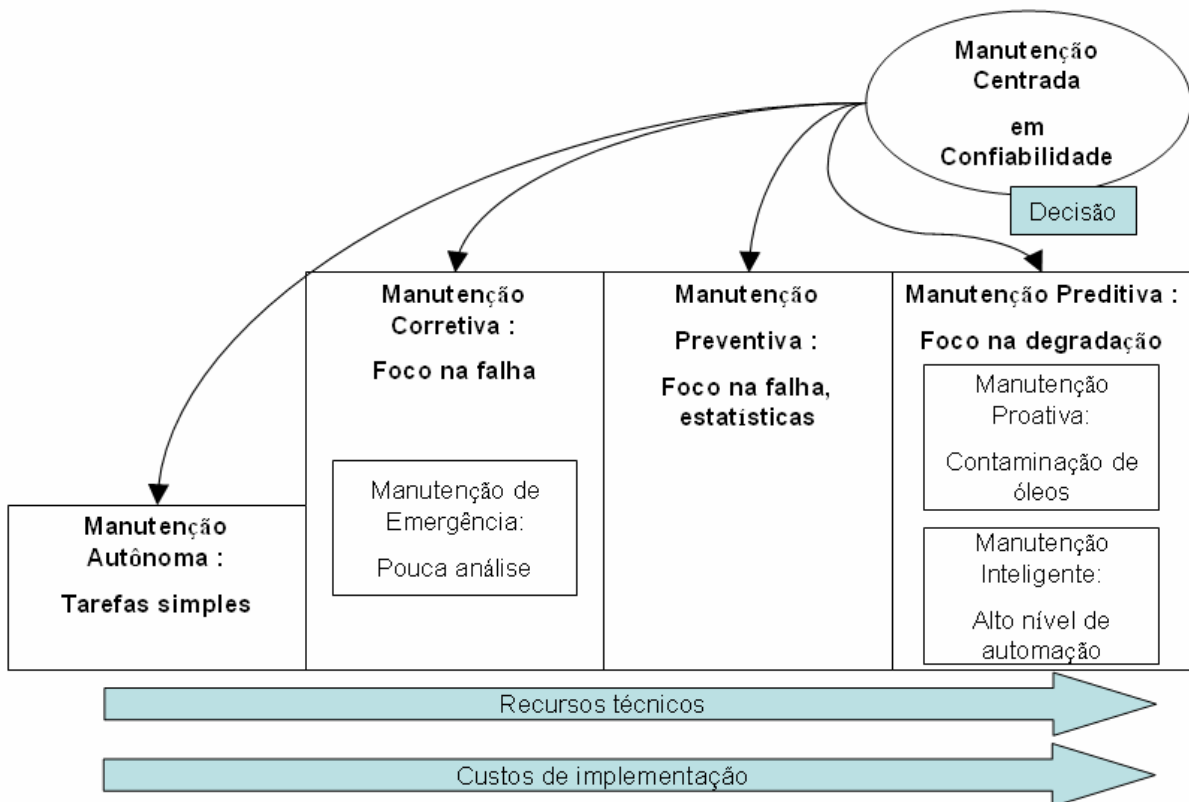


Figura 3 Síntese comparativa dos conceitos de Manutenção

No tópico a seguir, trata-se da aplicação do conceito Manutenção Inteligente em um caso específico: a calha de frenagem.

2.2 A CALHA DE FRENAGEM

A Calha de Frenagem é parte integrante de um sistema chamado Laminador. Em uma usina siderúrgica, existe uma área destinada à transformação do aço denominada Laminação. A Laminação é o processo de redução da seção do aço por meio de sua passagem entre dois cilindros girantes, conjunto conhecido como gaiola.

O Laminador em questão nesse estudo é um sistema que transforma tarugos de aço (barras de seção quadrada, geralmente em torno de 12cm X 12cm e 5m de comprimento) em diversos produtos acabados: barras redondas, quadradas, cantoneiras, perfis em U, perfis em I, vergalhões, etc.

O processo de laminação se dá com a passagem do tarugo a uma temperatura elevada (entre 900 e 1200 °C) em uma série de gaiolas que reduzem a seção do aço durante uma seqüência de passes e lhe conferem a forma desejada. Os cilindros tracionam a barra de aço devido ao atrito. Diversas variáveis como a potência dos motores, o coeficiente de atrito, a resistência mecânica dos cilindros e a seção desejada determinam o número de passes necessários.

Após o processo de transformação, o produto acabado é transferido para uma zona de resfriamento, conhecida como Leito de Resfriamento. No entanto, para que o produto deixe a zona de transformação (onde está em movimento constante e sincronizado ao ritmo de produção) e passe ao Leito de Resfriamento, é necessário que ele seja recolhido e desacelerado. Para que tal aconteça, a Calha de Frenagem interpõe-se às duas zonas e executa a função de recepção e frenagem do produto. A figura a seguir mostra o local onde se encontram a Calha de Frenagem e o Leito de Resfriamento.

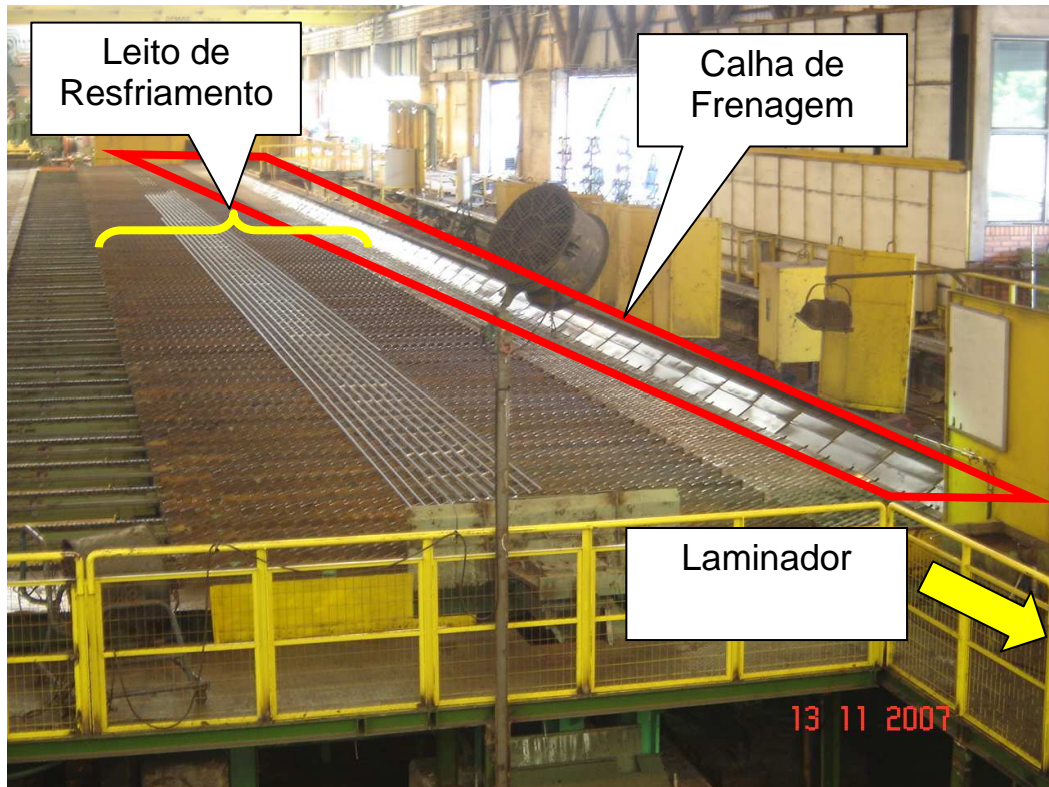


Figura 4 A Calha de Frenagem e o Leito de Resfriamento.

2.2.1 Função da Calha de Frenagem

A função da Calha de Frenagem é frear a barra em movimento vinda do Laminador e fazer com que ela pare de forma controlada, ou seja, em tempo e posição determinados. Após a detecção da barra por uma fotocélula, aguarda-se um certo intervalo de tempo e aciona-se a calha pra que se inicie a frenagem. A posição de parada da calha pode ser calculada da seguinte maneira:

$$P_{parada} = D_{frenagem} + V_{barra} * (T_{intervalo} + T_{transferência})$$

Onde:

P_{parada} : Posição de parada da barra em relação à posição da fotocélula.

$D_{frenagem}$: Distância necessária para a frenagem da barra a uma dada velocidade. É função da velocidade da barra e do coeficiente de atrito dinâmico entre a barra e a calha.

V_{barra} : Velocidade da barra sobre o caminho de rolos, ao passar pela fotocélula.

Depende essencialmente do ritmo de produção.

$T_{\text{intervalo}}$: intervalo de tempo entre o instante em que a barra é detectada e o instante em que a calha é acionada. É o parâmetro sobre o qual se interfere para se alterar posição de parada da barra.

$T_{\text{transferência}}$: duração da transferência da barra do caminho de rolos à zona de frenagem. É um parâmetro fixo.

A seguir, descreve-se o funcionamento da Calha de Frenagem. O texto foi parcialmente retirado do *Treinamento Calha de Frenagem* (GERDAU, 2009).

2.2.2 Descrição do funcionamento

O funcionamento da calha de frenagem é descrito conforme as etapas abaixo:

1. Figura 5 - A barra (A), cortada na tesoura T3, é acelerada no caminho de rolos para afastar sua cauda da cabeça da barra seguinte e evitar colisão de barras. No momento em que a barra é detectada pela fotocélula da calha, conta-se um certo intervalo de tempo (determinado em função da posição de parada desejado) para acionar-se a calha. Então, a calha desce para coletar a barra, a qual será freada e posteriormente descarregada no grelhado do leito de resfriamento.

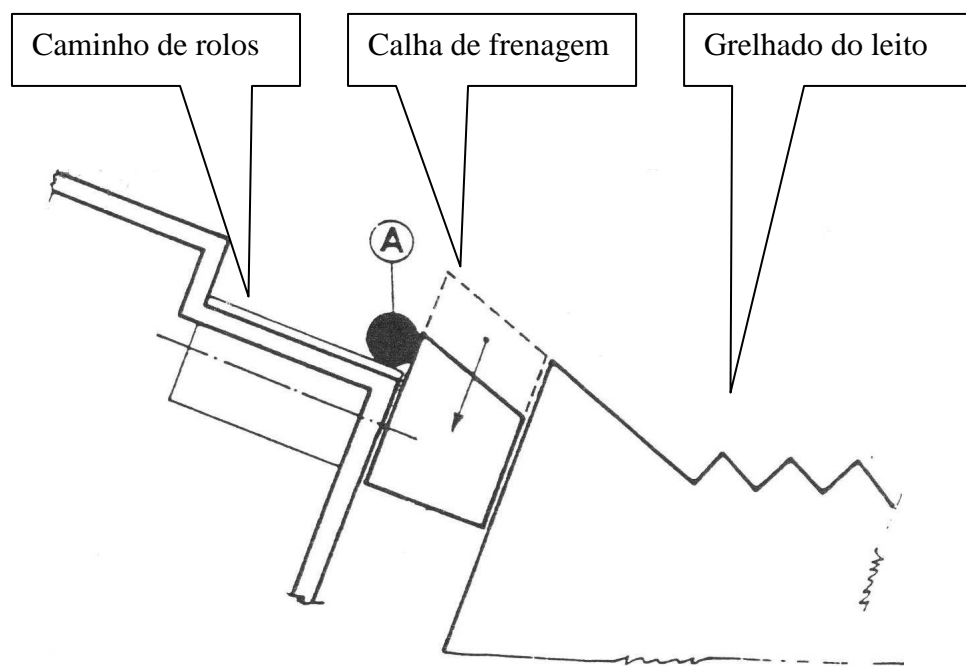


Figura 5 Barra vinda da área de corte deslizando na parede da calha de frenagem

2. Figura 6 – Depois de a calha de frenagem chegar à posição baixa, a barra é coletada, e inicia-se o processo de frenagem por atrito. Enquanto isso, outra barra (B) sai da área de corte (T3) e desloca-se em direção à calha de frenagem.

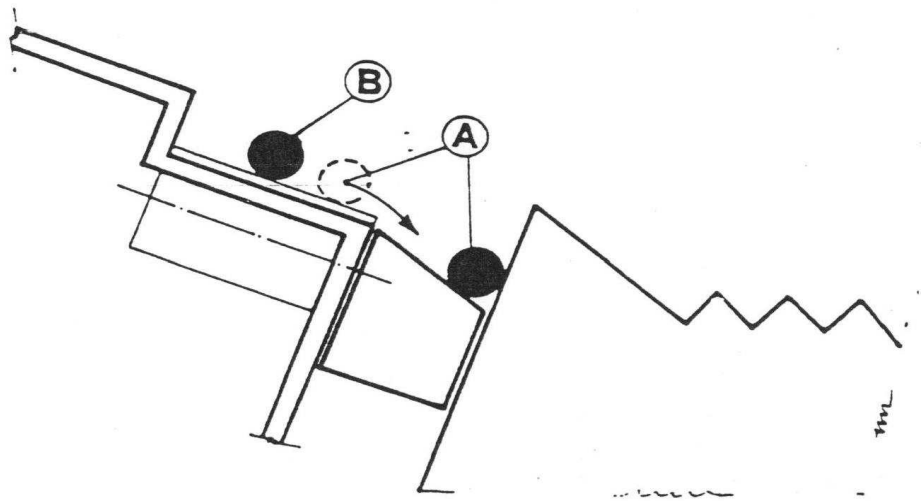


Figura 6 Coleta e frenagem da barra (A) e chegada da barra (B)

3. Figura 7 – Após a frenagem da barra (A), a calha de frenagem sobe para a posição alta e ocorre a transferência da barra ao grelhado do leito de resfriamento. Há também a chegada da barra (B) na região da calha de frenagem, deslizando sobre caminho de rolos e a parede da calha de frenagem até o momento de ser coletada.

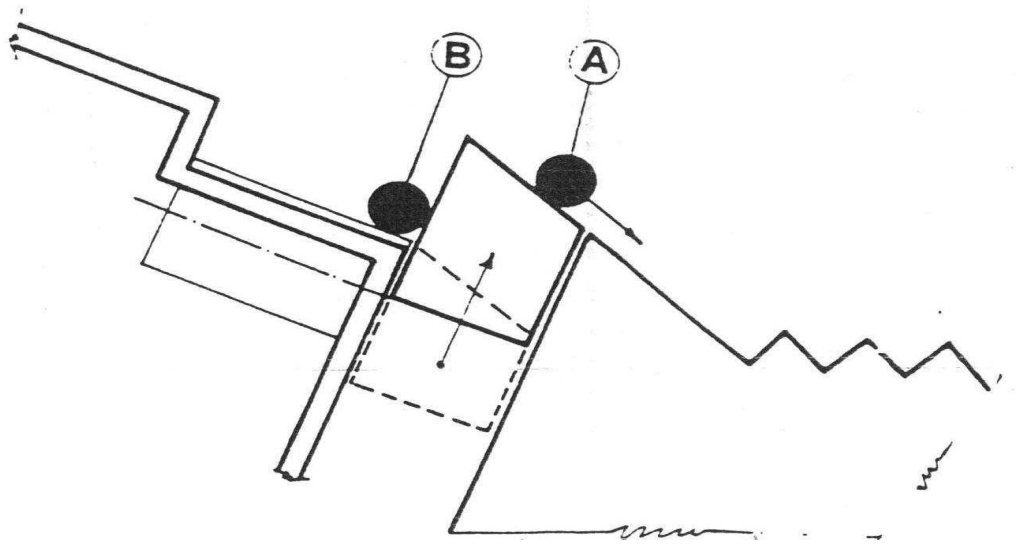


Figura 7 Transferência da barra (A) para o leito de resfriamento

4. Figura 8 - Após a transferência da barra (A) para o grelhado do leito de resfriamento, a calha executará o mesmo ciclo para a barra (B) e as seguintes.

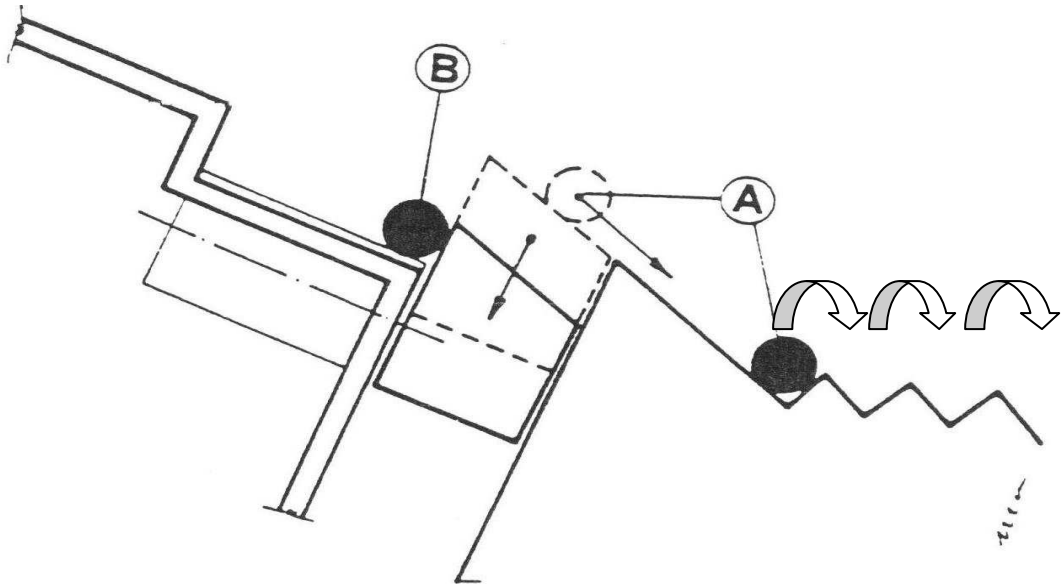


Figura 8 Transferência da barra (A) para o grelhado e descarga da barra (B)

2.2.3 Controle de posicionamento da Calha de Frenagem

Para realizar o controle de posicionamento da calha de frenagem de forma mais precisa, adquiriu-se em setembro de 2007 um cartão de controle de posicionamento da Bosch Rexroth, o HACD, que está localizado na sala elétrica dos conversores do leito (figura 9). O software que compõe o sistema permite monitorar o comportamento da calha de frenagem ao longo do tempo (o que permite a criação de um histórico de falhas). Também foram compradas uma válvula com eletrônica embarcada (série OBE para controle de posicionamento do carretel) da Rexroth, que está localizada na central hidráulica da calha de frenagem (figura 10), bem como uma régua (sensor de posição magneto-estritivo), para fornecer a posição real da calha de frenagem. Esta régua está ligada ao eixo que movimentava a calha de frenagem e está localizada ao lado de um dos 17 cilindros que hoje compõem o sistema (figura 11).



Figura 9 Cartão de controle de posicionamento da calha de frenagem

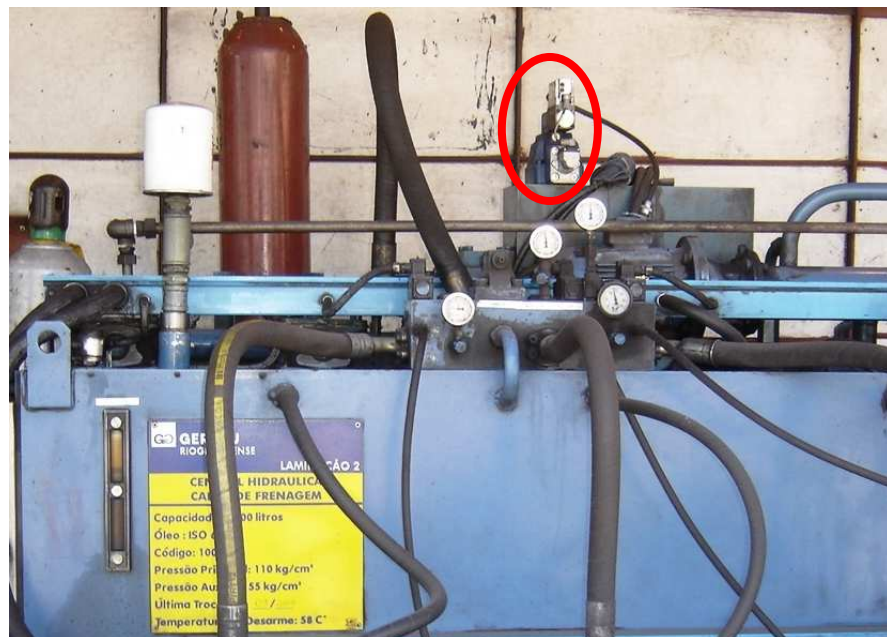


Figura 10 Válvula de controle proporcional (marcada em vermelho)

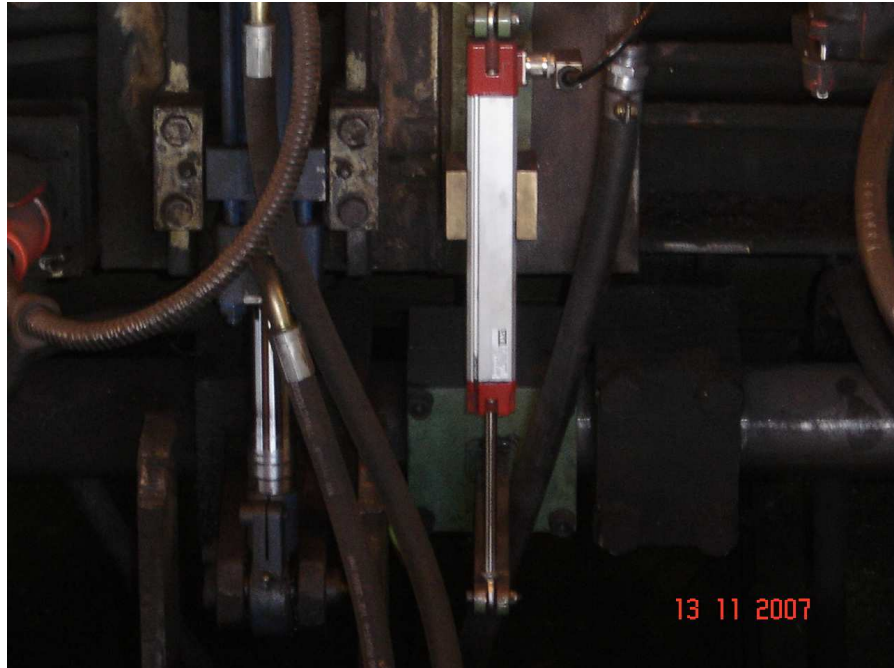


Figura 11 Transdutor magneto-estritivo (régua)

A figura abaixo ilustra o funcionamento do controle pelo cartão. O texto que vem a seguir permite um entendimento mais detalhado.

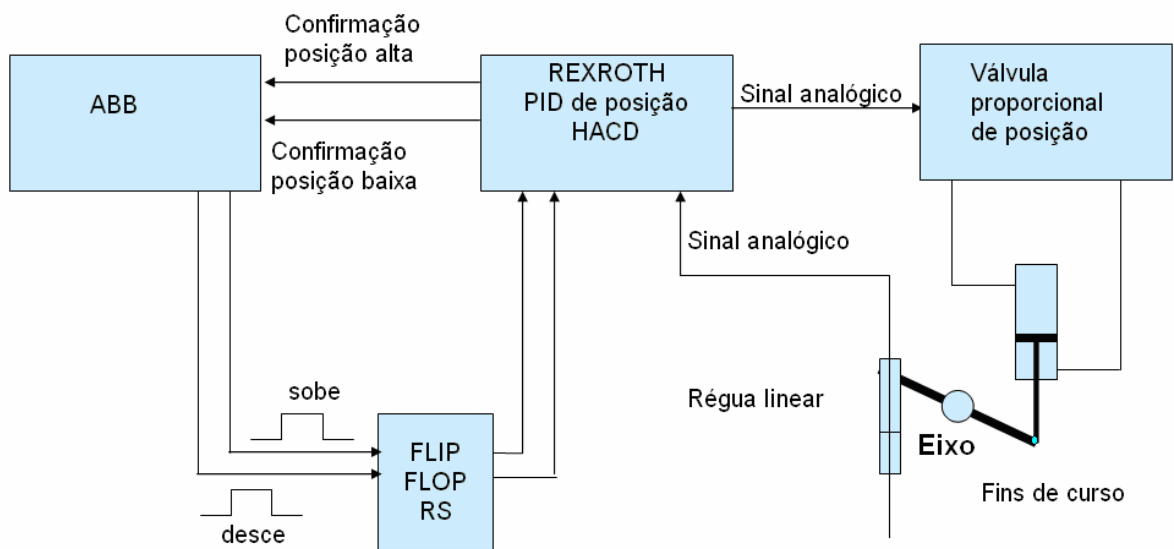


Figura 12 Esquema do funcionamento do cartão da Rexroth

1. O sistema de controle do laminador (CPU da ABB) envia ao cartão de controle de posicionamento da calha de frenagem (HACD) os sinais de comando de descida e subida. Um flip-flop se interpõe entre eles para garantir a retenção dos sinais de comando, conforme especificado pelo fabricante do controlador.
2. O cartão de controle HACD envia um sinal analógico (± 10 V) para a válvula proporcional e esta, através de um controle proporcional, controla o movimento do seu carretel enviando a vazão de óleo adequada para os cilindros. O controle integral ainda está fora de funcionamento devido a problemas anteriormente encontrados. No entanto, pretende-se fazer o uso do controle integral juntamente com o controle proporcional.
3. Os cilindros hidráulicos são os responsáveis pela movimentação da calha de frenagem. Eles estão montados na lateral da calha de frenagem e ligados ao eixo do conjunto do leito de resfriamento através de uma rótula montada na haste do cilindro e de uma alavanca ligada na haste e soldada no eixo.
4. No oitavo cilindro do leito de resfriamento está instalado um transdutor de posição magneto-estritivo (régua linear), que é responsável por enviar de volta ao cartão de controle HACD um sinal analógico que informa a posição real da calha a cada instante. Um sinal de controle é enviado do cartão à válvula para fazer o controle do movimento do cilindro, de modo que a calha de frenagem se posicione o mais próximo do set-point estabelecido.
5. Quando a calha chega à posição desejada, o cartão de posicionamento (HACD) manda de volta para o sistema de controle do laminador (CPU da ABB) um sinal de confirmação. Com a chegada do sinal de confirmação, o sinal de comando do cartão da ABB é desligado. Sem a participação do flip-flop, o controle de posicionamento ficaria em laço aberto.

Estes passos são os mesmos tanto para os movimentos de subida quanto de descida da calha de frenagem.

2.2.4 Software de monitoramento dos movimentos da calha de frenagem

Além do cartão de controle de posicionamento da calha de frenagem (HACD) existe também um software chamado BODAC para monitorar os movimentos da calha. Com esse software, pode-se modificar uma série de parâmetros do controle do movimento a fim de manter o sistema estável.

Este software é utilizado quando o mantenedor eletrônico necessita fazer alguma modificação para melhorar a posição de parada da calha de frenagem, como ajustes de ganho proporcional ou posição de parada de acordo com o comportamento real da calha de frenagem.

Nas figuras a seguir pode-se observar a tela de entrada do software e alguns parâmetros que podem ser modificados.



Rexroth
Bosch Group



Figura 13 Tela inicial do software Bodac

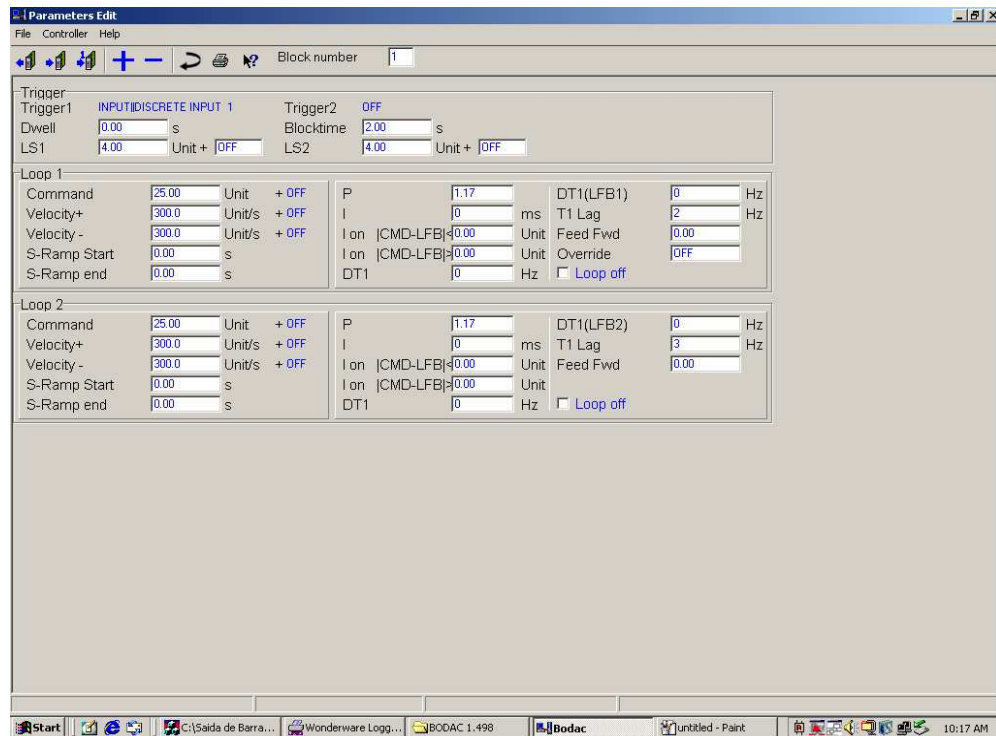


Figura 14 Parâmetros do software que podem ser modificados

Durante funcionamento, um gráfico dos sinais de interesse é produzido, permitindo acompanhar os movimentos da calha de frenagem durante cada ciclo efetuado. Os sinais que se monitoram são:

- LC1: set-point de posição do HACD (azul)
- FB1-1: posição real da calha de frenagem (vermelho)
- LC1-LFB1: sinal de erro (azul claro)
- OUT2 d32: sinal de controle enviado pelo HACD à válvula (verde)
- DI1: sinal de comando DESCER enviado pelo PLC da ABB ao HACD (rosa)
- DI3: sinal de comando SUBIR enviado pelo PLC da ABB ao HACD (amarelo)
- DO1: sinal de confirmação (atingiu set-point baixo) enviado pelo HACD ao PLC da ABB (laranja)
- DO3: sinal de confirmação (atingiu set-point alto) enviado pelo HACD ao PLC da ABB (preto)

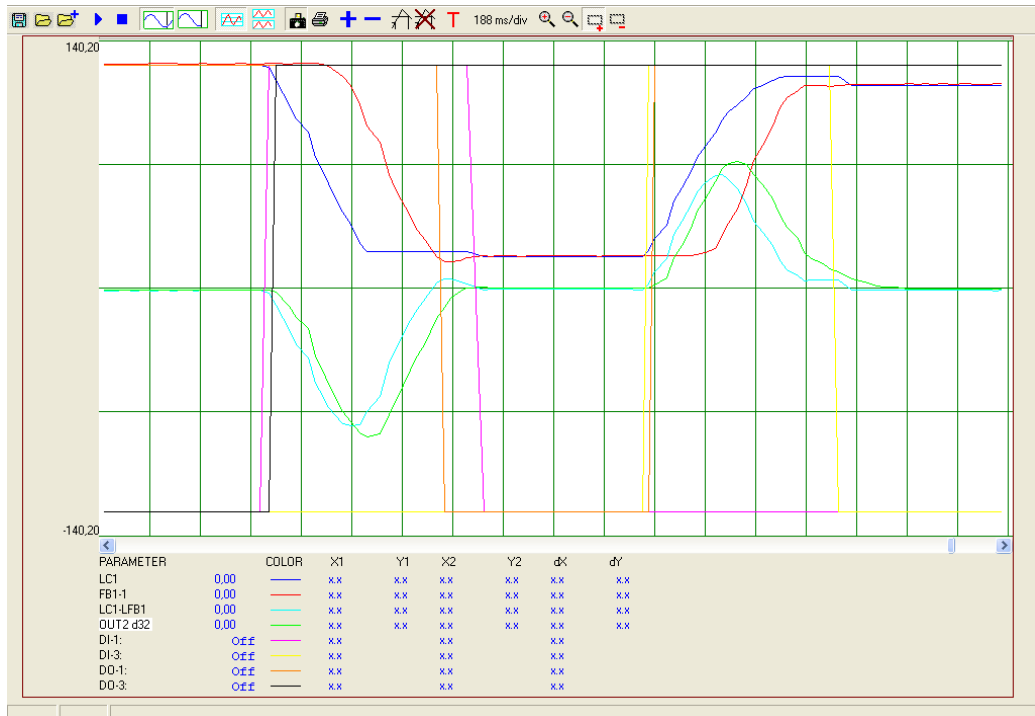


Figura 15 Sinais de interesse durante o ciclo da calha de frenagem

No momento em que DI1 (comando DESCER) chega ao HACD (ativo em ON), o set-point desce linearmente durante 300ms até em torno de 16 mm (esse valor varia conforme o desempenho do sistema). O sinal de controle OUT2 d32 é enviado em função do sinal de erro LC1-LFB1 e a calha começa o movimento de descida. No momento em que a posição real (FB1-1) cruza o set point (LC1), o sinal de confirmação DO1 (ativo em OFF) é enviado ao PLC da ABB que, por sua vez, corta o sinal de comando DI1.

Para o movimento de subida, ocorre um processo similar. No entanto, em lugar dos sinais DI1 e DO1, utilizam-se os sinais DI3 e DO3 da mesma maneira. Além disso, o set point alto é em torno de 120 mm (esse valor sofre ajustes conforme a necessidade).

2.2.5 Principais falhas

Falhas de posicionamento

Existem dois tipos de falha no posicionamento da calha de frenagem. São eles:

- Pouca precisão

A atuação do controle proporcional não é suficiente para colocar a calha sempre na mesma posição. Este problema seria minimizado com o uso do controle integral, o que deve ser feito em uma próxima oportunidade.

- Diferenças de posição nos diversos módulos da calha

O posicionamento da calha é feito com base na posição da calha no ponto onde se encontra a régua. No entanto, outros cilindros podem apresentar uma considerável diferença de posição, especialmente no extremo posterior da calha, que assume posições mais elevadas em algumas ocasiões.

A posição da calha de frenagem não teria tanta importância não fossem as cantoneiras necessitarem de uma determinada orientação durante o resfriamento. Em funcionamento normal, o posicionamento da calha permite que a cantoneira mantenha a orientação imposta na última etapa da laminação, conforme mostra a figura a seguir.

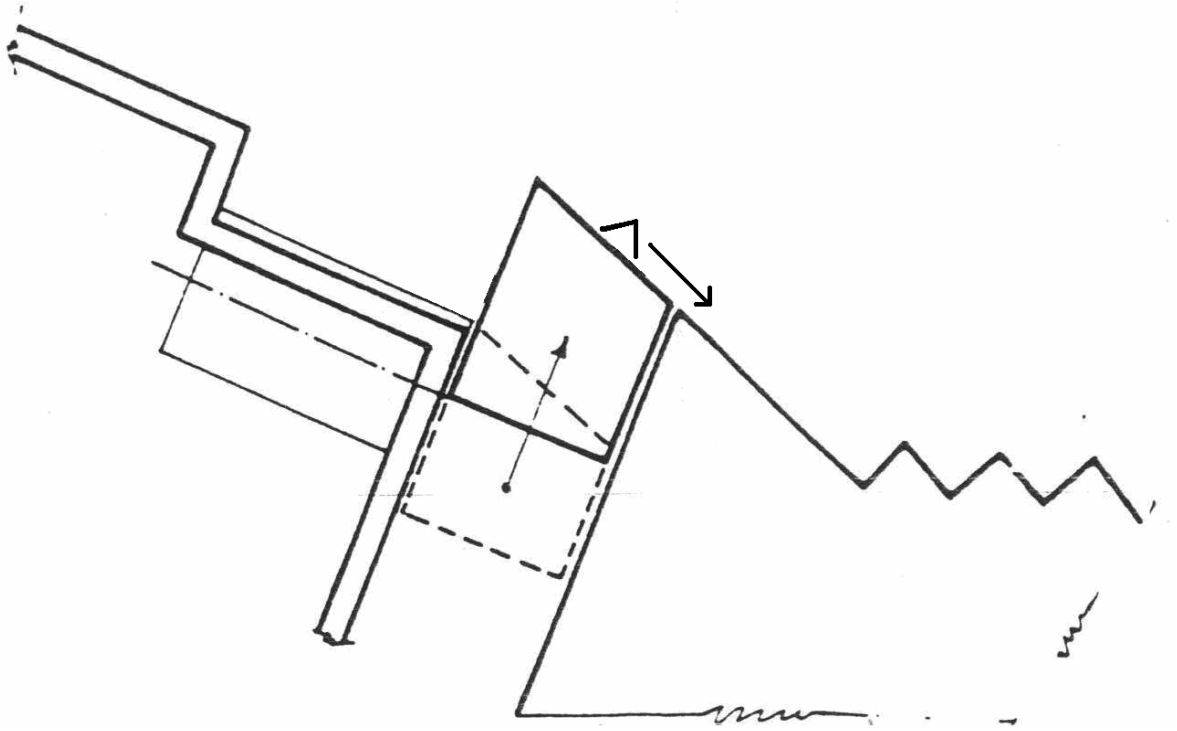


Figura 16 Transferência da cantoneira em funcionamento normal da calha

No entanto, se o desnível entre a calha e os rolos antes da calha ou entre a calha e a descida para o leito for suficientemente grande, a cantoneira mudará sua orientação, conforme mostra a figura a seguir. Isso provoca um resfriamento inadequado da cantoneira e esta deve ser rejeitada.

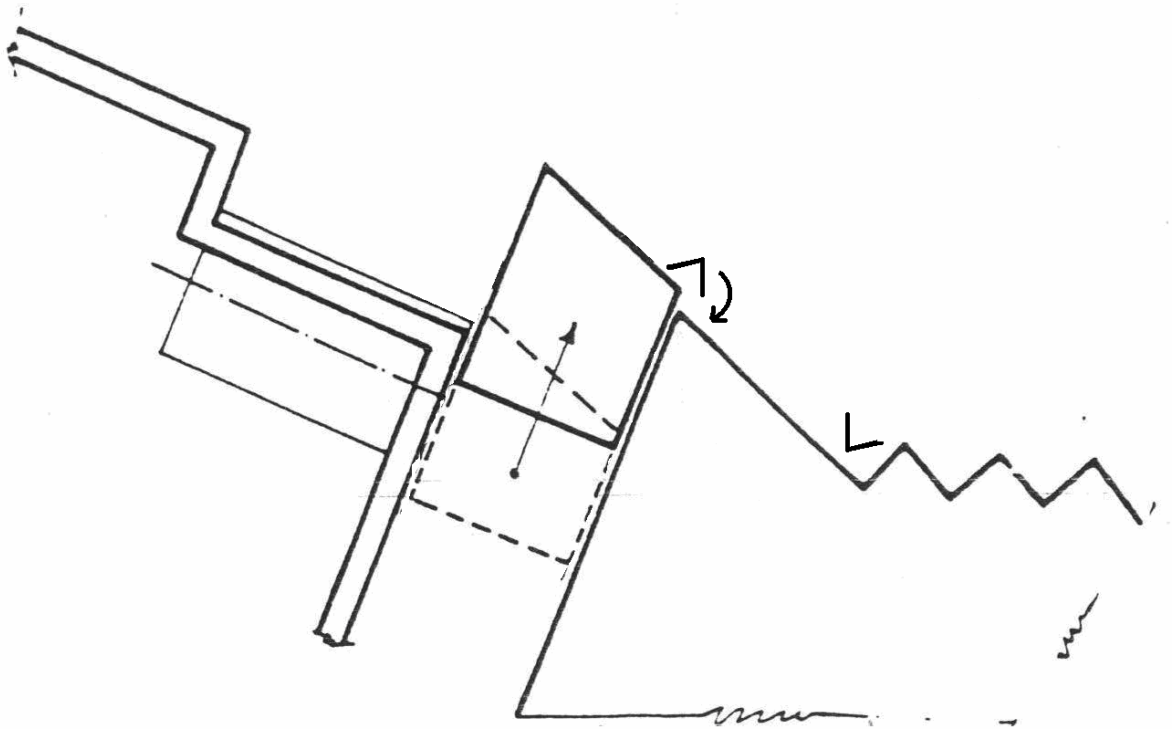


Figura 17 Funcionamento anormal da calha quando transfere uma cantoneira

Falhas de tempo de movimentação

Ocorre eventualmente uma movimentação demasiadamente lenta da calha. Essa falha pode ocorrer tanto no movimento de subida como no de descida, provocando a colisão e amontoamento de barras.

2.2.6 Causas diagnosticadas

Causas hidráulicas

Diversos fatores hidráulicos contribuem a um mau funcionamento da calha de frenagem:

- Elasticidade

Existe uma deficiência no projeto do sistema hidráulico relacionado à rigidez do sistema, que é muito baixa. O fluido, em conjunto com as mangueiras, comporta-se como uma mola por causa da enorme quantidade de óleo que precisa ser comprimido a 125bar.

- Desalinhamento de cilindros

Os cilindros responsáveis pela movimentação do eixo da calha estão desalinhados. Conseqüentemente, os módulos da calha executam movimentos diferentes, efeito que pode agravar-se conforme as condições do momento.

- Contaminação do óleo

O grau de contaminação do óleo influencia sensivelmente no comportamento da válvula direcional proporcional. Não se conhece o valor da constante de tempo relacionada a esse efeito, pois uma modelagem do sistema nunca foi realizada (os ajustes do sistema de controle são empíricos).

Ocorrem agarramentos no êmbolo da válvula, o que leva a movimentos imprecisos, choques e aumento do tempo para realização do movimento. O histórico de deterioração dos cilindros hidráulicos e a ausência de filtros de pressão na entrada das proporcionais provavelmente levaram o sistema a ter este tipo de comportamento.

- Oscilações da temperatura do óleo

O sistema de controle de temperatura atual é ineficiente e tem permitido grandes oscilações de temperatura operacional (até 10 graus). Devido às relações entre temperatura e viscosidade, e viscosidade e vazão, as variações de temperatura provocam mudanças significativas no comportamento do sistema, que não são consideradas no sistema de controle.

- Vazamentos de óleo

Existem diversos elementos por onde o óleo pode vazar: bombas hidráulicas, tubulações, válvulas e cilindros. A falta de uma vazão em quantidade e tempo adequados impede o funcionamento correto do sistema.

Causas mecânicas

- Elasticidade do eixo da calha

O eixo da calha de frenagem é extremamente longo (perto de 100m) e, por isso, não pode ser considerado rígido. Ocorrem flexões e torções nesse elemento.

- Desalinhamento dos módulos da calha

Os próprios módulos da calha não possuem um bom alinhamento e prejudicam o posicionamento correto da calha de frenagem. Além disso, esse desalinhamento é a origem de alguns agarramentos durante a movimentação.

2.2.7 Soluções em caso de falhas na calha de frenagem

Soluções eletrônicas

O plantão elétrico-eletrônico é acionado primeiramente em caso de problemas na calha de frenagem. Há duas medidas corretivas que podem ser realizadas:

- Modificar o ganho proporcional da calha de frenagem

O ganho proporcional da calha de frenagem interfere diretamente no esforço que o cilindro realiza para movimentar a calha para cima e para baixo. Sendo assim, pode-se modificar o ganho da calha de frenagem para compensar mudanças no comportamento mecânico, como: desnivelamento dos módulos da calha de frenagem, aquecimento da calha (e conseqüente atrito dos módulos fixos com os módulos da calha), variações na posição de parada da calha, etc. O sistema hidráulico da calha de frenagem também pode apresentar mudanças de comportamento como: aquecimento excessivo do óleo, vazamentos internos nos cilindros, vazamentos na tubulação, etc.

- Modificar a posição física de parada da calha de frenagem (set-point)

Pode-se também em alguns casos modificar o set-point da calha de frenagem, isto é, a posição de referência em que ela deve parar. Assim, podemos compensar variações e mudanças drásticas no comportamento mecânico da calha de frenagem, como por exemplo, desnivelamento acentuado dos módulos entre si, agarramentos devido à ação da temperatura no sistema, rebarbas, etc.

Soluções mecânicas e hidráulicas

Caso os problemas não sejam solucionados eletronicamente, o plantão mecânico poderá resolver os problemas na calha de frenagem verificando as seguintes variáveis hidráulicas:

- Temperatura do óleo hidráulico

Quanto menor a temperatura, menor é a viscosidade do óleo (maior a resistência do óleo ao escoamento). Isto pode causar grandes problemas na sucção do óleo. No entanto, é muito mais comum que a central esteja trabalhando a uma temperatura muito alta. Nesse caso, o plantão mecânico deve ligar um ventilador a fim de resfriar o óleo do reservatório.

- Bombas em operação

Existem 3 bombas que geram vazão de óleo para os cilindros que movimentam a calha de frenagem. Uma destas bombas (bomba 1) apresenta um desgaste excessivo (cerca de 13 l/min de vazamento pelo dreno). Se a vazão de óleo for insuficiente, colocam-se as bombas 2 e 3 em operação.

- Vazamentos

Caso a solicitação das demais bombas não for suficiente para resolver o problema, devem-se verificar a presença de vazamentos. Durante as paradas programadas de manutenção preventiva, revisa-se a tubulação que transporta óleo para os cilindros. De igual modo, realizam-se testes de vazamento nos cilindros e efetua-se a substituição de elementos problemáticos.

Na seção seguinte, procura-se encontrar uma aplicação da Manutenção Inteligente na Calha de Frenagem, com base nos problemas aqui relatados.

3 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS

Das características expostas na seção anterior, destaca-se o fato de que o sistema da calha de frenagem contém um sensor de posição. Monitorada no decorrer do tempo, a variável deste sensor fornece informações relevantes de posição, tempo e velocidade dos movimentos da calha. Com esses recursos à disposição, a Manutenção Inteligente faz o uso de uma ferramenta de avaliação do estado atual do sistema, cujo objetivo é reduzir ou mesmo evitar os tempos de parada de máquina.

A técnica desenvolvida por um sistema de manutenção inteligente requer um prévio conhecimento da máquina e uma descrição completa dos seus modos de falha. Dessa maneira, o sistema irá estimar a condição atual da máquina baseando-se no reconhecimento das indicações de falha que oferecem as variáveis monitoradas.

No entanto, tem-se trazido uma nova abordagem para os sistemas de manutenção inteligente com o surgimento do Watchdog Agent TM, desenvolvido pelo IMS Center. Com o objetivo de focar na degradação em lugar da falha, o Watchdog Agent faz uma constante comparação do estado atual e do estado de funcionamento normal das variáveis monitoradas. Assim, o sistema de manutenção inteligente se torna extremamente adaptativo e mais eficiente pelo fato de não usar como parâmetro um estado faltoso previamente estabelecido, mas o desvio em relação à operação normal do sistema. A figura a seguir mostra uma das plataformas sobre a qual é desenvolvido o Watchdog Agent.



Figura 18 Watchdog Agent, da IMS Center

Seguindo-se ao Watchdog Agent, um sistema de manutenção inteligente pode contar também com a inclusão de um DST (*Decision Support Tool*, do inglês, Ferramenta de Suporte à Decisão), o que contribui ao caráter “inteligente” desse tipo de manutenção.

A seguir, expõe-se uma análise das características do Watchdog Agent e do DST, procurando-se determinar a solução mais apropriada ao sistema da calha de frenagem.

3.1 WATCHDOG AGENT

O Watchdog Agent baseia a avaliação das condições da máquina na leitura dos sensores que medem propriedades críticas da máquina. Espera-se que a degradação do desempenho altere essas leituras à medida que ela progride. Um histórico de registros do comportamento da máquina não é fundamental. No entanto, se existir, contribui à eficiência do Watchdog Agent. Há duas principais funções que são executadas: prognósticos e diagnósticos.

A função de prognóstico é realizada a partir da modelagem da dinâmica e do tendenciamento das variáveis monitoradas. Assim é possível prever o seu futuro comportamento e responder à seguinte pergunta:

- 1 Quando os parâmetros monitorados irão atingir valores correspondentes a um desempenho inaceitável?

Evidentemente, é necessário também determinar uma correspondência entre os valores dos parâmetros monitorados e o desempenho da máquina.

A função de diagnóstico é realizada a partir da memorização de padrões dos sinais monitorados e da associação desses padrões com as causas da degradação. O Watchdog Agent também é capaz de identificar padrões nunca antes observados para aprender o diagnóstico em situações novas. Assim é possível responder à seguinte pergunta:

2 Por que a máquina está degradando? Ou: qual a causa da degradação da máquina?

Esta pergunta deve ter uma resposta quantitativa, para que se possam estabelecer prioridades no elemento que segue o Watchdog Agent, conforme se descreve a seguir.

3.2 DST (DECISION SUPPORT TOOL)

Terminadas as suas operações, as respostas encontradas pelo Watchdog Agent podem ser utilizadas por um DST (*Decision Support Tool*). O DST encarrega-se de responder à seguinte pergunta:

3 Qual a peça mais crítica que deve ser substituída/reparada?

O DST responde a essa pergunta levando em conta os riscos envolvidos na ação de intervir ou de não intervir nas peças diagnosticadas pelo Watchdog Agent e por isso os diagnósticos devem ser quantitativos. Além dos riscos, o DST considera também os custos da intervenção ou das consequências que haverá caso a intervenção não seja feita. Conhecendo-se a condição de cada peça da máquina, é possível também analisar a possibilidade de reaproveitamento com segurança de peças em outras máquinas, caso haja essa necessidade.

Finalmente, o DST entrega uma informação extremamente útil ao usuário: o quê, quando e por que deve sofrer uma intervenção. Isso resume a função de um sistema de manutenção inteligente, integrando a manutenção preditiva a um alto nível de automação.

Tendo em vista a complexidade de um sistema de manutenção inteligente, este trabalho se limitará à análise das alternativas oferecidas pelo Watchdog Agent e a implementação de um sistema apropriado à calha de frenagem. No entanto, é interessante que estudos continuem sendo realizados para que, futuramente, as funcionalidades de um DST também estejam disponíveis na calha de frenagem. A seguir, expõe-se com mais detalhes o funcionamento e as características de um Watchdog Agent.

3.3 FUNCIONALIDADES DO WATCHDOG AGENT

Conforme já mencionado, o Watchdog Agent possui algumas funcionalidades básicas que são:

- 1 Análise do desempenho
- 2 Predição do desempenho
- 3 Diagnóstico do desempenho

Cada uma dessas funcionalidades corresponde a um módulo funcional do Watchdog Agent. A figura a seguir esquematiza os módulos do Watchdog Agent e os recursos utilizados para a aquisição de dados.

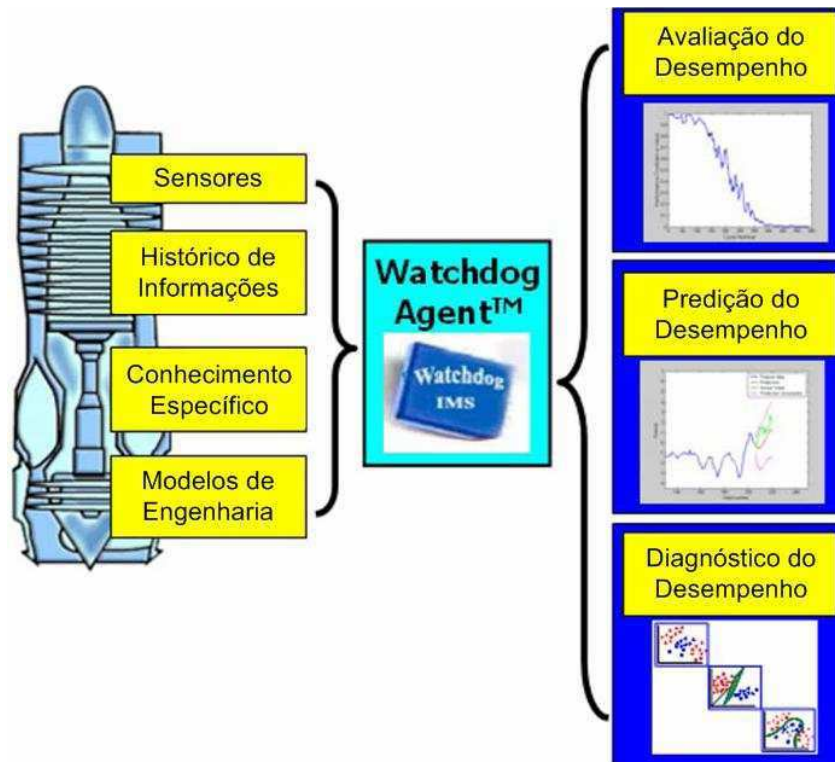


Figura 19 Módulos do Watchdog Agent

3.3.1 Ferramentas de processamento de sinais e extração de características

Além desses módulos, é necessário um módulo que executa um tratamento inicial dos dados levantados dos sensores. Esse módulo é conhecido como Ferramentas de processamento de sinais e extração de características (chamado originalmente em inglês de *Signal Processing and Feature Extraction Tools*). Possui diversos métodos de processamento de sinais e extração de características. Essa ferramenta toma um determinado número de pontos representando o comportamento de um parâmetro ao longo do tempo para realizar o processamento do sinal.

Cada um dos métodos seguintes é mais apropriado a um determinado tipo de sinal. Os métodos são:

- Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Realiza-se o cálculo de energias de faixas de frequência a partir da FFT. Esse método é adequado a sistemas mecânicos vibratórios onde sinais estacionários predominam, apresentando uma alta velocidade de cálculo. Por outro lado, o uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT, ou *Fast Fourier Transform*) em amostras de frequência predeterminadas prejudica a resolução do espectro.

- Análise tempo-frequência

Calcula-se os momentos de tempo-frequência dos sinais. Apropriado a sinais com características não-estacionárias bastante complexas, esse método possui certo número de propriedades matemáticas, como a covariância de deslocamentos no tempo e na frequência, a covariância de escalas, a frequência instantânea, etc. No entanto, tal complexidade de análise é obtida a custo de cálculos mais extensos e demorados.

- Análise de pacotes wavelet

Calcula-se as energias de pacotes Wavelet (transformada do domínio do tempo para o domínio da frequência). Apropriado a sinais não estacionários, utiliza-se de filtros passa-alta e passa-baixa para determinar a distribuição de energia do sinal. O processamento é rápido, mas oculta algumas características do sinal que podem ser relevantes em alguns casos.

- Filtro/ Modelagem autoregressiva

Compreende a localização de picos de frequência e cálculo de suas intensidades usando modelagem por Auto-regressão (AR). Esse método é apropriado a casos onde os sinais dos sensores são predominantemente estacionários. O modelamento por Auto-regressão permite conhecer a dinâmica do sinal, eliminar o ruído branco e identificar com precisão a localização e as intensidades dos picos de frequência do sinal, o que é de fundamental importância em sistemas mecânicos.

- Extração especializada de características

Realiza-se a extração de características diretamente da leitura dos sinais no domínio do tempo. Aplicável a casos em que os sinais envolvidos revelam no domínio do tempo características relevantes do desempenho da máquina. É necessário também que haja um conhecimento especializado do comportamento dos sinais nas diversas situações.

3.3.2 Ferramentas de análise do desempenho

A análise do desempenho (do inglês, *assessment of performance degradation*) é realizada a partir da similaridade existente entre os sinais atuais da máquina e os sinais quando em funcionamento normal. Geralmente, utiliza-se um parâmetro chamado de Valor de Confiança do Desempenho (em inglês, *performance confidence value*, ou simplesmente CV). O CV varia de zero a um, assumindo valores tanto mais próximos de um quanto mais próxima de um funcionamento normal estiver a máquina. Cada tipo de sinal adequa-se mais a um dos seguintes métodos de análise:

- Regressão logística

Quando existe uma boa descrição das características de comportamento inaceitável, é possível encaixar uma curva de regressão logística às características de modo que os valores são próximos de um quando o comportamento é próximo do normal, e próximos de zero quando a degradação já encontra-se em estado avançado.

- Reconhecimento de padrões estatísticos

Apropriado a casos em que o comportamento da máquina possui uma distribuição aproximadamente normal, tanto em funcionamento normal quanto em degradação avançada. Nesse método, a normal dos sinais atuais é sobreposta à dos sinais em funcionamento normal, fazendo um reconhecimento de padrão estatístico.

- Coincidência de padrões de mapa de características

Análise da sobreposição das mesmas curvas que no método anterior. No entanto, é aplicável a casos em que a normalidade das distribuições não é garantida.

- Redes neurais CMAC (*Cerebellar model articulation controller*)

Apropriado para aplicações em que se requer uma alta velocidade de análise, especialmente sistemas não lineares bastante complexos. Para este método, é necessário um alto conhecimento da máquina e seus modos de falha, para que o CMAC possa comparar o número de células ativas na situação atual com o número de células ativas durante um funcionamento normal.

3.3.3 Ferramenta de predição do desempenho

A predição de desempenho (do inglês, *performance forecasting*) é um módulo que entra após a análise da degradação do desempenho na sequência de operações executadas pelo Watchdog Agent. Na análise da degradação, compara-se o comportamento atual da máquina com o funcionamento normal. A ferramenta de predição do desempenho identifica a dinâmica deste comportamento (a maneira como está progredindo) e faz uma projeção do mesmo no tempo. Dessa maneira, é possível prever com boa aproximação quando a máquina falhará ou atingirá um desempenho abaixo do tolerável. Os métodos seguintes são utilizados na predição do desempenho:

- Matriz de coincidência

Dispondo-se de uma grande quantidade de informações históricas, é possível fazer a predição do comportamento do sistema com precisão de longo prazo. Compara-se os sinais de diversos processos de degradação usando medidas de similaridade que formam uma matriz de verificação. As semelhanças com dados históricos são usados para gerar futuras distribuições possíveis das características. Assim é possível prever as

probabilidades de falha no decorrer do tempo comparando estas distribuições com as distribuições correspondentes a comportamentos inaceitáveis.

- Predição ARMA

A média móvel autoregressiva, conhecida em inglês como ARMA (*autoregressive moving-average*), é aplicável a sistemas LTI estacionários.

- Redes neurais recorrentes de Elman

Trata-se de redes neurais criadas por Jeff Elman. Redes neurais são um modelo não linear constituído por um conjunto de neurônios e conexões ponderadas, comportando-se de modo semelhante ao cérebro humano. As saídas da rede neural, deslocadas por um atraso no tempo, servem de entradas para predição no tempo. Esse método é aplicável principalmente a sistemas não lineares e não estacionários. No entanto, requer uma grande quantidade de dados históricos para um funcionamento satisfatório.

- Predição por lógica difusa

Lógica difusa é uma teoria que aproxima o comportamento de um sistema quando não existem modelos, funções ou técnicas numéricas para se descrever o sistema. Essa teoria oferece uma forma de se mapear a incerteza de um parâmetro na aproximação do comportamento de um sistema. Utiliza-se observação, ou conhecimentos especializados, para se formular a aproximação. É um método ideal para sistemas complexos onde o comportamento é desconhecido ou não compreendido, aplicável na maioria dos casos. Permite aproximações rápidas e com boa tolerância na formulação de aproximações (IMS CENTER, 2007).

3.3.4 Ferramenta de diagnóstico do desempenho

O diagnóstico do desempenho é uma técnica baseada no reconhecimento das indicações de falha do comportamento do sistema. Normalmente, uma determinada máquina

possui diversos modos de falha. Conhecendo-se um histórico do comportamento dos sinais relevantes em presença de uma dada falha, é possível avaliar a correlação entre os sinais atuais e os sinais característicos da falha. Quanto mais próximo de tal falha estiver o comportamento do sistema, maior será o CV do sistema referente à falha (o comportamento do sistema começará a coincidir com a característica da falha, logo, o CV baseado no comportamento faltoso aumenta). Há dois métodos que realizam diagnóstico:

- Máquina de vetores de suporte

Do inglês *support vector machine*, esse método é aplicável a casos em que a normalidade das distribuições das características do sistema não é garantida.

- Modelo oculto de Markov

Aplicável em casos altamente dinâmicos, onde uma sequência de observações, em lugar de uma única observação, é necessária para se descrever adequadamente o comportamento do sistema.

- Redes de opinião Bayesianas

É um tipo de modelo probabilístico gráfico. Mais especificamente, uma rede Bayesiana é um gráfico acíclico de nós, representando variáveis, e arcos, representando relações de dependência entre as variáveis. É um método recomendado para casos em que um dado evento de falha é afetado por vários fatores do sistema. Indica a probabilidade da ocorrência de uma determinada falha e ajuda na identificação dos fatores mais influentes em determinada situação. É necessária uma grande quantidade de dados e conhecimentos especializados do sistema (IMS CENTER, 2007).

O módulo de diagnóstico de condições funciona, evidentemente, somente nos casos em que se conhece a correspondência entre os modos de falha e o comportamento das características do sistema nesses modos. Caso contrário, é necessário estabelecer essa correspondência e usá-la para ensinar o Watchdog Agent. O Watchdog Agent atua então

como um dispositivo inteligente que integra sua experiência com as entradas supervisórias de humanos para melhorar o sistema e finalmente aproximar-se do tão almejado tempo de parada zero.

3.4 MONITORAMENTO ONLINE

O Watchdog Agent pode ser utilizado para um monitoramento online. Integrando-se o Watchdog Agent a um sistema conectado à rede, as informações obtidas podem ser enviadas ao usuário (via email, por exemplo) notificando-o que o sistema monitorado está próximo de uma falha.

Isso seria feito ajustando-se o sistema para enviar a informação toda vez que o CV em relação ao funcionamento normal se tornasse inferior a um limite previamente estabelecido. É necessário, portanto, determinar um CV que torne necessário uma intervenção programada dentro de pouco tempo, mas que seja suficientemente distante da falha para evitar que a falha ocorra logo após a notificação do usuário.

Finalmente, o usuário receberia uma notificação de que uma falha está próxima de ocorrer, indicando qual a provável causa para essa falha e qual o tempo restante estimado antes da falha.

3.5 MONITORAMENTO CONSISTENTE

Existem diversas variáveis que se acredita serem parâmetros chave do processo. São variáveis essenciais para se viabilizar uma análise conclusiva a partir da manutenção inteligente. Tais parâmetros são:

- Posição da calha
- Temperatura do óleo
- Pressão do óleo antes e depois da válvula

- Família e bitola do produto

Atualmente é possível monitorar somente a posição da calha e a família e bitola do produto que está sendo produzido. No entanto, a temperatura e a pressão são parâmetros diretamente relacionados às causas dos problemas mais frequentes da calha e por isso devem permitir uma análise bastante conclusiva do estado do sistema.

Sem o monitoramento da temperatura e pressão, não é garantido que o desempenho do sistema possa ser corretamente avaliado. O sistema de controle atua justamente na tentativa de compensar qualquer alteração do sistema, e por isso informações relevantes do desempenho acabam sendo ocultas ao se monitorar somente a posição da calha.

3.6 HISTÓRICO DE FALHAS DISPONÍVEL

Fez-se uma análise do histórico de falhas disponível da calha de frenagem. A seguir, vê-se uma parte do histórico para o mês de Março de 2008, tomada como exemplo. Os dados foram retirados do SAP, onde o pessoal da operação registra a ocorrência de falhas.

Tabela 1 Histórico de falhas da calha de frenagem, Março 2008 (parcial)

Descrição da Causa	Quantidade	Horário	Data	Classe	Tipo	Causa	Família	Bitola
Parada devido parafusos da placa desgaste calha frenagem estarem frouxos. Parafusos retirados	1	0:07:56	12/3/2008	Estrutura	Tampas calha	Parafusos	Chato	2 x 3/16
Quebra de ritmo devido barras virando na calha frenagem	1	0:02:12	19/3/2008	Estrutura	Geral Estrutura	Movimento	Cantoneira	Serr 3/4
Quebra de ritmo devido barras virando na calha frenagem. Foram ajustados parâmetros de posição da calha e feito acompanhamento	6	0:43:06	19/3/2008	Estrutura	Geral Estrutura	Movimento	Cantoneira	Serr 3/4
Quebra de ritmo devido barras virando na calha frenagem	24	2:48:16	19/3/2008	Estrutura	Geral Estrutura	Movimento	Cantoneira	Serr 3/4

O sistema supervisorio BODAC permite o armazenamento de arquivos gráficos PLT que registram no decorrer do tempo os sinais de interesse que foram apresentados na seção anterior. Cada arquivo comporta no máximo cerca de 30 horas, o que demanda o armazenamento diário de tais arquivos.

Para se facilitar a interpretação dos arquivos PLT, criou-se uma ferramenta em Microsoft Access 2003 que, importando os arquivos PLT, faz uma estratificação dos dados. Após a estratificação, são obtidos os seguintes dados de cada ciclo da calha:

- Posição da calha após a descida
- Erro de posição após a descida
- Duração da descida
- Posição da calha após a subida
- Erro de posição após a subida
- Duração da subida
- Duração do ciclo completo (descida+tempo embaixo+subida)
- Horário de início de cada ciclo

Fez-se uma tentativa de identificar as falhas registradas nos arquivos PLT estratificados. Esperava-se que os parâmetros obtidos na estratificação fossem sendo alterados até atingirem valores extremos em horários próximos à ocorrência das falhas.

Além dos valores absolutos desses parâmetros, analisou-se a evolução das médias (média móvel) e dos desvios padrões (desvio padrão móvel). Acredita-se que essas variáveis estatísticas tragam informações relevantes sobre o processo de degradação, pois um dos métodos de análise da degradação do desempenho é o reconhecimento de padrões de distribuição normal.

No entanto, diversas dificuldades foram encontradas:

- O horário em que a falha foi registrada não corresponde ao horário em que a falha ocorreu (o registro sempre ocorre, evidentemente, após a ocorrência da falha).
- Foram localizados diversos pontos fora do padrão e que não foram registrados. Não se tem a informação de se esses pontos correspondem a paradas da calha, ou falhas não registradas, etc. Nas figuras a seguir, vê-se a evolução no tempo dos seguintes parâmetros:
 - Duração da descida
 - Desvio padrão móvel das durações de descida (200 amostras)
 - Duração da subida
 - Duração do ciclo
 - Erro de posição ao descer
 - Erro de posição ao subir
 - Média móvel dos erros ao descer (200 amostras)
 - Desvio padrão móvel dos erros ao descer (200 amostras)

Cada um desses gráficos mostra o período entre 16:43 do dia 18/03/2008 e 10:43 do dia 19/03/2008. Em cada um dos gráficos, vê-se identificados os horários em que se foram registradas as falhas, conforme a tabela do histórico apresenta anteriormente. De acordo com os registros, 30 falhas ocorreram entre 00:02 e 2:48.

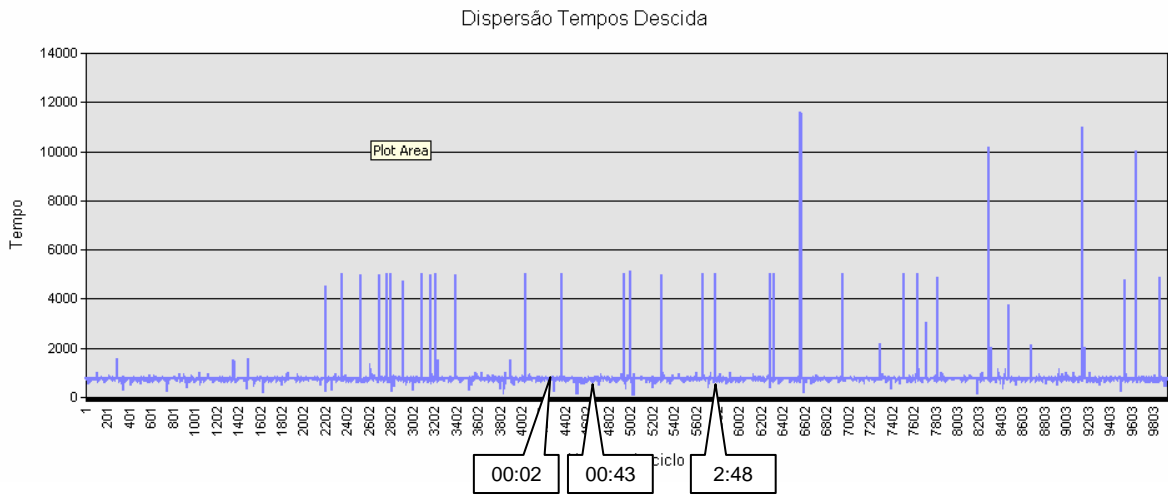


Figura 20 Evolução da duração da descida

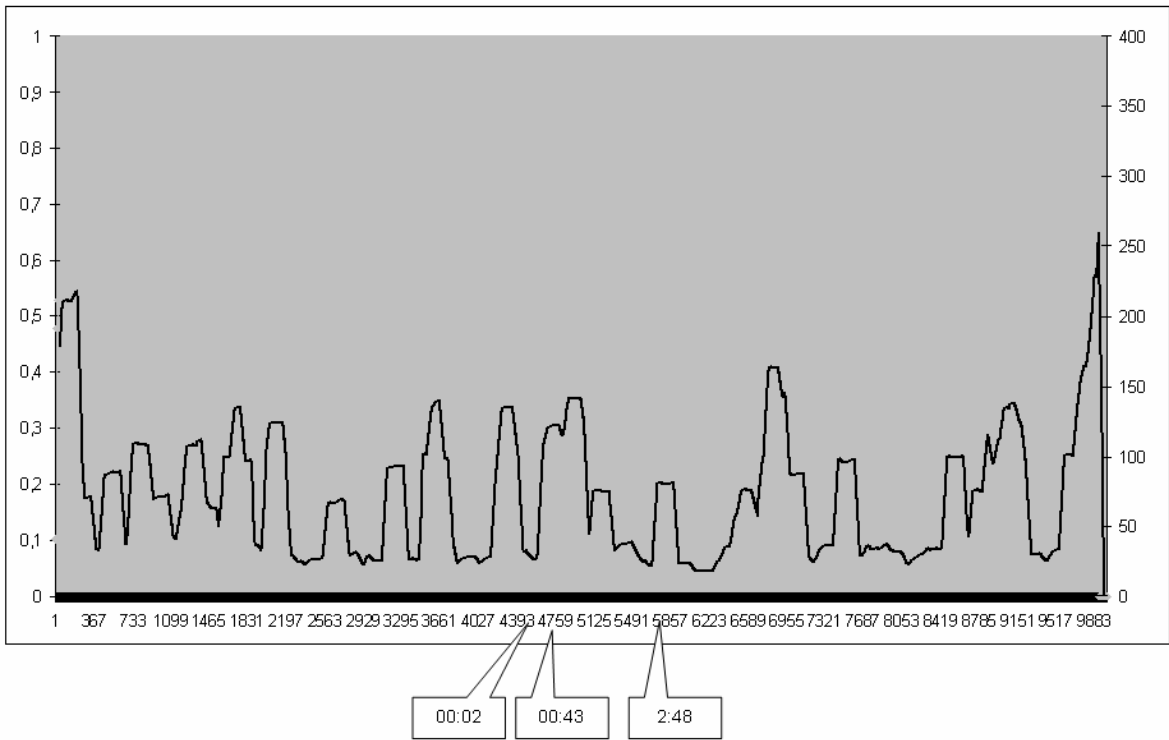


Figura 21 Evolução do desvio padrão das durações da subida (200 amostras)

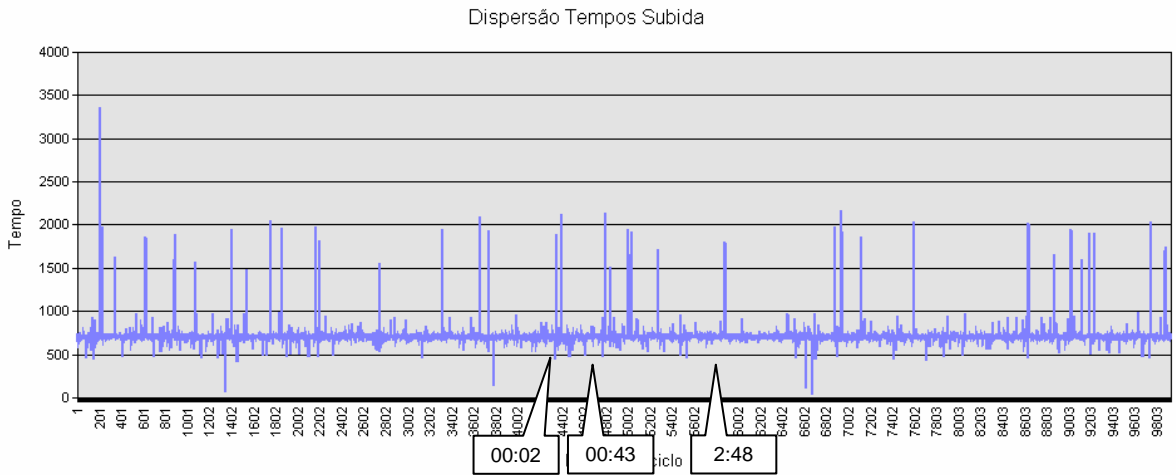


Figura 22 Evolução da duração do ciclo

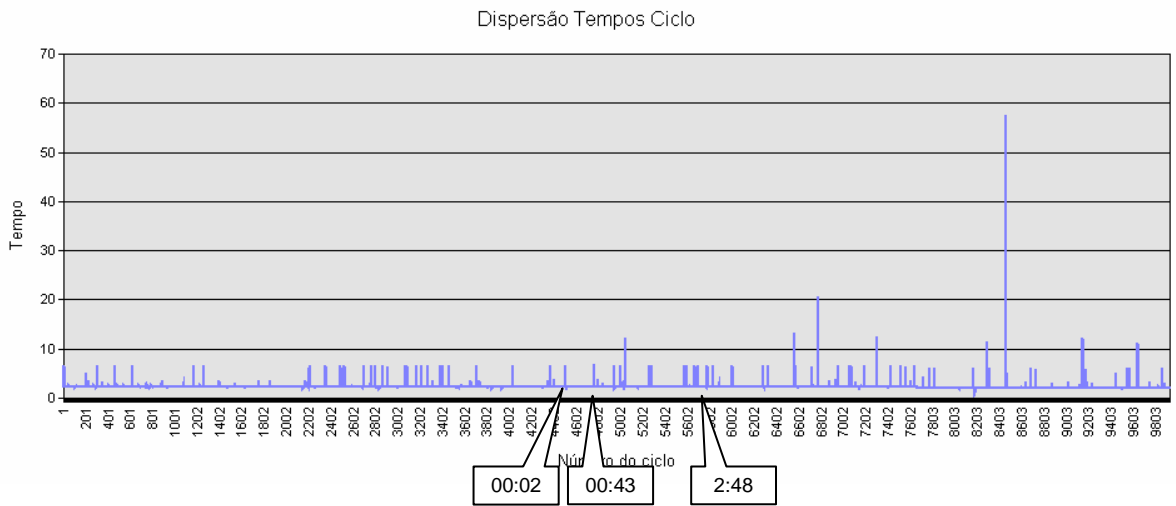


Figura 23 Evolução da duração da subida

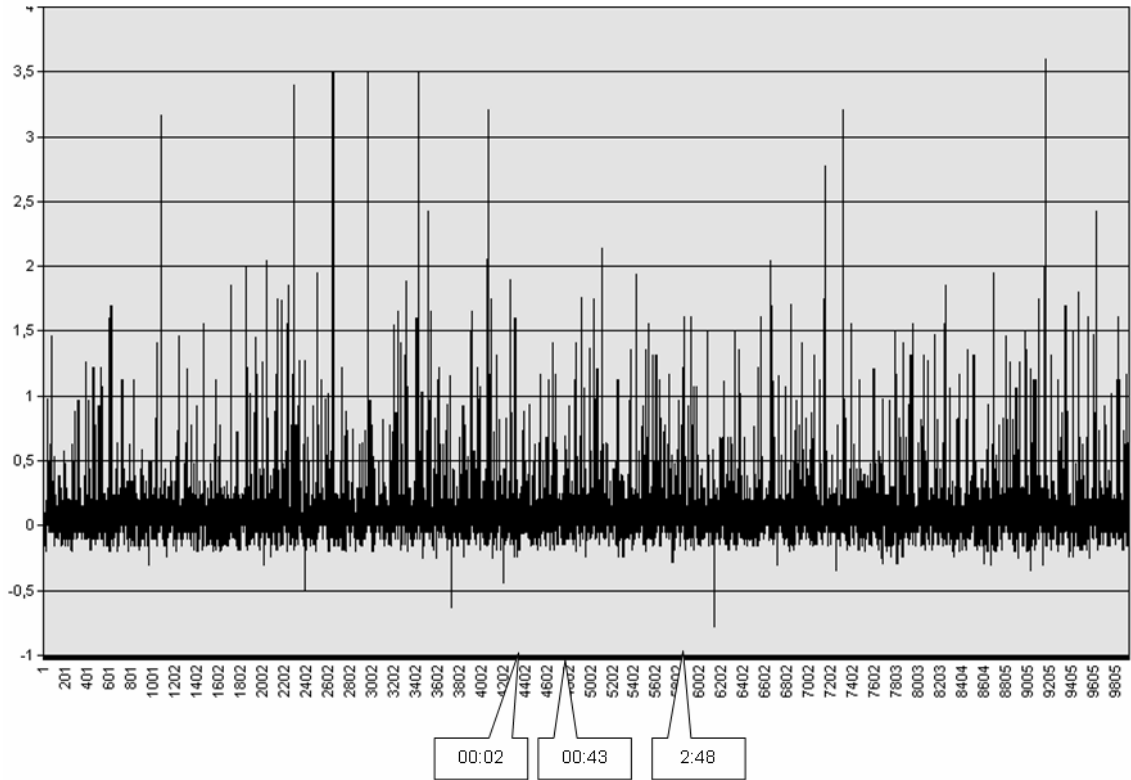


Figura 24 Evolução do erro de posição ao descer

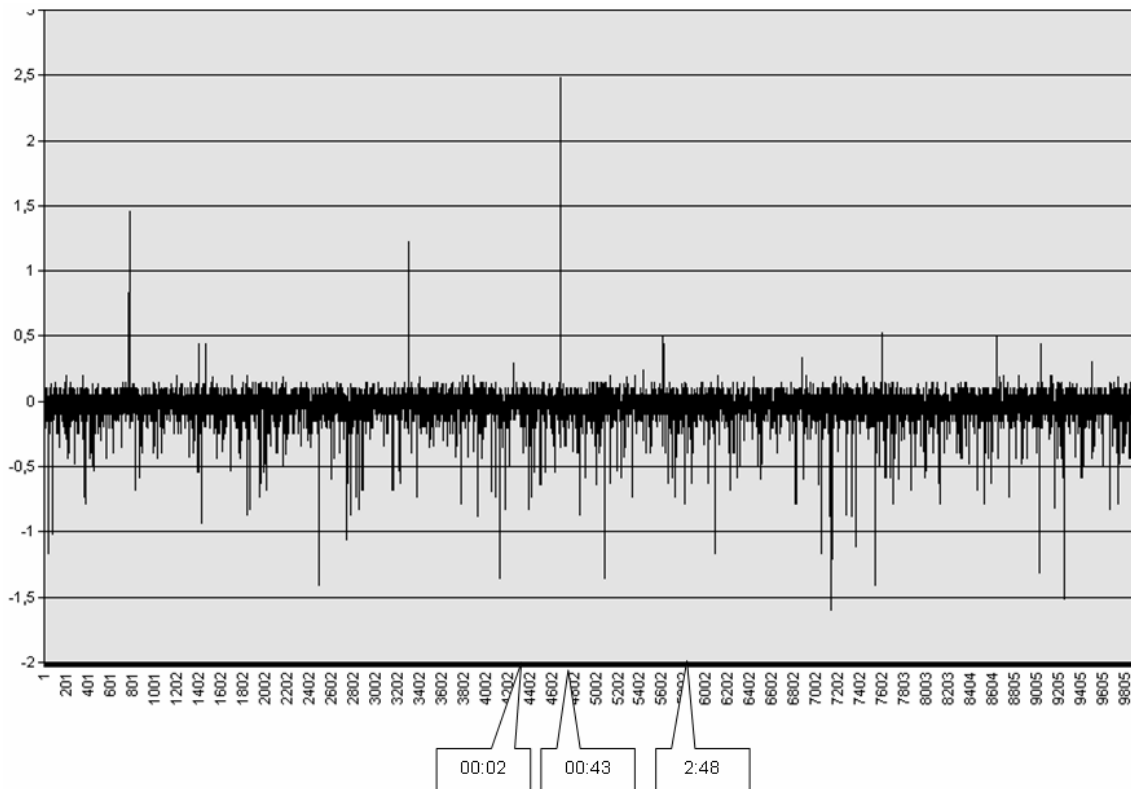


Figura 25 Evolução do erro de posição ao subir

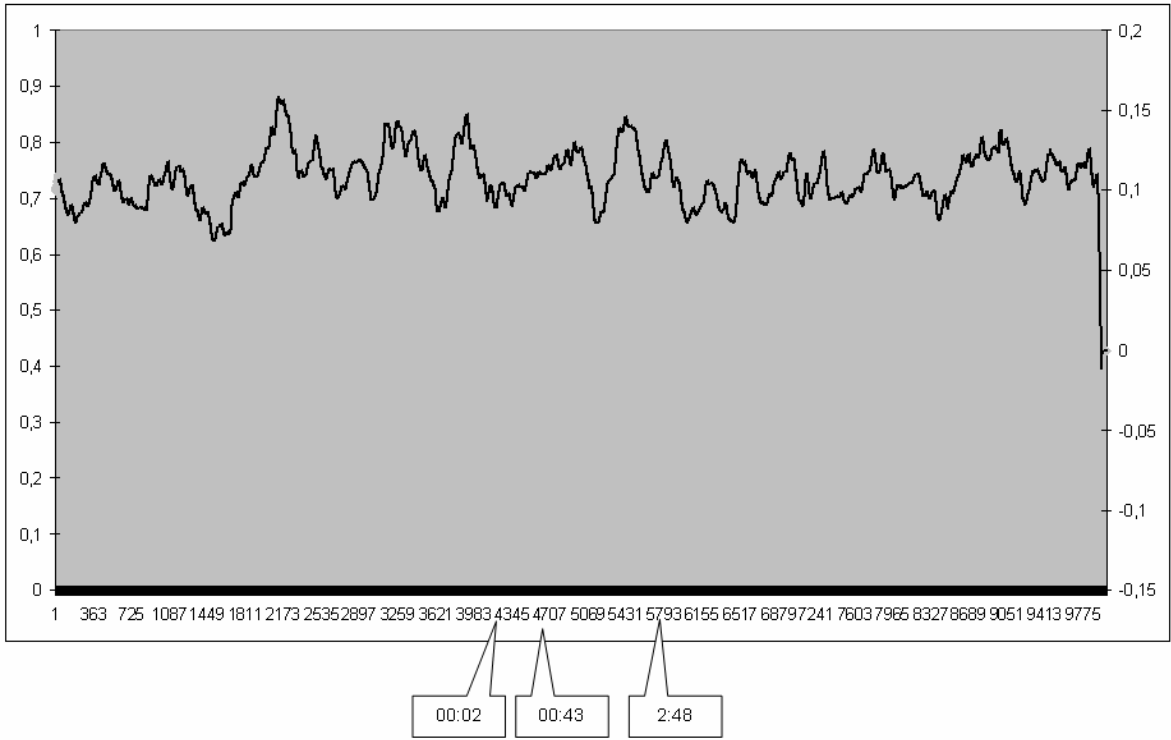


Figura 26 Evolução da média dos erros de posição ao descer (200 amostras)

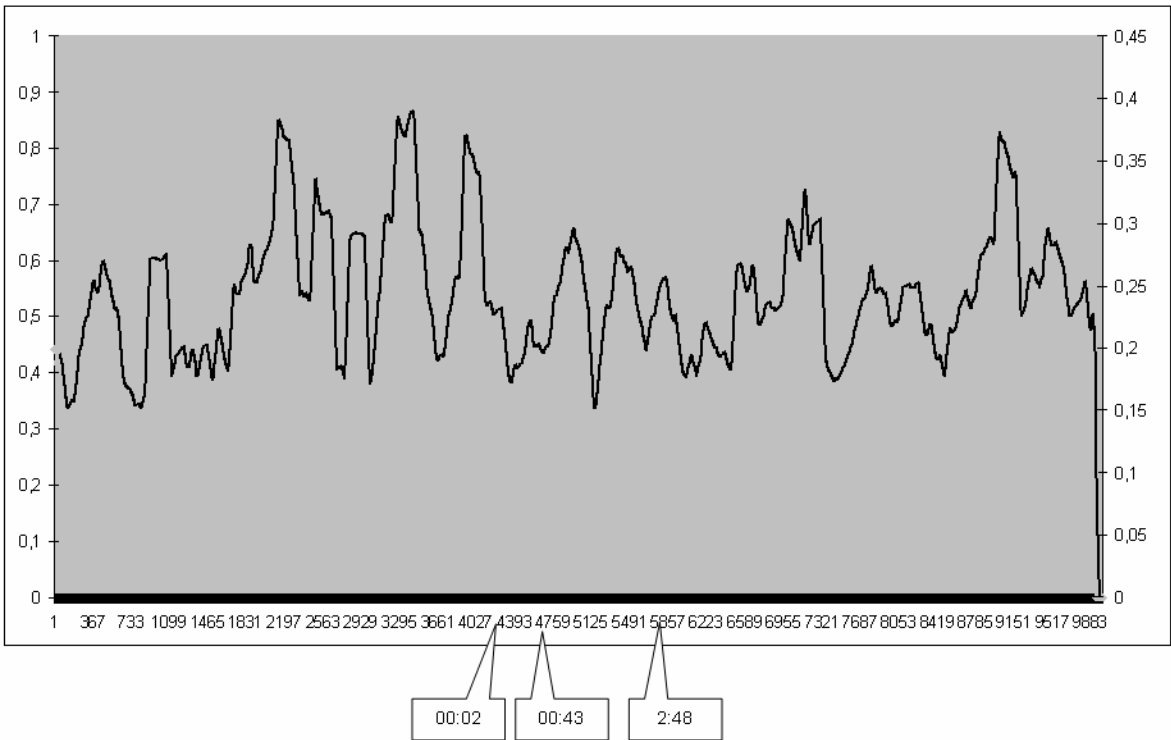


Figura 27 Evolução do desvio padrão dos erros de posição ao descer (200 amostras)

Os gráficos aqui mostrados não permitem uma análise conclusiva. Nota-se que os padrões dos parâmetros em horários próximos às falhas não diferem de outros horários de maneira perceptível.

- A tabela do histórico de falhas não apresenta uma descrição detalhada da falha, tampouco da ação que foi tomada para se corrigir o problema.
- Diversas modificações foram realizadas no sistema da calha de frenagem desde o início da criação do histórico até o momento em que este estudo foi realizado, tais como a inclusão do flip-flop no sistema de controle. Dessa maneira o comportamento da calha de frenagem foi alterado no decorrer da aquisição de dados.

Conclui-se que os dados históricos disponíveis não podem ser aproveitados para ensinar o Watchdog Agent a reconhecer um comportamento faltoso. Torna-se necessário um levantamento de dados mais criterioso e acompanhado com maior atenção.

Pretende-se que, na aquisição dos dados, cada registro seja composto por um determinado número de pontos representando o movimento da calha durante um ciclo completo. Espera-se que as operações e análises realizadas pelo Watchdog Agent coloquem em evidência as informações relevantes da degradação.

3.7 SELEÇÃO DA SOLUÇÃO APROPRIADA

Com o fim de auxiliar na escolha do método apropriado para cada uma das quatro funcionalidades do Watchdog Agent, uma planilha eletrônica foi desenvolvida. Nessa planilha, o usuário entra com dados como capacidade de processamento, estacionariedade do sinal, informações não numéricas do sistema, etc. e os métodos recebem uma nota de acordo com sua indicação de uso.

A figura a seguir mostra a planilha e o resultado fornecido por ela para o caso da calha de frenagem. Na coluna “USER EVALUATION”, são mostradas as entradas atribuídas para este caso específico.

	A	B	C	D	E	F
1	Selection Critiria	USER EVALUATION		Catalog	Available Tools	Rank
2						
3	Stationality	Not sure		Signal Processing & Feature Extraction	Fast Fourier Transform (FFT)	1
4	Impact	Few impact			Time frequency analysis	5
5	Computational capability	Low - ordinary PC			Wavelet packet analysis	4
6	Data amount	Limited (<1000 records)			Autoregressive modeling / filter	3
7	Data dimension	Vector >1D			Expert extracted features	2
8	Expert knowledge	Little knowledge		Performance Assessment	Logistic regression	3
9	Non-numerical information	Unavailable			Statistical pattern recognition	2
10	Prediction scope (short / long)	Short term (<20 steps)			Feature map pattern matching	4
11					CMAC Network pattern match	1
12				Performance Prediction	Match matrix	2
13					ARMA prediction	1
14					Elman recurrent neural network	3
15					Fuzzy logic prediction	4
16				Health Diagnosis	Support vector machine	1
17					Hidden markov model	2
18					Bayesian belief network	3

Figura 28 Interface da ferramenta de seleção dos métodos do Watchdog Agent

Consideraram-se as seguintes características do sistema da calha de frenagem:

- Pouco impacto: as barras estão em movimento e arrastando-se sobre irregularidades da calha. Além disso, os movimentos de subida e descida podem ser afetados por agarramentos.
- Capacidade computacional: trata-se de um computador ordinário.
- Quantidade de dados: inferior a 1000. Como será necessário um novo levantamento de histórico, acredita-se que a quantidade de dados descrevendo ciclos faltosos e ciclos normais não será maior do que 1000. Isso demandará um tempo demasiadamente longo para o levantamento do histórico.

- Dimensão dos dados: atualmente, somente o sensor de posição é monitorado. No entanto, o ideal é que ao menos a temperatura do óleo do sistema hidráulico seja igualmente monitorado.
- Prazo da predição: curto. Algumas falhas se manifestam em pouco tempo.

Desta forma, os métodos mais indicados para cada uma das funcionalidades do Watchdog Agent foram os seguintes:

Ferramentas de processamento de sinais e extração de características:

Time-frequency analysis (Análise tempo-frequência)

Ferramenta de análise da degradação do desempenho:

Feature map pattern matching (Coincidência de padrões de mapa de características)

Ferramenta de predição do desempenho:

Fuzzy logic prediction (Predição por lógica difusa)

Ferramenta de diagnóstico das condições:

Bayesian belief network (Rede de opinião Bayesiana)

4 MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS

O primeiro passo para a implementação da manutenção inteligente é munir o sistema da calha de frenagem com um sistema que permita o monitoramento online das características da calha de frenagem e o levantamento de um histórico contendo as informações necessárias ao Watchdog Agent. Por isso, desenvolveu-se um software de adaptação do sistema composto pelo cartão de controle (HACD) e pelo supervisor (BODAC).

O sistema supervisor (BODAC) apresenta atualmente dois grandes inconvenientes. O primeiro deles é que a limitação do registro de dados é demasiadamente insuficiente: o número de registros máximo que ele consegue gravar sem sobrescrever os dados anteriores é de 5000000 de registros, o que corresponde a aproximadamente 30 horas. Dessa maneira, o sistema atual demanda uma operação diária para que se possa ter controle dos dados. Além de dispendioso, o sistema não é confiável, pois não se pode garantir que o procedimento de armazenamento de dados seja efetuado corretamente a cada vez.

O segundo inconveniente é que o sistema tal como está disposto hoje não oferece uma maneira adequada de monitorar as características. Com o BODAC, não é possível fazer uma extração em tempo real de dados relevantes como o tempo de descida da calha, o tempo de subida, o tempo de ciclo, as médias das posições alta e baixa da calha, etc. Essa análise só é possível após o término da gravação dos parâmetros monitorados, o que ocorre a cada 24 horas, aproximadamente. Além disso, a análise de dados relevantes só se faz para os casos em que ocorre uma falha. Assim, o foco da manutenção atual está na falha e não na degradação.

Por isso, foi desenvolvido um software que pudesse aproveitar as funcionalidades do sistema supervisor existente (o BODAC) para alimentar o Watchdog Agent e com isso implementar um sistema de manutenção inteligente. O objetivo não era de desenvolver um software que realizasse as mesmas funções do BODAC de maneira mais adequada, pois isso

fugiria do objetivo deste trabalho. Ao invés disso, procurou-se desenvolver um software que utilizasse todas as informações que o BODAC dispõe.

As seguintes etapas foram seguidas:

1. Montar um sistema que se interponha à comunicação entre o supervisor (BODAC) e o cartão de controle (HACD).
2. Interpretar o protocolo de comunicação específico deste sistema.
3. Desenvolver um software de leitura e tratamento dos dados

4.1 MONTAGEM DO SISTEMA DE MONITORAÇÃO DA COMUNICAÇÃO

Como o objetivo do sistema adaptável ao Watchdog Agent não é de substituir o BODAC, montou-se um esquema que interpôs um terceiro elemento na comunicação. Esse terceiro elemento somente recebe dados, ou seja, ele não interfere na comunicação entre o BODAC e o HACD. O esquema abaixo ilustra a montagem realizada:

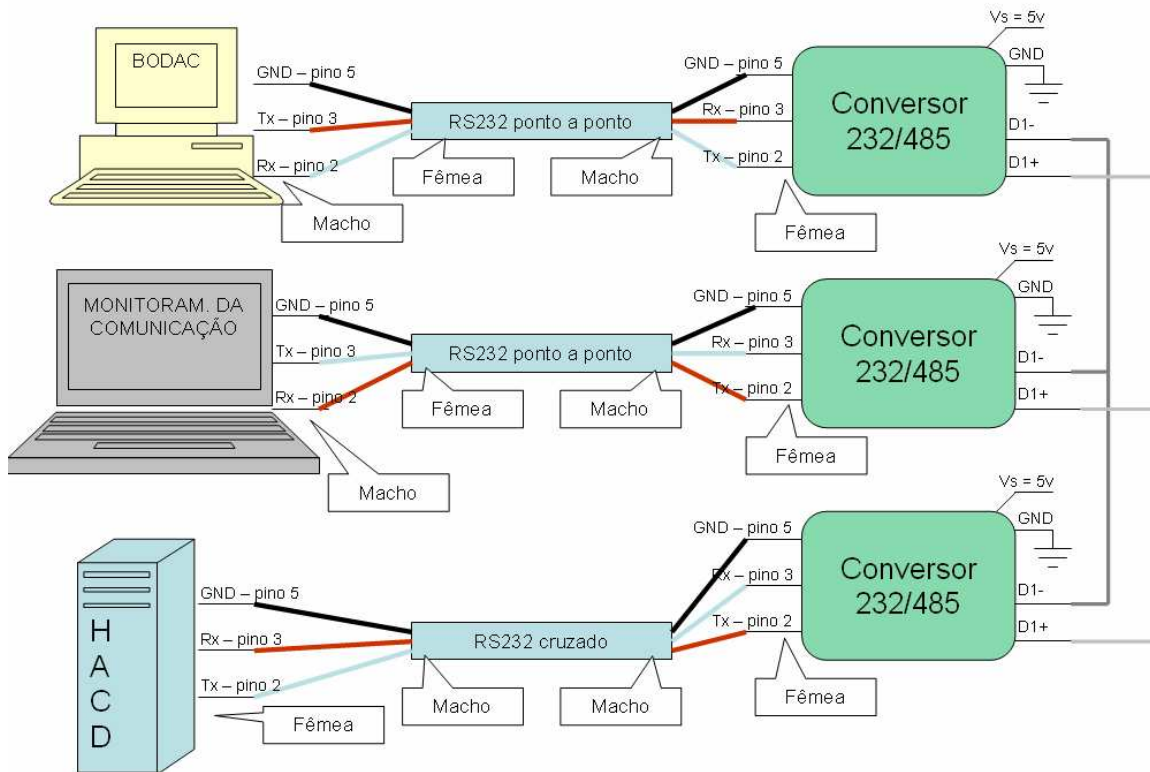


Figura 29 Esquema de ligação dos elementos de comunicação

Foi necessária a conversão de RS232 para RS485 porque a norma RS232 não prevê a conexão entre mais do que dois elementos.

Também foi montada uma bancada para os testes necessários, simulando o sistema composto pelo cartão HACD e todos os sinais envolvidos (entradas e saídas digitais do PLC da ABB, posição da calha lida pela régua, sinal da válvula, etc). A figura abaixo mostra a bancada.

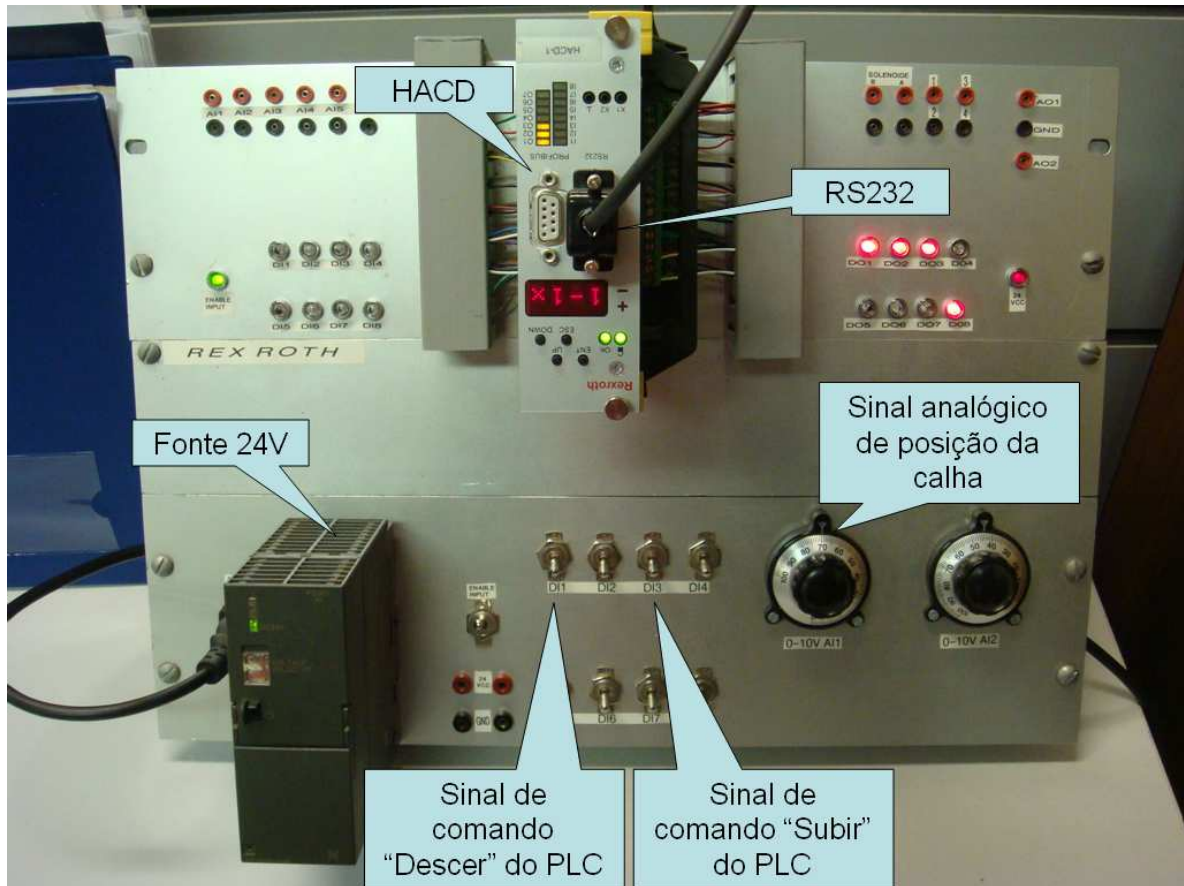


Figura 30 Bancada de simulação para o cartão HACD

4.2 INTERPRETAÇÃO DO PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

O protocolo de comunicação entre o BODAC e o HACD não foi informado pelo fabricante, por isso foi necessário realizar uma investigação com o auxílio da bancada de simulação. No terminal de monitoramento, foi desenvolvido um programa em VBA de leitura dos dados da porta serial, os quais são guardados em uma planilha Excel.

A interface desse programa está ilustrada abaixo, e o programa em VBA está no Anexo I.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa	Adquirir dados			Apagar dados		
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										

Dados entre BODAC e HACD / Rascunho (2) /

Figura 31 Interface para investigação do protocolo de comunicação

Procedendo-se a diversos testes e análises, pode-se chegar a conclusões satisfatórias quanto ao protocolo de comunicação. No Anexo II, pode-se ver as conclusões com detalhes. Tais conclusões permitiram o desenvolvimento de um software de leitura online e tratamento dos dados de comunicação entre o HACD e o BODAC.

4.3 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE DE LEITURA E TRATAMENTO DOS DADOS

Dominando-se o protocolo de comunicação entre o BODAC e o HACD, é possível agora utilizar o esquema do sistema de monitoramento da comunicação para realizar a aquisição e armazenamento de dados de forma mais conveniente. Por isso, desenvolveu-se um software de leitura e tratamento dos dados que apresenta as seguintes inovações:

- Armazenamento automático dos arquivos. Isso descarta a necessidade de operação diária do BODAC para se armazenar os dados gravados. Além disso, torna o histórico mais confiável, pois evita perda de dados por negligência por parte da operação.

- Registro do horário de ocorrência de cada ciclo. O BODAC, ao contrário desse novo software, registra os milissegundos que transcorreram após o início da gravação. Assim, para a análise de dados era necessário efetuar alguns cálculos simples, porém dispendiosos para se obter os horários.

O software recebeu o nome de MyBODAC por ter funcionalidades muito próximas do próprio BODAC, porém com algumas inovações. O MyBODAC foi concebido em Microsoft Access, com a integração de VBA, em função do grande número de registros diários (da ordem de 1000000), fato que torna inconveniente o uso de Microsoft Excel (onde já se tinha desenvolvido a ferramenta de monitoramento de comunicação, como descrito no item anterior).

O MyBODAC executa as seguintes operações:

- Identificação das partes da mensagem
- Estocagem de ciclos completos de comunicação em uma tabela de 10000 registros ou caracteres (Tabela A). O horário do início de cada ciclo também é armazenado. Quando a Tabela A está cheia, a estocagem passa automaticamente para a Tabela B, escrevendo por cima dos registros da mesma.
- Uma rotina em paralelo copia os dados da Tabela A ou B assim que esta ficar cheia, realiza a “interpretação” dos dados de comunicação (ou seja, retira os valores dos parâmetros horário, LC1, FB1-1, LC1-LFB1, OUT2d32, DI1, DI3, DO1 e DO3) e armazena os dados interpretados em uma Tabela C ou D.
- A cada mês, alterna-se a tabela do armazenamento (Tabela C ou D) e os dados começam a ser sobrescritos. Isso impede que o espaço livre em disco do computador chegue ao fim e demanda uma operação mensal do MyBODAC. Dessa maneira, ao invés de diariamente, a operação deve ser programada para fazer um backup dos dados uma vez por mês.

A figura a seguir ilustra o funcionamento do algoritmo usado. Entenda-se, pelas cores utilizadas nas flechas que entram e saem das tabelas A e B, que o tratamento de dados se faz na tabela que não está estocando os dados correntes (ou seja, na tabela que havia estocado dados anteriormente).

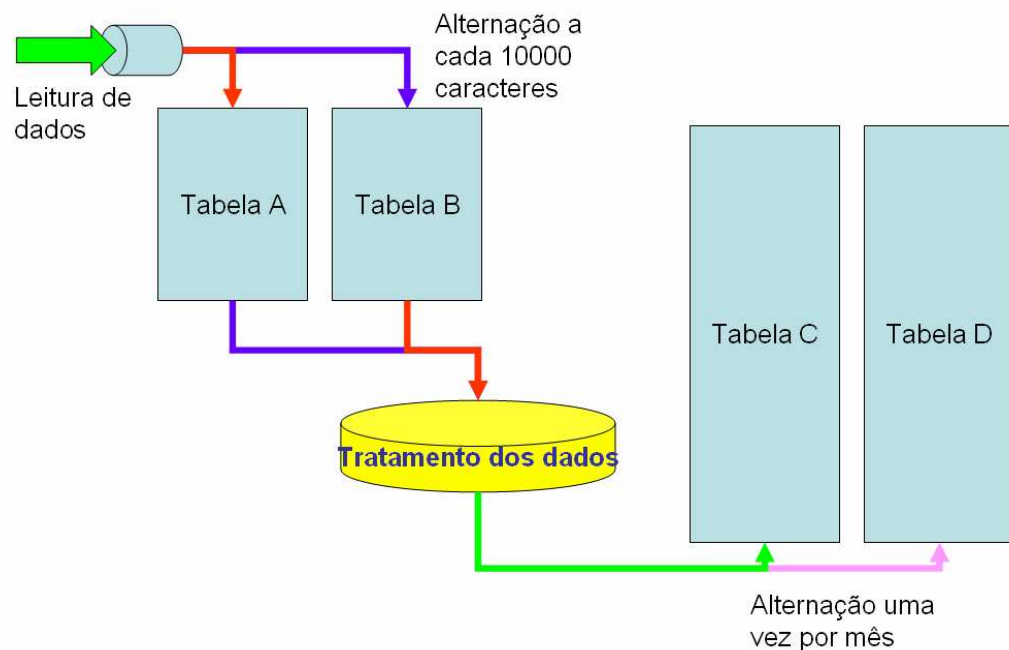


Figura 32 Esquema do funcionamento do MyBODAC

Além do MyBODAC, foi necessário ainda desenvolver um programa de geração de arquivos utilizáveis pelo Watchdog Agent e uma adaptação da ferramenta de estratificação dos arquivos PLT.

A nova ferramenta de estratificação de dados, chamada *ANALISADOR CALHA v MyBODAC.mdb*, leva em conta algumas modificações como não haver mais necessidade de se calcular o horário de cada ciclo. Essa ferramenta pode ser utilizada sempre que se precisar fazer alguma análise estatística dos ciclos gravados.

O programa de geração de arquivos utilizáveis pelo Watchdog Agent, chamado *Gerador de arquivos WA.mdb*, é usado para gravar em diferentes arquivos cada ciclo da calha registrado, conforme requerimento do próprio Watchdog Agent.

O *Gerador de arquivos WA* grava em cada arquivo os 30 pontos seguintes ao início de cada ciclo. O início de cada ciclo se dá com o disparo do comando de descida enviado pelo PLC da ABB, ou seja, quando D11 se torna ON. 30 pontos correspondem a aproximadamente 3 segundos, garantindo a inclusão de todos os pontos de um único ciclo e que nenhum ponto do próximo ciclo seja incluído.

Os arquivos gerados dessa forma permitirão, com o uso do Watchdog Agent, uma análise com mais ferramentas matemáticas, o que levará a resultados mais conclusivos do que os que puderam ser obtidos com a ferramenta de estratificação dos dados.

Além disso, o *Gerador de arquivos WA* poderá ser modificado no futuro para que a análise efetuada pelo Watchdog Agent ocorra automaticamente e periodicamente, de maneira a se realizar efetivamente o sistema de manutenção inteligente.

4.4 PROPOSTAS PARA O FUTURO

A implementação desse trabalho limitou-se aos softwares de aquisição, armazenamento e análise de dados e ao software de geração de arquivos utilizáveis pelo Watchdog Agent. No entanto, é interessante e necessário que se dê continuidade às próximas etapas até a realização final de um sistema de manutenção inteligente.

Para isso, propõem-se as seguintes ações a serem postas em prática na continuidade do trabalho:

- Instalação de um sensor de temperatura e um sensor de pressão do óleo com registro por algum sistema apropriado.
- Correções no projeto mecânico do sistema.

- Acompanhamento detalhado da produção. Deve-se tomar nota de cada evento ocorrido (descrição, horário, causa identificada e solução adotada), produzindo assim um histórico de falhas relacionado de maneira confiável a um conjunto de arquivos gerados para o Watchdog Agent. Cada falha identificada deve ter seu próprio conjunto de arquivos gerados para o Watchdog Agent. Também deve-se gerar um conjunto de arquivos correspondendo a um funcionamento normal da calha de frenagem.
- Tendo-se criado o histórico, analisar os resultados fornecidos pelo Watchdog Agent, procurando-se estabelecer um critério para decidir sobre a necessidade de realização de uma intervenção. Os valores de confiança (CV) devem ser analisados para se identificar qual o valor mínimo que estes podem assumir sem necessidade de intervenção.
- Realizar a análise com o Watchdog Agent periodicamente para se verificar a coerência dos critérios adotados.
- Após o estabelecimento de uma manutenção preditiva confiável com o auxílio do Watchdog Agent, automatizar o processo de análise, predição e diagnóstico integrando o Watchdog Agent a um software que deverá acionar as funcionalidades do mesmo. Além disso, o software poderá notificar o responsável pela manutenção da calha de frenagem quando o sistema estiver próximo de uma falha enviando-lhe um email contendo informações de predição e diagnóstico.

Com a realização dessas ações, o sistema de manutenção inteligente será implementado e funcional.

5 RESULTADOS ALCANÇADOS

O trabalho chega neste ponto com resultados parciais, mas é possível fazer estimativas do ganho que será obtido quando o projeto for concluído na sua totalidade.

Com o sistema de aquisição de dados implementado, agora é possível armazenar dados automaticamente sem necessidade de uma operação freqüente. Com os dados levantados, é possível realizar estudos mais aprofundados, pois os dados são abundantes, confiáveis e completos.

Atualmente as paradas de produção devido à calha de frenagem provocam perdas de R\$ 831,26 por minuto. Tomando-se a média das interrupções para os últimos quatro meses (53 minutos por mês), chega-se num total de R\$ 44.000,00 de perdas mensais.

Infelizmente, não se pode prever o quanto a manutenção inteligente tornará o sistema da calha de frenagem mais eficiente. No entanto, se a implementação de um sistema de manutenção inteligente for capaz de reduzir somente 50% dessas perdas, o seu benefício será de R\$ 22.000,00 mensais. Esse ganho é notável o suficiente para se justificar a opção pela Manutenção Inteligente.

6 CONCLUSÃO

A realização desse trabalho permitiu constatar-se que um Sistema de Manutenção Inteligente pode ser aplicado com sucesso. Percebe-se que os sistemas como o que foi desenvolvido trazem um ganho econômico considerável para a Manutenção de uma indústria. Nesse trabalho foram abordados não só benefícios econômicos, mas também facilidades que surgem e o ganho de informações com a integração da Manutenção Preditiva a um sistema automatizado. Embora a implementação parcial do projeto em questão já tenha trazido diversos benefícios, cabe lembrar que é de forte interesse que os próximos passos para a implementação do sistema, expostos no quarto capítulo, sejam colocados em prática.

No entanto, deve-se ressaltar que a base de uma boa gestão da manutenção está em se determinar qual a melhor prática a ser adotada em cada caso particular. Existem muitas considerações a serem feitas e que não foram abordadas ao longo desse trabalho. É com o objetivo de apontar a solução ideal que se usam os métodos contidos na Manutenção Centrada em Confiabilidade, assunto tratado brevemente no segundo capítulo.

A aplicação de Sistemas de Manutenção Inteligente pode ser expandida ainda a um grande número de sistemas. É necessário que estudos continuem sendo realizados para se entender os diversos processos da indústria e qual a melhor utilização dos Sistemas de Manutenção Inteligente. Futuros trabalhos devem considerar especialmente o desenvolvimento de novos e melhores métodos de predição.

REFERÊNCIAS

AES. **Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM)**. AES Tietê. 2007.

AUTOMATION. **Smart Sensor and Prognostics for Self-Maintenance Machines**. Disponível em: <<http://www.automation.com/resources-tools/application-stories/machine-monitoring-control/smart-sensor-and-prognostics-for-self-maintenance-machines>>. Acesso em: 9 de Junho de 2009.

DIAGNETICS. **What is Proactive Maintenance?** Disponível em: <<http://www.maintenanceresources.com/referencelibrary/oilanalysis/oa-what.htm>>. Acesso em: 9 de Junho de 2009.

DJURDJANOVIC. D.; LEE, J.; NI, J. **Intelligent prognostic tools and e-maintenance**. Advanced Engineering Informatics. 2003.

DJURDJANOVIC. D.; LEE, J.; NI, J. **Watchdog Agent™ - an Infotronics-Based Prognostics Approach for Product Performance Degradation Assessment and Prediction**. Advanced Engineering Informatics. [S. l.] v. 17, p. 109-125, Jul.-Out. 2003.

GERDAU. **Treinamento Calha de Frenagem**. Auto-treinamento Gerdau Riograndense Aços Longos. 2009.

GERDAU. **Workshop Calha de Frenagem**. Auto-treinamento Gerdau Riograndense Aços Longos. 2009.

GRIER, R. L. **NETCommOCX Information Page**. Hard & Software. Disponível em: <<http://home.comcast.net/~hardandsoftware/NETCommOCX.htm>>. Acesso em: 9 de Junho de 2009.

IEEE. **IEEE Standard Glossary of Computer Hardware Terminology**. Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York, NY. 109 p. 1994.

IMS CENTER. **Watchdog Agent™ Toolbox Documentation**. p. 1-22. Mai. 2007.

IMS CENTER. **Center for Intelligent Maintenance Systems**. Disponível em: <<http://www.imscenter.net>>. Acesso em: 9 de Junho de 2009.

LAZZARETTI, E. P. **Implementação de um sistema de manutenção inteligente: estudo de caso**. Projeto de Diplomação - Programa de Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2007.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM)**. Aladon Ltd. 2003.

TAITI, J. R. C.; CHIACCHIO, S. S. **O Papel da Engenharia de Manutenção no Gerenciamento de Riscos**. SENAC. Santo Amaro. 2009.

ANEXO I:

Investigação dos Dados de Comunicação

ANEXO I – INVESTIGAÇÃO DOS DADOS DE COMUNICAÇÃO

O código a seguir foi incluído dentro do seguinte formulário:

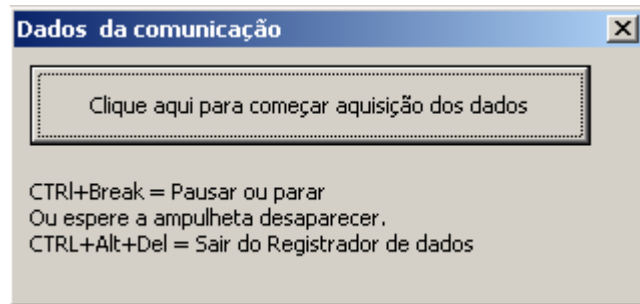


Figura 33 Formulário de aquisição dos dados de comunicação

Ao se clicar no botão, é disparado o código. Para se ter acesso à porta serial, foi necessário instalar um objeto gratuito desenvolvido para este fim: o NETcomm OCX Driver (GRIER, 2009).

```

*****
Private Sub CommandButton1_Click()
ContinueTheMacro
End Sub
*****

*****
Private Sub UserForm_Terminate()
'Close serial port on exit
On Error Resume Next 'Error handler

If NETComm1.PortOpen = True Then 'check if the serial port is open
NETComm1.PortOpen = False 'close the serial port
End If
If Err Then MsgBox Error$, 48 'Display error in message box
Unload UserForm1
End Sub
*****

*****
Sub ContinueTheMacro()
Dim b As Byte
Dim Duracao As Long
Dim StartReading As String
Dim Comprimento As Long

```

```
Dim Bits As String
Dim Caracter As String
```

```
MsgBox ("Esta aplicação roda por cerca de 5 minutos.")
```

```
Application.Cursor = xlWait
Duracao = 4000000
```

```
'Abrimos a porta serial:
```

```
' On Error Resume Next 'Error handler
  If NETComm1.PortOpen = False Then 'check if the serial port is open
    NETComm1.PortOpen = True 'check if the serial port is open
  End If
' If Err Then MsgBox Error$, 48 'Display error in message box
```

```
'Lemos o número de casas decimais na porta serial
'e definimos as constantes de divisão:
StartReading = NETComm1.InputData
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)
```

```
'Aqui recebe os valores e os armazena em strings:
```

```
*****
```

```
'Para aumentar ou diminuir o numero de strings que eu quero receber,
'basta localizar no código abaixo, entre os asteriscos, a quote mark "",
'e substitui-la por "". Fazer o mesmo para a parte da transcrição,
'mais abaixo. Aqui começa o código:
```

```
*****
```

```
*****
```

```
StartReading = NETComm1.InputData
Comprimento = Len(StartReading)
If Comprimento = 4096 Then
  MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
  GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)
```

```
StartReading1 = NETComm1.InputData
Comprimento1 = Len(StartReading1)
If Comprimento1 = 4096 Then
  MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
  GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)
```

```
StartReading2 = NETComm1.InputData
Comprimento2 = Len(StartReading2)
If Comprimento2 = 4096 Then
```

```
    MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
    GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)

StartReading3 = NETComm1.InputData
Comprimento3 = Len(StartReading3)
If Comprimento3 = 4096 Then
    MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
    GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)

StartReading4 = NETComm1.InputData
Comprimento4 = Len(StartReading4)
If Comprimento4 = 4096 Then
    MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
    GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)

StartReading5 = NETComm1.InputData
Comprimento5 = Len(StartReading5)
If Comprimento5 = 4096 Then
    MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
    GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)

StartReading6 = NETComm1.InputData
Comprimento6 = Len(StartReading6)
If Comprimento6 = 4096 Then
    MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
    GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)

StartReading7 = NETComm1.InputData
Comprimento7 = Len(StartReading7)
If Comprimento7 = 4096 Then
    MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
    GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)

StartReading8 = NETComm1.InputData
Comprimento8 = Len(StartReading8)
If Comprimento8 = 4096 Then
    MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
    GoTo Terminar
```

```

End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)

StartReading9 = NETComm1.InputData
Comprimento9 = Len(StartReading9)
If Comprimento9 = 4096 Then
    MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
    GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)

StartReading10 = NETComm1.InputData
Comprimento10 = Len(StartReading10)
If Comprimento10 = 4096 Then
    MsgBox ("Não ta pegando tudo. Diminuir espera.")
    GoTo Terminar
End If
ActionNow = RotinaDeEspera(Duracao)

```

```

'*****
'*****

```

```
LastWritten = 1
```

```
'Aqui transcreve os valores recebidos:
```

```
'*****
```

```
'Esta parte também deve ser alterada quando eu quiser alterar o numero de
'strings:
```

```

'*****
'*****

```

```

For i = 1 To Comprimento
    Carácter = Mid(StartReading, i, 1)
    b = Asc(Mid(StartReading, i, 1))

    On Error GoTo Terminar
    Range("C" & LastWritten + i).Activate
    ActiveCell.Value = Carácter
    ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
    If i = Comprimento Then
        ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento
    End If
Next
LastWritten = ActiveCell.Row

```



```

For i = 1 To Comprimento1
  Character = Mid(StartReading1, i, 1)
  b = Asc(Mid(StartReading1, i, 1))

  On Error GoTo Terminar
  Range("C" & LastWritten + i).Activate
  ActiveCell.Value = Character
  ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
  If i = Comprimento1 Then
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento1
  End If
Next
LastWritten = ActiveCell.Row

For i = 1 To Comprimento2
  Character = Mid(StartReading2, i, 1)
  b = Asc(Mid(StartReading2, i, 1))

  On Error GoTo Terminar
  Range("C" & LastWritten + i).Activate
  ActiveCell.Value = Character
  ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
  If i = Comprimento2 Then
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento2
  End If
Next
LastWritten = ActiveCell.Row

For i = 1 To Comprimento3
  Character = Mid(StartReading3, i, 1)
  b = Asc(Mid(StartReading3, i, 1))

  On Error GoTo Terminar
  Range("C" & LastWritten + i).Activate
  ActiveCell.Value = Character
  ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
  If i = Comprimento3 Then
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento3
  End If
Next
LastWritten = ActiveCell.Row

For i = 1 To Comprimento4
  Character = Mid(StartReading4, i, 1)
  b = Asc(Mid(StartReading4, i, 1))

  On Error GoTo Terminar
  Range("C" & LastWritten + i).Activate
  ActiveCell.Value = Character
  ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b

```

```

    If i = Comprimento4 Then
        ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento4
    End If
Next
LastWritten = ActiveCell.Row

For i = 1 To Comprimento5
    Character = Mid(StartReading5, i, 1)
    b = Asc(Mid(StartReading5, i, 1))

    On Error GoTo Terminar
    Range("C" & LastWritten + i).Activate
    ActiveCell.Value = Character
    ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
    If i = Comprimento5 Then
        ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento5
    End If
Next
LastWritten = ActiveCell.Row

For i = 1 To Comprimento6
    Character = Mid(StartReading6, i, 1)
    b = Asc(Mid(StartReading6, i, 1))

    On Error GoTo Terminar
    Range("C" & LastWritten + i).Activate
    ActiveCell.Value = Character
    ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
    If i = Comprimento6 Then
        ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento6
    End If
Next
LastWritten = ActiveCell.Row

For i = 1 To Comprimento7
    Character = Mid(StartReading7, i, 1)
    b = Asc(Mid(StartReading7, i, 1))

    On Error GoTo Terminar
    Range("C" & LastWritten + i).Activate
    ActiveCell.Value = Character
    ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
    If i = Comprimento7 Then
        ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento7
    End If
Next
LastWritten = ActiveCell.Row

For i = 1 To Comprimento8
    Character = Mid(StartReading8, i, 1)

```

```
b = Asc(Mid(StartReading8, i, 1))
```

```
On Error GoTo Terminar
Range("C" & LastWritten + i).Activate
ActiveCell.Value = Character
ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
If i = Comprimento8 Then
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento8
End If
```

```
Next
LastWritten = ActiveCell.Row
```

```
For i = 1 To Comprimento9
    Character = Mid(StartReading9, i, 1)
    b = Asc(Mid(StartReading9, i, 1))
```

```
On Error GoTo Terminar
Range("C" & LastWritten + i).Activate
ActiveCell.Value = Character
ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
If i = Comprimento9 Then
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento9
End If
```

```
Next
LastWritten = ActiveCell.Row
```

```
For i = 1 To Comprimento10
    Character = Mid(StartReading10, i, 1)
    b = Asc(Mid(StartReading10, i, 1))
```

```
On Error GoTo Terminar
Range("C" & LastWritten + i).Activate
ActiveCell.Value = Character
ActiveCell.Offset(0, -2).Value = b
If i = Comprimento10 Then
    ActiveCell.Offset(0, 2).Value = Comprimento10
End If
```

```
Next
LastWritten = ActiveCell.Row
```

```
*****
*****
*****
*****
*****
```

```
Terminar:
```

```
WhatNow = Traducoes(LastWritten)
Application.Cursor = xlDefault
```

```
If NETComm1.PortOpen = True Then 'check if the serial port is open
    NETComm1.PortOpen = False 'close the serial port
End If
```

```

With UserForm1
    .Hide
End With
Range("A1").Select
End Sub
'*****

'*****
Function RotinaDeEspera(Duracao As Long)
    j = 0
    For i = 1 To Duracao
        j = j + 1
    Next
End Function
'*****

'*****
Function Traducoes(ultima)

Dim b As Byte
Dim Comprimento As Long
Dim Bits As String
Dim Caracter As String

For i = 2 To ultima

Range("A" & i).Activate
b = ActiveCell.Value

    bit7 = b \ 128
    resto = b Mod 128
    bit6 = resto \ 64
    resto = resto Mod 64
    bit5 = resto \ 32
    resto = resto Mod 32
    bit4 = resto \ 16
    resto = resto Mod 16
    bit3 = resto \ 8
    resto = resto Mod 8
    bit2 = resto \ 4
    resto = resto Mod 4
    bit1 = resto \ 2
    bit0 = resto Mod 2
    Bits = bit7 & bit6 & bit5 & bit4 & bit3 & bit2 & bit1 & bit0
    hexa1 = b \ 16
    hexa0 = b Mod 16
    Select Case hexa1
    Case 10

```

```
    hexa1 = "A"  
Case 11  
    hexa1 = "B"  
Case 12  
    hexa1 = "C"  
Case 13  
    hexa1 = "D"  
Case 14  
    hexa1 = "E"  
Case 15  
    hexa1 = "F"  
End Select  
  
Select Case hexa0  
Case 10  
    hexa0 = "A"  
Case 11  
    hexa0 = "B"  
Case 12  
    hexa0 = "C"  
Case 13  
    hexa0 = "D"  
Case 14  
    hexa0 = "E"  
Case 15  
    hexa0 = "F"  
End Select  
  
Hexad = hexa1 & hexa0  
ActiveCell.Offset(0, 1).Value = Bits  
ActiveCell.Offset(0, 3).Value = Hexad  
Next  
End Function  
'*****
```

ANEXO II:

Conclusões Sobre o Protocolo do Bodac

ANEXO II – CONCLUSÕES SOBRE O PROTOCOLO DO BODAC

Existem dois principais modos de comunicação do sistema BODAC/HACD. O mais freqüente é o modo Motion Data, no qual o BODAC envia constantemente mensagens ao HACD e espera a resposta deste informando os valores de suas diversas variáveis. Fora do Motion Data, o BODAC apenas verifica se a conexão com o HACD continua estabelecida, e a gravação dos parâmetros ao longo do tempo não ocorre.

FORA DO MODO MOTION DATA

Fora do modo Motion Data, o BODAC manda periodicamente a seguinte mensagem de 10 bytes:

Tabela 2 Mensagem do BODAC fora do Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
65	01000001	A	41
82	01010010	R	52
225	11100001	á	E1
240	11110000	ð	F0
16	00010000	†	10
0	00000000		0
1	00000001		1
1	00000001		1
18	00010010	‡	12

A resposta do cartão, quando conectado, é:

Tabela 3 Resposta do HACD fora do Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
255	11111111	ÿ	FF
255	11111111	ÿ	FF

EM MODO MOTION DATA

Em modo Motion Data, o Bodac manda ciclicamente quatro mensagens de 9 bytes, que são, na ordem em que são enviadas, as seguintes:

Tabela 4 Mensagem 1 do BODAC em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
65	01000001	A	41
82	01010010	R	52
220	11011100	Û	DC
240	11110000	ð	F0
16	00010000	†	10
0	00000000		0
2	00000010		2
44	00101100	,	2C

Tabela 5 Mensagem 2 do BODAC em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
65	01000001	A	41
82	01010010	R	52
6	00000110		6
192	11000000	À	C0
16	00010000	†	10
0	00000000		0
2	00000010		2
198	11000110	Æ	C6

Tabela 6 Mensagem 3 do BODAC em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
65	01000001	A	41
82	01010010	R	52
20	00010100	ŕ	14
240	11110000	ð	F0
16	00010000	†	10
0	00000000		0
4	00000100		4
226	11100010	â	E2

Tabela 7 Mensagem 4 do BODAC em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
65	01000001	A	41
82	01010010	R	52
84	01010100	T	54
240	11110000	ð	F0
16	00010000	†	10
0	00000000		0
44	00101100	,	2C
138	10001010	Š	8A

Em modo Motion Data – 1ª parte

A primeira parte da comunicação é a mensagem enviada pelo BODAC:

Tabela 8 Mensagem 1 do BODAC em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
65	01000001	A	41
82	01010010	R	52
220	11011100	Ü	DC
240	11110000	ð	F0
16	00010000	†	10
0	00000000		0
2	00000010		2
44	00101100	,	2C

Essa mensagem solicita o estado das entradas digitais.

Em modo Motion Data – 1ª parte – resposta do HACD1ª parte da resposta do HACD

O primeiro byte enviado pelo HACD mostra o estado da entrada Enable Input.

Quando Enable Input é OFF, o byte enviado é o seguinte:

Tabela 9 Mensagem 1.1 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
0	00000000		0

Quando Enable Input é ON, o HACD envia dois bytes idênticos. A razão provável para o byte ser repetido é que sempre que o byte enviado for 1, o byte é repetido para se evitar confusões de interpretação. Aqui está o byte enviado:

Tabela 10 Mensagem 1.1 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
1	00000001		1

2ª parte da resposta do HACD

A seguir, o HACD envia um novo byte que corresponde ao estado das 8 DI. O bit mais significativo representa DI8, enquanto o menos significativo representa DI1. No caso a seguir, DI1 e DI2 eram ON:

Tabela 11 Mensagem 1.2 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
3	00000011		3

Caso somente DI1 esteja em ON, o byte é repetido:

Tabela 12 Mensagem 1.2 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
1	00000001		1

3ª parte da resposta do HACD

Com Enable Input OFF, a 3ª parte é a repetição da segunda parte:

Tabela 13 Mensagem 1.3 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
3	00000011		3

Com Enable Input ON, a 3ª parte parece ser a repetição da 2ª parte com a subtração ou soma de 1 unidade. Para o caso anterior, a 3ª parte da resposta do HACD é:

Tabela 14 Mensagem 1.3 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
2	00000010		2

Caso o byte da segunda parte fosse zero (todas DIs OFF), a 3ª parte é 1:

Tabela 15 Mensagem 1.3 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
1	00000001		1

Não ficou totalmente claro o comportamento e a função deste byte. Parece que o valor de DO5 influi neste byte, mas isso é irrelevante para o sistema da calha de frenagem.

Observação: a resposta do HACD pode variar de 3 a 5 bytes (de acordo com o número de repetições dos bytes).

Em modo Motion Data – 2ª parte

Na segunda parte da comunicação, a seguinte mensagem é enviada pelo BODAC:

Tabela 16 Mensagem 2 do BODAC em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
65	01000001	A	41
82	01010010	R	52
6	00000110		6
192	11000000	À	C0
16	00010000	†	10
0	00000000		0
2	00000010		2
198	11000110	Æ	C6

Em modo Motion Data – 2ª parte – resposta do HACD

A resposta do HACD também tem 3 partes aqui, e pode variar de 3 a 5 bytes.

A primeira parte da resposta foi sempre a mesma em todas as situações:

Tabela 17 Mensagem 2.1 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
0	00000000		0

A segunda e terceira parte pareceram ser sempre iguais e correspondem ao estado das saídas digitais DO. No entanto, os bits não têm uma ordem lógica. Pode-se identificar os bits como:

Tabela 18 Local das DO no byte enviado

DO7 DO5 DO6 DO4 DO3 DO2 DO8 DO1

Para o caso em que estão no estado ON as saídas DO1, DO2, DO3, DO7 e DO8, a segunda e a terceira partes da resposta do HACD são:

Tabela 19 Mensagem 2.2 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
143	10001111	▯	8F
143	10001111	▯	8F

Em modo Motion Data – 3ª parte

Na terceira parte da comunicação, o BODAC envia a seguinte mensagem:

Tabela 20 Mensagem 3 do BODAC em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
65	01000001	A	41
82	01010010	R	52
20	00010100	¶	14
240	11110000	ð	F0
16	00010000	†	10
0	00000000		0
4	00000100		4
226	11100010	â	E2

Em modo Motion Data – 3ª parte – resposta do HACD

A resposta do HACD é composta de 5 bytes que correspondem ao valor da variável analógica AI1.

Em sua excursão máxima (que na giga de testes corresponde à indicação 100), o valor de AI1 é codificado da seguinte forma:

Tabela 21 Mensagem 3 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
255	11111111	ÿ	FF
255	11111111	ÿ	FF
207	11001111	Ï	CF
25	00011001	†	19
214	11010110	Ö	D6

Em sua excursão mínima (que na giga corresponde à indicação 0), o valor de AI1 é codificado da seguinte forma:

Tabela 22 Mensagem 3 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
0	00000000		0
0	00000000		0
205	11001101	Í	CD
233	11101001	é	E9
36	00100100	\$	24

Observação: na configuração atual dos dispositivos, o máximo de AI1 (100) corresponde ao mínimo do sinal FB1-1 (-38,21) e o mínimo de AI1 (0) corresponde ao máximo do sinal FB1-1 (160,87).

Numa posição intermediária de AI1 (curso de AI1 em 11 e FB1-1 em 60,85 – que é o ponto médio de FB1-1), a resposta do HACD é a seguinte:

Tabela 23 Mensagem 3 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
0	00000000		0
0	00000000		0
78	01001110	N	4E
98	01100010	b	62
44	00101100	,	2C

Numa posição intermediária de AI1 (curso de AI1 em 50 – ponto médio de AI1 - e FB1-1 em -23,78), a resposta do HACD é a seguinte:

Tabela 24 Mensagem 3 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
255	11111111	ÿ	FF
255	11111111	ÿ	FF
225	11100001	á	E1
145	10010001	‘	91
112	01110000	p	70

Numa posição intermediária de AI1 (curso de AI1 em 22 e FB1-1 em 0,01), a resposta do HACD é a seguinte:

Tabela 25 Mensagem 3 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
0	00000000		0
0	00000000		0
0	00000000		0
19	00010011	!!	13
19	00010011	!!	13

Conclusões:

Como foi constatado na quarta parte da comunicação, as variáveis analógicas são compostas de 4 bytes.

Os dois primeiros bytes representam apenas uma repetição do bit de sinal que aparece no 3º byte. Logo, esses dois bytes assumem sempre um dos seguintes valores:

Tabela 26 Mensagem 3.1 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
0	00000000		0
0	00000000		0

Ou:

Tabela 27 Mensagem 3.1 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
255	11111111	ÿ	FF
255	11111111	ÿ	FF

O terceiro e o quarto byte representam o valor da variável analógica da seguinte maneira:

Tabela 28 Mensagem 3.2 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
225	11100001	á	E1
145	10010001	‘	91

Legenda:

Bit de sinal: 1 para negativo e 0 para positivo.

12 bits correspondendo a um valor decimal de 0 a 4095, o qual é substituído por um valor dentro da escala escolhida no BODAC.

3 bits de funcionalidade desconhecida.

O último byte deve corresponder a algum método de verificação de bits, mas não foi possível saber ao certo a sua função e comportamento.

Em modo Motion Data – 4ª parte

Na quarta parte da comunicação, o BODAC envia a seguinte mensagem:

Tabela 29 Mensagem 4 do BODAC em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa
1	00000001		1
65	01000001	A	41
82	01010010	R	52
84	01010100	T	54
240	11110000	ð	F0
16	00010000	†	10
0	00000000		0
44	00101100	,	2C
138	10001010	Š	8A

Em modo Motion Data – 4ª parte – resposta do HACD

O HACD responde com uma série de bytes que puderam ser identificados como os valores de vários sinais analógicos.

Cada sinal assume a mesma estrutura da variável analógica AI1 mostrada na 3ª parte (cada sinal corresponde a 4 bytes consecutivos).

Por último, há um byte que deve corresponder a algum método de verificação dos bits.

No quadro a seguir, é mostrado um quadro com todos os bytes que o HACD envia nessa parte. Os sinais que puderam ser identificados estão indicados.

Tabela 30 Mensagem 4 do HACD em Motion Data

Byte (Decimal)	Byte (Binário)	Caracter	Hexa	
0	00000000		0	Possível LC1
0	00000000		0	
0	00000000		0	
115	01110011	s	73	
0	00000000		0	Possível LC1
0	00000000		0	
0	00000000		0	
115	01110011	s	73	
0	00000000		0	
0	00000000		0	
0	00000000		0	
0	00000000		0	
0	00000000		0	Possível LC1-LFB1
0	00000000		0	
29	00011101		1D	
35	00100011	#	23	
0	00000000		0	Possível LC1-LFB1
0	00000000		0	
29	00011101		1D	
35	00100011	#	23	
0	00000000		0	
0	00000000		0	
0	00000000		0	
0	00000000		0	
0	00000000		0	Possível Out2 d 32
0	00000000		0	
84	01010100	T	54	
70	01000110	F	46	
0	00000000		0	
0	00000000		0	
26	00011010	→	1A	
117	01110101	u	75	
0	00000000		0	
0	00000000		0	

0	00000000		0
0	00000000		0
255	11111111	ÿ	FF
255	11111111	ÿ	FF
236	11101100	ì	EC
225	11100001	á	E1
0	00000000		0
0	00000000		0
84	01010100	T	54
70	01000110	F	46
98	01100010	b	62

Possível Out2 d 32

Checksum?

Cada variável analógica é composta de 4 bytes, da mesma maneira que para o sinal FB1-1 na terceira parte da comunicação.

O último byte da mensagem parece ser, aqui também, algum método de verificação de bits.

Importante: estes telegramas são reproduzidos somente para o caso em que os seguintes sinais são seleccionados para visualização no modo Motion Data:

- LC1
- FB1-1 (e não FB1 nem LFB1, mesmo tendo os mesmos valores)
- LC1-LFB1
- OUT2 d32
- DI1
- DI3
- DO1
- DO3