



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA
MESTRADO EM MECATRÔNICA**

LUCIANA DE ALMEIDA PACHECO

**GCAD – UM MODELO CONCEITUAL PARA GERENCIAMENTO E
CONTROLE AUTÔNOMO E DISTRIBUÍDO PARA SISTEMAS
INDUSTRIAIS AUTOMATIZADOS**

Salvador
2011

LUCIANA DE ALMEIDA PACHECO

**GCAD – UM MODELO CONCEITUAL PARA GERENCIAMENTO E
CONTROLE AUTÔNOMO E DISTRIBUÍDO PARA SISTEMAS
INDUSTRIAIS AUTOMATIZADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador:
Prof. Herman Augusto Lepikson, Dr. Eng.

Salvador
2011

P116 Pacheco, Luciana de Almeida

GCAD - Um modelo conceitual para gerenciamento e controle autônomo e distribuído para sistemas industriais automatizados / Luciana de Almeida Pacheco. – Salvador, 2011.

166 f. : il. color.

Orientador: Prof. Doutor Herman Augusto Lepikson

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2011.

1. Indústria – Controle automático. 2. Indústria – Controle de processos. 3. Sistemas de Controle Inteligente. 4. Sistemas auto-organizáveis. I. Lepikson, Herman Augusto. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDD.: 658.5

TERMO DE APROVAÇÃO

LUCIANA DE ALMEIDA PACHECO

GCAD – UM MODELO CONCEITUAL PARA GERENCIAMENTO E CONTROLE AUTÔNOMO E DISTRIBUÍDO PARA SISTEMAS INDUSTRIAIS AUTOMATIZADOS

Dissertação aprovada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica,
Universidade Federal da Bahia – UFBA, pela seguinte banca examinadora:

Herman Augusto Lepikson – Orientador _____
Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)
Universidade Federal da Bahia

Leizer Schnitman _____
Doutor em Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
Universidade Federal da Bahia

Mário Cesar Mello Massa de Campos _____
Doutor em Engenharia Química, Ecole Central Paris, França
PETROBRAS – CENPES

José Francisco dos Santos Corrêa _____
Mestre em Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
PETROBRAS – UO/BA

Salvador, 25 de março de 2011.

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Herman Augusto Lepikson, pela orientação, ensinamentos, compreensão, confiança e incentivo durante todo o trabalho.

Ao corpo docente do PPGM, pelos ensinamentos.

Aos membros da banca avaliadora, pela disposição em contribuir para o aperfeiçoamento da pesquisa.

À Petrobras e à Rockwell Automation, pelo apoio dado ao Laboratório de Elevação Artificial da UFBA, o que viabilizou a parte experimental deste trabalho.

A Sérgio Sá Barretto, pelos constantes incentivos, pela amizade e apoio incondicional, valiosas contribuições e discussões técnicas.

A Antônio Cláudio pelo grande e fundamental apoio na realização dos experimentos para a validação deste trabalho.

À equipe do LEA, em especial, a Cícero, Lairton e Tiago, pelo apoio técnico e cordialidade.

À equipe do CTAI pelo suporte operacional, em especial, a Lúcia Lago pelo constante incentivo e amizade.

À FAPESB, pelo apoio financeiro na fase inicial da pesquisa.

A Matheus, pelo incentivo e apoio na realização dos experimentos.

A Jeane Franco, Anderson Batista, Carlos Machado e Cláudio Bonfim, amigos incentivadores que, mesmo com meu longo período de afastamento, permaneceram sempre presentes.

A Claudete Alves, pelo grande incentivo profissional e confiança.

A Joselino Rocha, amigo que muito incentivou meu ingresso e continuidade no Mestrado em Mecatrônica.

Aos amigos e colegas do Grupo de Automação Industrial da Petrobras/TIC-BA/DES.

A meus pais, Alberto e Nilda, que sempre investiram na educação dos filhos, pela base familiar, constante presença, cuidados e orientações sempre procedentes.

Aos irmãos, pelo laço fraternal que nos une.

A Deus, pela oportunidade de viver.

Se quer viver uma vida feliz, amarre-se a
uma meta, não às pessoas nem às coisas.

Albert Einstein.

RESUMO

Em sistemas industriais automatizados, a inatividade provocada pela escassez não planejada de recursos, ou por falhas de processo, tem grande influência no desempenho dos sistemas por conta das descontinuidades e instabilidades geradas. Sistemas de controle distribuídos e autônomos podem ajudar a lidar com esses tipos de problemas devido à melhoria de desempenho possibilitada. Entretanto, aspectos relativos à segurança e ao tempo de resposta devem ser bem tratados nesses sistemas devido aos riscos envolvidos (humanos, financeiros e ambientais). A proposta de sistemas autônomos e distribuídos visa a que decisões de controle sejam tomadas mais próximas do objeto controlado, reduzindo assim o tempo de atuação no processo e sistematizando algumas decisões, antes tomadas de forma empírica. Conseqüentemente, se espera aumentar a disponibilidade e a continuidade do processo, bem como garantir os aspectos de confiabilidade. Entretanto, quando tais sistemas se tornam mais autônomos e distribuídos, podem tender ao comportamento global caótico, caso suas interações não estejam bem definidas. Assim, é importante que seja avaliado e dimensionado o acoplamento entre os sistemas autônomos relacionados. O grau de inteligência de um sistema pode variar de uma entidade completamente controlada a entidades completamente autônomas. O primeiro nível de inteligência é verificado quando um sistema é capaz de gerenciar suas próprias informações, obtidas por meio de sensores e demais técnicas e dispositivos, e não somente manipular informações. Em um segundo nível, o sistema pode notificar o seu gestor quando há um problema. Em um terceiro nível, o sistema já é capaz de tomar decisões e se autogerenciar, mesmo sem intervenção externa. Neste caso, o sistema tem controle total sobre suas tarefas e não há nenhum controle externo a ele. A alternativa proposta pelo GCAD visa a que Sistemas Industriais Automatizados atinjam até o terceiro nível de inteligência, sendo que intervenções externas podem ser admitidas nos casos em que uma ação puramente local e autônoma de fato não é recomendável ou não é possível, por exemplo, havendo necessidade de substituição de equipamentos ou dispositivos. O GCAD propõe um módulo de controle inteligente instanciado predominantemente em nível local que visa a permitir que cada Sistema Industrial Automatizado, distribuído em células, tome decisões críticas de uma forma autônoma. Adicionalmente, um módulo remoto deve gerenciar situações mais complexas que estão além da capacidade de decisão ou atuação do sistema de controle local. O modelo proposto visa a permitir ajustes automáticos e autônomos no sistema, a fim de melhorar seu desempenho, e prevenir ou tratar as falhas inesperadas, assegurando a continuidade da operação.

Palavras chave: sistemas autônomos; controle distribuído; tempo real; sistemas industriais automatizados; gerenciamento remoto.

ABSTRACT

In automatized industrial systems inactivity due to unplanned shortage of resource or process failures have a great influence on system performance because it generates discontinuities and instabilities. Distributed and autonomous control systems may help to cope with these kind of problems because of its improved performance. But safety issues and real time constraints must be tightly addressed in these systems because of the risks involved (human, financial and environmental). The proposal of distributed and autonomous systems aims to decisions of control to be taken closer to controlled object, thereby reducing the actuation time in the process and systematizing some decisions that are empirically taken. Consequently, it expects to increase the availability and continuity of the process as well as ensuring its reliability. However, when such systems become more autonomous and distributed, they may tend to the chaotic global behavior. Therefore, it's important evaluate and measure the coupling among autonomous systems related. The degree of intelligence of a system can vary from one entity entirely controlled until completely autonomous entities. The first level of intelligence is observed when a system is able to manage their own information acquired through sensors and other devices and techniques, not just manipulating intelligence. On a second level, the system can notify the manager when there is a problem. At a third level, the system is able to make decisions and manage itself without outside intervention. In this case, the system has total control over its tasks and there is no external control to it. The alternative proposed by GCAD, presented in this paper, introduces an Automated Industrial Systems that reaches until the third level of intelligence. However, external intervention may be permitted in situations in which a purely local and autonomous action in fact is not recommended or possible, for example, replacing equipments or devices. Therefore the GCAD proposes an intelligent control instantiated predominantly at local level that aims to allow each Automated Industrial System, distributed in cells, to take critical decisions in an autonomous way. Above this, a remote module should manage more complex situations beyond the capabilities of the local system. The proposed model aims to enable auto-adjustments in the system, in order to improve its performance, to prevent and treat unexpected faults, ensuring continuity of operation.

Keywords: autonomous systems; distributed control; real time; automated industrial systems; remote management; intelligent systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmide da Automação	20
Figura 2 – Visão do sistema com ajustes realizados	23
Figura 3 – Célula Industrial	26
Figura 4 – Origem da ocorrência de um defeito	29
Figura 5 – Representação de um sistema de controle simples	32
Figura 6 – Diagrama de bloco de instrumento (ou sistema de medição)	33
Figura 7 – Arquitetura de controle centralizado	37
Figura 8 – Arquitetura de controle hierárquico	38
Figura 9 – Arquitetura de controle heterárquico	39
Figura 10 – Arquitetura de controle híbrido	40
Figura 11 – Arquitetura de controle e supervisão com <i>fieldbus</i>	40
Figura 12 – Unidade de Produção no estado da arte	46
Figura 13 – Visão sistêmica da definição de inteligência (adaptado de Franco, 2003)	48
Figura 14 – Definição do GCAD	57
Figura 15 – Célula Autônoma	57
Figura 16 – Estrutura proposta	58
Figura 17 – Infraestrutura local e remota do GCAD	60
Figura 18 – Visão geral da proposta do GCAD	61
Figura 19 – Exemplos de protocolos para comunicação entre camadas	62
Figura 20 – Interação básica entre as camadas	68
Figura 21 – Estrutura das bases de conhecimento	72
Figura 22 – Proposta de Estrutura para a base de conhecimento local	73
Figura 23 – Estrutura de uma Base de Conhecimento Global	74
Figura 24 – Modos de funcionamento das células	81
Figura 25 – Representação do Módulo Reativo	83
Figura 26 – Limites operacionais	85
Figura 27 – Modos de funcionamento e atividades do Módulo Cognitivo	88
Figura 28 – Interação entre módulos principais do Módulo Cognitivo	92
Figura 29 – Gerenciamento Remoto de células	94
Figura 30 – Etapas analisadas da produção	98
Figura 31 – Escopo do estudo de caso	98

Figura 32 – Interface entre as células em um caso geral	99
Figura 33 – Interface entre as células do estudo de caso	100
Figura 34 – Colunas de produção do Sistema de Bombeio Mecânico do LEA	101
Figura 35 – Fundo do poço do Sistema de Bombeio Mecânico do LEA	102
Figura 36 – UB equipada com sensores de posição e carga na haste polida.....	102
Figura 37 – Fluxograma simplificado dos Processos	104
Figura 41 – Arquitetura montada para o experimento	110
Figura 42 – Dinâmica do processo	112
Figura 43 – Sequência de ações do MC para estabilizar nível dinâmico	113
Figura 44 – Sequência de ações do MC para estabilizar nível dinâmico	115
Figura 45 – Dinâmica do processo	116
Figura 46 – Tentativa de estabilização do nível dos tanques pela ETO	117
Figura 47 – Nível máximo dos tanques da ETO foi atingido	118
Figura 48 – Nível máximo dos tanques da ECO foi atingido.....	119
Figura 49 – Comportamento após o restabelecimento das bombas de transferência	120
Figura 50 – Lógica de funcionamento do Módulo Cognitivo	144
Figura 51 – Módulo de Verificação Continuada	145
Figura 52 – Módulo de Análise Local	146
Figura 53 – Analisador preventivo do MAL	147
Figura 54 – Analisador corretivo do MAL.....	148
Figura 55 – Gerador de Ações do MAL.....	149
Figura 56 – Módulo de Negociação	151
Figura 57 – Módulo de Sincronização.....	152
Figura 58 – Módulo de Ajuste do Controlador.....	153
Figura 59 – Módulo Gerenciador de Eventos.....	153
Figura 60 – Visão geral de um sistema de produção de petróleo	155
Figura 61 – Visão detalhada do sistema de produção	157
Figura 62 – Sistema de Bombeio Mecânico.....	158
Figura 63 – Unidade de Bombeio.....	159
Figura 64 – Visão geral de uma estação de coleta simples	163
Figura 65 – Visão geral de uma estação de tratamento	164

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Níveis de prioridade.....	79
Tabela 2 – Atividades e interações com o MR.....	84
Tabela 3 – Limites operacionais em termos lingüísticos.....	85
Tabela 4 – Atividades do MC em Modo Autônomo.	91
Tabela 5 – Variáveis consideradas na célula “Poço”	107
Tabela 6 – Variáveis consideradas na célula “ECO”	108
Tabela 7 – Variáveis consideradas na célula “ETO”.....	109
Tabela 8 – Regras para identificação de possível falha.....	146
Tabela 9 – Cargas típicas atuantes no SBM (adaptado de BEZERRA, 2002).	160

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BC	Base de Conhecimentos
BCP	Bomba de Cavidades Progressivas
BCS	Bomba Centrífuga Submersa
BSW	Sedimento básico e água (<i>Basic Sediment and Water</i>)
CDF	Carta Dinamométrica de Fundo
CDS	Carta Dinamométrica de Superfície
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CPM	Ciclos Por Minuto
CR	Célula relacionada
DCS	Sistema de Controle Distribuído (<i>Distributed Control System</i>)
ECO	Estação de Coleta de Óleo
EIA	Estação de Injeção de Água
E/S	Entrada/Saída
ERP	Sistema de Gestão Integrada (<i>Enterprise Resource Planning</i>)
ETO	Estação de Tratamento de Óleo
GCAD	Gerenciamento e Controle Autônomo e Distribuído para Sistemas Industriais Automatizados
GL	Gás-Lift
GN	Gás Natural
GN _{HP}	GN em alta pressão
GN _{LP}	GN em baixa pressão (<i>low pressure</i>)
HP	Alta pressão (<i>high pressure</i>)
IA	Inteligência Artificial
IHC	Interface Humano-Computador
LEA	Laboratório de Elevação Artificial
LP	Baixa pressão (<i>low pressure</i>)
MAC	Módulo de Ajuste do Controlador
MAICE	Metodologia para Modelagem e Integração do Conhecimento Especialista
MAL	Módulo de Análise Local
MAX _{CTR}	Limite Máximo de Controle

MAX _{OP}	Limite Máximo de Operação
MC	Módulo Cognitivo
MGE	Módulo Gerenciador de Eventos
MGR	Módulo de Gerenciamento Remoto
MIN _{CTR}	Limite Mínimo de Controle
MIN _{OP}	Limite Mínimo de Operação
MNE	Módulo de Negociação
MR	Módulo Reativo
MSI	Módulo de Sincronização
MTE	Módulo de Tratamento de Exceções
MVC	Módulo de Verificação Continuada
OO	Orientação/Orientado a Objetos
OLE	Objetos Vinculados e Incorporados (<i>Object Linking and Embedding</i>)
OPC	OLE para o Controle de Processos (<i>OLE for Process Control</i>)
PC	Computador Pessoal (<i>Personal Computer</i>)
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PIMS	Sistema de Gerenciamento de Informações de Processo (<i>Process Information Management System</i>)
RAO	Razão água/óleo
RFID	Identificação por Rádio Frequência (<i>Radio-Frequency IDentification</i>)
RGO	Razão gás/óleo
RNA	Redes Neurais Artificiais
SBM	Sistema de Bombeio Mecânico
SCA	Sistema Complexo Adaptativo
SCADA	Controle, Supervisão e Aquisição de Dados (<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>)
SCD	Sistema de Controle Distribuído
SF	Sistema <i>Fuzzy</i>
MGR	Módulo de Gerenciamento Remoto
SIA	Sistema Industrial Automatizado
SMA	Sistema Multiagente
SP	<i>Setpoint</i>
SSC	Sistema de Supervisão e Controle

UB	Unidade de Bombeio
UCP	Unidade Central de Processamento
UML	Linguagem Unificada de Modelagem (<i>Unified Modeling Language</i>)
URGN	Unidade Regeneradora de Gás Natural
VSD	Variador de frequência, Inversor de frequência ou Variador de velocidade (<i>Variable Speed Drive</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONSIDERAÇÕES E ESCOPO	19
1.2	CONTEXTO DO PROBLEMA	21
1.3	OBJETIVOS E BENEFÍCIOS ESPERADOS	22
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	25
2.1	SISTEMAS INDUSTRIAIS AUTOMATIZADOS	25
2.2	TRATAMENTOS DE FALHAS EM SISTEMAS	29
2.3	SISTEMAS DE CONTROLE E SUPERVISÃO	32
2.3.1	Controladores Lógicos Programáveis	34
2.3.2	Sistemas de Supervisão e Controle	35
2.3.3	Arquiteturas de Controle	37
2.3.4	Controle de SIA Críticos	41
2.3.5	Controle Inteligente para SIA e Decisão distribuída	42
2.3.6	Controle de Sistemas de Produção de Petróleo	43
2.4	INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL	47
2.4.1	Sistemas de Controle Inteligente e Autônomo	48
2.4.2	Sistemas Multiagente	51
2.4.3	Teoria da Complexidade e os Sistemas Complexos Adaptativos	53
3	GERENCIAMENTO E CONTROLE AUTÔNOMO E DISTRIBUÍDO PARA SISTEMAS INDUSTRIAIS AUTOMATIZADOS	56
3.1	DEFINIÇÕES GERAIS	57
3.2	MODELO CONCEITUAL PROPOSTO	60
3.2.1	Principais Desafios da Abordagem Proposta	63
3.2.2	Interação entre as Camadas	68
3.2.3	Interface entre células	70
3.2.4	Bases de Conhecimento	71
3.2.5	Requisitos principais do GCAD	75
3.2.6	Hipóteses de Falha	77
3.2.7	Níveis de Prioridade na Execução de Tarefas	79

3.3	MÓDULO REATIVO	81
3.3.1	Modos de Funcionamento de uma célula	81
3.3.2	Estrutura e Tarefas do MR	83
3.3.3	Limites Operacionais das Variáveis	84
3.4	MÓDULO COGNITIVO	86
3.4.1	Modos de Operação de um MC	88
3.4.2	Estrutura e Tarefas do MC	90
3.4.3	Módulos de um MC	91
3.5	MÓDULO DE GERENCIAMENTO REMOTO	93
3.6	RESULTADOS ESPERADOS	95
4	VALIDAÇÃO DA PROPOSTA	96
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	97
4.2	DEFINIÇÃO DE ESCOPO – ESTUDO DE CASO	98
4.3	DEFINIÇÃO DAS INTERFACES ENTRE CÉLULAS	99
4.4	ESTRUTURA LABORATORIAL	100
4.5	PREPARAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	106
4.6	CASOS DE TESTE E RESULTADOS OBTIDOS	111
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
5.1	CONTRIBUIÇÕES DA PROPOSTA	123
5.2	LIMITAÇÕES DA PROPOSTA	126
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128
5.4	PUBLICAÇÕES GERADAS E PREMIAÇÃO	129
	REFERÊNCIAS	130
	GLOSSÁRIO	135
	APÊNDICE A – DESCRITIVO DO MÓDULO COGNITIVO	144
	APÊNDICE B – SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO	155

1 INTRODUÇÃO

Nos sistemas^{*1} industriais, a inatividade não-programada de recursos^{*} e as falhas^{*} de processos, bem como fatores humanos – atrasos, erros^{*}, ambigüidades, dentre outros – estão entre os fatores que mais influenciam na redução de produtividade, já que ambas provocam uma descontinuidade parcial ou total na produção. Para manter a continuidade operacional e garantir a disponibilidade e a produtividade do sistema, é necessário que suas operações sejam supervisionadas e controladas por sistemas com capacidade de detecção e diagnóstico de falhas em tempo hábil. Sempre que possível, as falhas ocorridas devem ser imediatamente sinalizadas e os procedimentos de diagnóstico e atuação iniciados, de forma a recuperar o sistema a cenários seguros.

Com o aumento de complexidade dos sistemas industriais, o número de malhas^{*} de controle presente em uma planta^{*}, em geral, tem se tornado cada vez mais elevado. Ademais, como os recursos para manutenção do desempenho^{*} ótimo destas malhas são escassos, cresce a necessidade de uma coordenação mais eficiente entre os diversos controladores, bem como dos equipamentos e dispositivos da planta, de forma a obter um funcionamento mais eficaz e aumentar o nível de tolerância^{*} a falhas do sistema.

Sistemas Industriais Automatizados (SIA) se caracterizam por altos níveis de investimento em instrumentação e almejam elevada repetitividade, tendo como fundamental aspecto a confiabilidade de seus resultados por ação de controle^{*} automatizada.

Apesar dos desafios tecnológicos ainda a serem enfrentados para garantia de confiabilidade e de desempenho em tempo^{*} real, os sistemas de controle autônomo e distribuído vêm ganhando destaque em função de características como: habilidade de autocomando das funções de controle, adaptação a mudanças não previstas no ambiente e adaptação a falhas internas do sistema, sem intervenção externa (SREENIVASACHAR *et al.*, 1997).

Segundo Antsaklis *et al.* (1998), ser autônomo significa ter poder de autocomando. Os controladores autônomos têm o poder e habilidade de autocomando no desempenho de funções de controle, sendo compostos por um conjunto hardware/software que deve ser capaz de operar por períodos de tempo longos, mesmo quando submetidos a incertezas^{*} no

¹ Vide glossário (página 135). No decorrer do texto, em sua primeira utilização, os termos destacados com a marca ^{*} são definidos no glossário e contextualizados a partir do capítulo 2.

processo e no ambiente, e compensar a ocorrência de falhas no sistema de forma que uma intervenção externa seja realizada somente em situações estritamente necessárias, a exemplo da necessidade de substituição de um equipamento devido a um desgaste severo ou ainda por razões estratégicas da Organização*.

Com o advento de novos microprocessadores de baixo custo, se impulsionou e viabilizou o desenvolvimento de sistemas de controle autônomo e distribuído, permitindo o controle simultâneo de um grande número de variáveis, bem como a distribuição do processo decisório. A aplicação destes sistemas é de grande utilidade em se tratando de sistemas com restrições críticas de continuidade e tempo de resposta. Sistemas autônomos e distribuídos visam a apresentar rapidamente ações em resposta a falhas ou variações não programadas ocorridas internamente, ou externamente e com impacto local. E esta ação visa a minimizar os impactos na continuidade e integridade do sistema. A distribuição do processo decisório e a realização do controle de forma distribuída permitem ainda que sistemas relacionados interajam entre si, minimizando, por exemplo, a descontinuidade decorrente de falhas ou variações externas.

A proposta de sistemas autônomos e distribuídos visa a que decisões de controle sejam tomadas mais próximas do objeto* controlado, reduzindo assim o tempo de atuação no processo e sistematizando algumas decisões antes tomadas de forma empírica e não sistematizada. Conseqüentemente, se espera aumentar a disponibilidade e a continuidade do processo, bem como garantir os aspectos de confiabilidade. Entretanto, quando tais sistemas não são analisados e modelados adequadamente, à medida que se tornam mais autônomos e distribuídos, podem tender a um comportamento global caótico, ao operar em conjunto. Assim, é importante que seja avaliado e dimensionado o acoplamento entre os sistemas autônomos relacionados.

No controle de SIAs, o tratamento de situações que geram falhas, na maioria das vezes, ocorre de forma corretiva, de forma a reverter um quadro de instabilidade já manifestada. Em alguns casos, são realizadas ações preventivas ou paradas programadas visando à prevenção de falhas. Entretanto, em geral, esta ação pode implicar em lucro cessante, grande custo financeiro e de tempo, principalmente em se tratando de sistemas geograficamente distribuídos. Além disso, quando são considerados os subsistemas distribuídos com restrições críticas de continuidade e tempo de resposta entre si, a ocorrência de falhas ou inatividades não programadas em um subsistema pode impactar em todo o SIA.

O presente trabalho apresenta um modelo conceitual para gerenciamento e controle autônomo de SIAs com restrições críticas de continuidade e confiabilidade, que envolvem células* industriais distribuídas e relacionadas entre si. Sistemas como estes são denominados sistemas críticos, e a tolerância a falhas é uma qualidade essencial para se manter a confiabilidade.

Espera-se contribuir para a melhoria do estado da arte na área de gerenciamento* e controle de SIAs com células* distribuídas, em especial, com restrições relacionadas à continuidade e tempo de resposta entre elas. Para isso, é proposta uma alternativa para gerenciamento e controle que visa a tratar de forma eficiente os aspectos de continuidade, confiabilidade, disponibilidade e tempo de resposta, baseada em uma abordagem autônoma e distribuída.

O modelo proposto foi nomeado de Gerenciamento e Controle Autônomo e Distribuído para Sistemas Industriais Automatizados (GCAD). O GCAD foi testado em sistemas de produção de petróleo em ambiente experimental, como forma de validar as principais contribuições propostas. Contudo, espera-se que o GCAD seja aplicado também em outros SIAs.

Dentre os principais desafios a serem enfrentados, destaca-se o estabelecimento de uma adequada relação entre: modularização e acoplamento entre os componentes, imprevisibilidade e tolerância a falhas, centralização de dados e distribuição na tomada de decisão, confiabilidade e tempo de resposta, flexibilidade e complexidade, dentre outros. Estes aspectos são comentados no item 3.2.1 e endereçados no modelo proposto.

1.1 CONSIDERAÇÕES E ESCOPO

Em uma planta de processo industrial, segundo Moraes & Castrucci (2001), considera-se a pirâmide de automação com as seguintes camadas principais (Figura 1).

Na primeira camada (base da pirâmide) estão localizados os dispositivos e componentes do chão de fábrica. É onde se encontra a instrumentação e os controladores (a exemplo dos controladores lógicos programáveis – CLP). A segunda camada representa a supervisão do processo, onde se encontram as Interfaces* Humano-Computador (IHC) do processo, que concentram as informações relativas à primeira camada – nível que efetivamente produz.



Figura 1 – Pirâmide da Automação

Na terceira camada, é feito o gerenciamento do processo produtivo. Normalmente é constituído por bancos de dados, com informações dos índices de qualidade da produção, estatísticas de processo, índices de produtividade, algoritmos de otimização* usados na operação produtiva.

Na quarta camada é feita a Programação e o Planejamento da Produção, realizando o gerenciamento e a logística de suprimentos, bem como o projeto de produtos e processos.

Na quinta camada se encontram softwares do tipo *Enterprise Resource Planning* (ERP), sistemas corporativos integradores de dados, para apoio decisório, gestão financeira, vendas e o gerenciamento de todo o sistema. É o nível de gestão da empresa, onde são realizadas as funções de administração corporativa como, por exemplo, o planejamento estratégico, levando em consideração as informações do processo industrial e do mercado.

O presente trabalho visa a atuar nas camadas um e dois, propondo melhorias nas estratégias de controle e supervisão atualmente utilizados em SIA.

Uma alternativa para melhorar o desempenho dos SIAs é distribuir o processo decisório pelos controladores locais, transferindo parte da inteligência do sistema, anteriormente centralizada em níveis remotos, a partir da terceira camada, e dependente da ação de especialistas, para cada célula que o compõe. Mas para que isso seja possível, é desejável uma constante supervisão e uma eficiente sincronização das informações coletadas e analisadas, além da incorporação de algoritmos inteligentes adequados em cada célula.

Propõe-se a utilização de um Módulo Cognitivo (MC) em cada uma das células a ser embarcado em um dispositivo externo e conectado aos controladores existentes nos processos industriais, permitindo que o conhecimento de engenheiros ou especialistas,

associado aos dados coletados, seja traduzido em procedimentos de atuação automática e, quando possível, autônoma pelo controlador.

O sistema proposto consiste em um controle inteligente em nível de célula, de forma que o MC de cada célula seja capaz de tomar decisões relativamente complexas de forma autônoma. Adicionalmente, um Módulo de Gerenciamento Remoto (MGR) deve auxiliar nas situações em que a ação local não seja suficiente ou recomendada. Isto ocorre através da interação remota do MGR com o MC de cada célula, ajustando parâmetros ou sua base de conhecimento (BC). Esta interação remota deve ocorrer tanto de forma automática como através de uma IHC para especialistas do processo. A partir daí, as atualizações devem ser refletidas nas novas ações de atuação e controle do processo.

Adicionalmente, a proposta mantém distribuídas as funcionalidades específicas do nível local e do nível remoto. Para cada nível, são definidos submódulos conectados entre si, através de mecanismos de interação (sincronização e negociação) que os mantenham coesos em decisões sobre objetivos comuns, porém autônomos em atuações locais, visando a preservar a integridade do sistema em nível local e global.

1.2 CONTEXTO DO PROBLEMA

Na maioria dos sistemas de supervisão e de controle de processos industriais, o mau funcionamento ou ambigüidade de ações na camada de controle induz os controladores locais a assumirem condições padrões de funcionamento que, em muitos casos, significa a parada do processo ou a sua operação em condições limitadas.

Muitos problemas de controle em situações de instabilidade decorrem principalmente de um tempo inadequado de decisão e atuação, tanto dos operadores humanos quanto dos atuais dispositivos físicos e lógicos de controle, a exemplo dos CLPs, Controle Numérico Computadorizado (CNC), dentre outros. Seja por atrasos na detecção do problema, seja pelas demoras no deslocamento até o local, soluções tardias caracterizam problemas de disponibilidade e de confiabilidade e geram redução de desempenho ou ainda prejuízos diretos, como danos a equipamentos ou perdas de produção.

Além disso, em situações envolvendo imprevisibilidades, os métodos de controle tradicionalmente utilizados, a exemplo dos controles liga/desliga e Proporcional-Integral-Derivativo (PID), não apresentam eficácia suficiente para garantir o desempenho necessário aos sistemas de controle com forte dependência de sistemas externos. Nestas situações, seria

mais eficaz um sistema que reagisse, em tempo real, às falhas internas ou a mudanças não previstas no ambiente, para assim garantir e aprimorar seu desempenho e robustez*.

Em muitos casos, o gerenciamento da manutenção é feito através da coleta manual de dados de planejamento e dos equipamentos e a verificação das malhas de controle é feita através de inspeção de gráficos de tendência em Sistemas de Supervisão e Controle (SSC) e relatórios fornecidos por operadores do sistema. Nestas situações, a atuação nas malhas de controle ocorre apenas quando conseqüências relevantes do baixo desempenho destas malhas prejudicam o processo (TORRES & HORI, 2005).

Assim, faz-se necessário o controle continuado, e em tempo real, de todas as malhas de controle e de seus dispositivos, bem como de suas interrelações. Isso possibilita coletar dados de modo informatizado e realizar diagnósticos *online* sobre os eventos ocorridos, atendendo, com resultados superiores, às demandas de confiabilidade, desempenho e disponibilidade de informações esperadas dos SIAs. Dessa forma, são reduzidas as limitações de processo existentes quando o gerenciamento e controle das células são feitos de forma *off-line* ou manual.

As decisões por parte dos Módulos Cognitivos locais deverão ser tomadas em tempo real, com base nos dados do próprio processo local, bem como nos demais processos correlacionados. O objetivo é permitir o controle através da detecção e tratamento de problemas sem a intervenção humana, ou com intervenção mínima, e atendendo satisfatoriamente às demandas de tempo de resposta.

1.3 OBJETIVOS E BENEFÍCIOS ESPERADOS

O objetivo do GCAD é tornar autônoma cada célula de um SIA, de forma a prover: confiabilidade, continuidade de operação, disponibilidade de informações, tolerância a falhas e tempo de resposta aceitável, mesmo em caso de perda de conexão com o MGR.

O sistema de controle proposto visa a que o controle, além de autônomo e automático, seja corretivo e preventivo, permitindo que o sistema se autoajuste para antever ou corrigir falhas. Ou seja, o sistema deve ser tolerante a falhas e reagir rapidamente a mudanças nas metas a serem alcançadas ou em suas prioridades, além de ter a habilidade de interoperar com outros sistemas interligados. Para isso, deve se adaptar aos eventos ocorridos internamente ao sistema, bem como às ações decorrentes de sistemas relacionados e aos eventos do ambiente externo. Assim, sempre que possível, a ação local deve ocorrer de modo que, quando o especialista ou engenheiro de operação identificar que houve uma

instabilidade, medidas de segurança já tenham sido tomadas e a célula já tenha sido desativada ou esteja funcionando de forma segura.

Cada célula deve estar apta a coordenar a interação distribuída entre os diversos equipamentos e dispositivos do sistema e a suportar sua reconfiguração em tempo real. As decisões devem ser tomadas com base na integração de dados decisórios locais e de células relacionadas com os dados do processo local.

Espera-se que o GCAD possibilite às unidades (plantas industriais) uma melhoria de desempenho nos resultados produzidos, melhoria esta promovida pelo aumento de continuidade operacional resultante de um menor tempo de resposta a eventos de falha.

Adicionalmente, o GCAD visa à redução da quantidade de interrupções provocadas por eventos de falha, bem como a redução de custo com manutenções corretivas. Essa redução de custo tende a ser obtida em virtude de uma menor degradação dos equipamentos, já que falhas tendem a ser identificadas e solucionadas ou mitigadas com maior rapidez.

O GCAD, devido à sua estrutura em camadas e módulos independentes, porém com interfaces bem definidas entre eles, apresenta grande potencial de integração de técnicas de inteligência artificial em alguns de seus submódulos, a exemplo de algumas funcionalidades relativas à prevenção de falhas e à geração de ações ainda não existentes na base de conhecimento (Figura 2). Para estes casos, alguns módulos podem vir a ser adaptados para incorporar algoritmos *fuzzy*, redes neurais artificiais, dentre outras técnicas a serem investigadas e adequadas a situações específicas de cada sistema a ser adotado o GCAD.

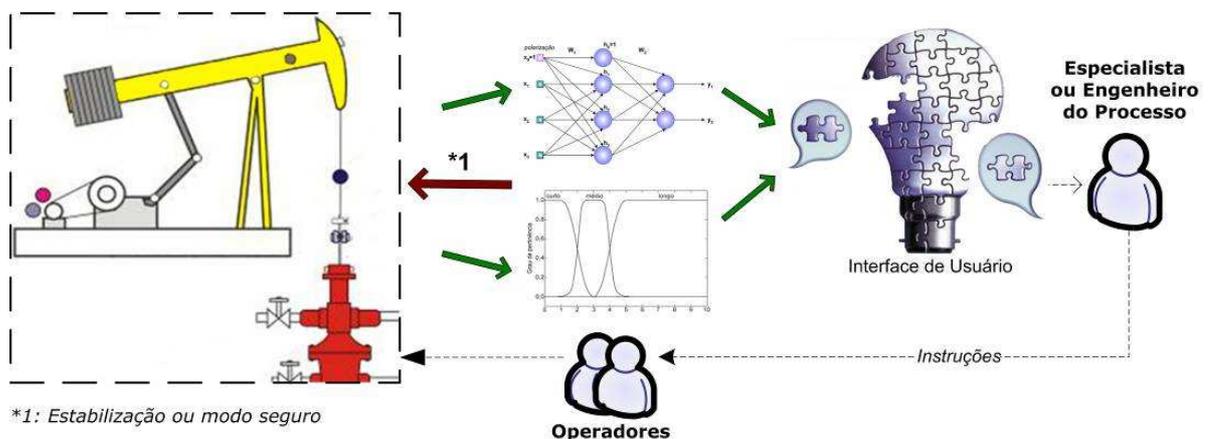


Figura 2 – Visão do sistema com ajustes realizados

Um exemplo de sistema a ser beneficiado com o GCAD são os sistemas de produção de petróleo, que apresentam subsistemas heterogêneos, interdependentes e com fortes restrições de tempo de decisão e atuação, já que uma falha, descontinuidade ou alteração no controle de um subsistema pode afetar diretamente o funcionamento dos demais. Uma instância deste sistema será usada para validação do GCAD.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos e dois apêndices. No capítulo 2 é feita uma introdução e descrição sobre os principais fundamentos teóricos relacionados ao trabalho: sistemas industriais automatizados, tratamento de falhas em sistemas, sistemas de controle e supervisão e inteligência computacional. No capítulo 3 é apresentado um modelo para gerenciamento e controle autônomo e distribuído para Sistemas Industriais Automatizados, nomeado de GCAD. Adicionalmente, são descritas as principais definições relacionadas, os módulos locais que compõem o modelo, o módulo de gerenciamento remoto e os resultados esperados. No capítulo 4 é apresentada a validação do GCAD, descrevendo alguns experimentos que serviram de caso de estudo para validação das principais potencialidades propostas. No capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho, as principais publicações geradas e premiação resultante, as limitações da proposta e sugestões para trabalhos futuros. Em seguida, são listadas as referências que fundamentaram a pesquisa.

Adicionalmente, o trabalho dispõe de um Glossário, para uma melhor definição de termos específicos ou que podem ser interpretados de forma ambígua na literatura, e de dois apêndices. No apêndice A é apresentado um descritivo do módulo cognitivo proposto e, no apêndice B, os sistemas de produção de petróleo, usados como estudo de caso.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo descreve os principais fundamentos relacionados à proposta apresentada, os quais são estruturados em: sistemas industriais automatizados, tratamento de falhas em sistemas, sistemas de controle e supervisão, inteligência computacional.

2.1 SISTEMAS INDUSTRIAIS AUTOMATIZADOS

Um sistema industrial apresenta variáveis a serem controladas, cujos resultados interferem direta ou indiretamente na qualidade de um produto ou de suas partes, bem como no desempenho dos processos. Os métodos de coleta de informações sobre as condições do processo diferem muito, dependendo do tipo de grandeza que se deseja medir. A utilização de controladores associados aos instrumentos* permitiu o controle automático de processos, incrementando e controlando a qualidade do produto, aumentando a produção e rendimento, obtendo e fornecendo dados da matéria-prima, da quantidade produzida e dados relativos à economia dos processos (CHAVES, 2002).

Na atualidade, as indústrias estão cada vez mais optando por automatizar as suas unidades/plantas, utilizando microprocessadores, transmissores* inteligentes, controladores, Sistemas de Controle Distribuído (SCD), protocolos *fieldbus*, tecnologia de segurança intrínseca, dentre outros (CHAVES, 2002). São os chamados Sistemas Industriais Automatizados (SIA), capazes de prover um mais alto desempenho operacional aliado à otimização* de processos industriais.

Um SIA (Figura 3) é composto por uma ou mais células, com seus respectivos dispositivos de chão de fábrica, e por uma camada de controle.

O chão de fábrica inclui dispositivos de medição e atuação, que interagem diretamente sobre o processo. Os sensores e atuadores* podem ser ligados ao controlador (em geral, um CLP) utilizando um par de fios para cada elemento (ponto a ponto ou utilizando blocos de entrada e saída), através de barramento de processo ou de uma rede de dispositivos. De forma alternativa, podem se tratar de instrumentos inteligentes, que além de atuarem diretamente sobre o processo, já dispõem de controlador próprio.

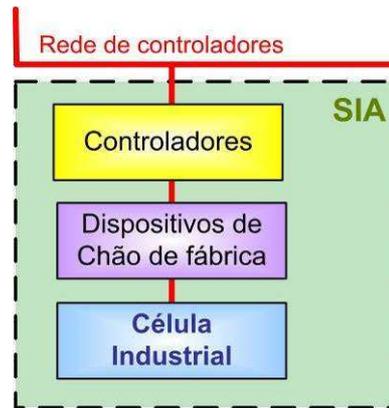


Figura 3 – Célula Industrial

A crescente demanda para utilização dos sistemas de automação cada vez mais complexos (com grande número de variáveis envolvidas e com intensiva dependência entre elas) muitas vezes torna necessária a adoção de uma arquitetura* de controle* híbrida*, integrando funções e requisitos que permitem a estimativa das tarefas*, previsibilidade dos resultados, supervisão*, tolerância* a falhas, adaptabilidade, aprendizagem, flexibilidade e, quando possível, autonomia*. Entretanto, a aplicação dos métodos convencionais de controle pode não ser suficiente para atender aos requisitos desejados. Devido à natureza da dinâmica destes sistemas, nem sempre é viável ou trivial aplicar um modelo fenomenológico (representando as características do sistema) que descreva todas as tarefas e operações especificadas em um SIA (MOORE *et al.*, 1999).

Assim, é desejável o desenvolvimento de novas técnicas ou métodos para o projeto de sistemas de controle que permitam que os sistemas produtivos, bem como os demais SIA, sejam adaptáveis, reutilizáveis, reconfiguráveis e com as características de controle distribuído em tempo real (ARAKAKI, 2004).

Outro importante aspecto a ser considerado é o avanço na tecnologia de redes de comunicação nos ambientes dos SIAs para a integração e gerenciamento das informações. Por exemplo, a conexão dos dispositivos ou equipamentos através de uma tecnologia padronizada, que permita maior interoperabilidade entre eles, possibilita a distribuição de inteligência entre controladores, instrumentos, atuadores (válvulas, motores, chaves liga-desliga, relés, dentre outros) e também entre os sensores (pressão, temperatura, vibração, carga, dentre outros). Neste caso, é possível todos eles cooperarem de forma integrada e, como principais conseqüências desta integração, citam-se: (i) a complexidade das interações entre os elementos do sistema e (ii) a necessidade de utilização de novas ferramentas e novas

tecnologias para a modelagem do comportamento dinâmico destes sistemas, assim como para a sua implementação (ARAKAKI, 2004).

Dentre as principais características esperadas de um SIA, se destacam:

a) Confiabilidade

A confiabilidade de um sistema expressa a garantia de que ele é capaz de se manter em funcionamento ininterrupto pelo tempo exigido por uma dada tarefa. É definida como a probabilidade de que o sistema funcione sem interrupções por um período de tempo determinado. Sistemas embarcados em satélites, nos quais as possibilidades de intervenção para reparo são mínimas, são exemplos de aplicações que exigem alta confiabilidade, pois um único defeito grave implica na perda do sistema inteiro e, eventualmente, no fracasso da tarefa (GUERRA, 2004).

b) Continuidade de operação

A continuidade de um sistema expressa a garantia de que ele é capaz de se manter em operação de forma ininterrupta. Em geral, situações como um dispositivo deficiente ou um controlador mal sintonizado são problemas identificáveis através de inspeções periódicas. Entretanto, na prática, estes problemas são identificados apenas após uma perda considerável de qualidade e desempenho, ou ainda após uma parada no processo industrial. Assim, perdas econômicas decorrentes de uma descontinuidade operacional – sejam por defeitos nos equipamentos ou por paradas programadas para manutenção – vêm requerendo métodos de manutenção e inspeção mais eficientes e com menor interferência no processo.

c) Disponibilidade

A disponibilidade de um sistema expressa a garantia de que ele estará apto a fornecer seus serviços no momento em que for requisitado. É definida como a probabilidade de que o sistema esteja em funcionamento em algum instante de tempo futuro (GUERRA, 2004). Sistemas de controle de tráfego aéreo são exemplos de aplicações que exigem elevada disponibilidade.

d) Tolerância a falhas

Tolerância a falhas é uma importante característica a ser considerada, de modo a evitar uma falha e seus efeitos ou permitir ao sistema continuar seu funcionamento seguro mesmo em presença de falhas, ainda que com um escopo reduzido (BONASTRE *et al.*, 2002). Sistemas com essas características são ditos robustos ou tolerantes a falhas. Exemplo de

tolerância a falha em SIAs, através de mecanismos de prevenção, é a utilização de intertravamento de segurança em equipamentos. Neste caso, a tolerância a falhas é usada para evitar que o sistema seja degradado em razão de um funcionamento inadequado. Mas em situações de falhas não previstas, é importante que o sistema esteja apto a reagir de modo a minimizar os impactos dessas ocorrências.

Uma condição necessária para tornar um sistema tolerante a falhas é o emprego de redundâncias, ou seja, características ou estratégias que, em condições ideais de funcionamento, não seriam necessárias ou utilizadas (GUERRA, 2004). Além disso, é necessário que variáveis importantes sejam controladas em tempo real, possibilitando uma atuação mais imediata e eficiente no sistema.

Entretanto, quando é considerada a grande quantidade de variáveis existentes em um SIA e a necessidade de supervisão e controle da estabilidade de seus valores, a sincronização, gerenciamento* e controle mais eficiente destas informações assumem maior relevância, já que, em geral, os dados são obtidos de fontes distribuídas e de forma assíncrona.

e) Tempo de resposta aceitável

O controlador deve suportar protocolos de comunicação determinísticos e em tempo real. Cada sistema deve estar apto a possibilitar a interação distribuída entre os diversos componentes relacionados e a suportar sua reconfiguração em um tempo de resposta aceitável.

f) Manutenção da Integridade

A manutenção da integridade está relacionada com a disponibilidade de informações confiáveis e em formato compatível com as requeridas. O sistema deve realizar suas tarefas de modo que as restrições de integridade local, e do sistema como um todo, sejam preservadas. Ou seja, ainda em ocorrência de falhas ou situações que possam causar danos ao sistema como um todo, as tarefas locais devem ser conduzidas de modo a garantir que a operação local permaneça em modo, ao menos, seguro.

Este modo seguro pode significar diversos possíveis cenários, a depender do tipo de processo modelado e de suas restrições de integridade. Por exemplo, em se tratando de processos químicos, em caso de falha geral após iniciada uma reação, a depender dos elementos envolvidos na combinação, o sistema só poderá interromper o processo, se necessário for, após concluir o ciclo atual de operação, evitando os efeitos decorrentes.

O GCAD visa a tornar os SIAs autônomos e adaptáveis, em especial sistemas com células distribuídas e com restrição associada ao tempo de continuidade e tempo de resposta entre elas, promovendo sempre que possível uma tomada de decisões e atuação em nível local, seja com dados de uma célula ou através de cooperação entre diferentes células distribuídas e relacionadas. De forma complementar, um módulo de gerenciamento remoto visa a sinalizar situações não tratadas em nível local, realizar análises mais robustas e permitir a configuração das células distribuídas por especialistas do processo.

2.2 TRATAMENTOS DE FALHAS EM SISTEMAS

O comportamento de um sistema é função de seu estado interno e das entradas que recebe. Guerra (2004) define defeito* como um desvio entre o comportamento esperado de um sistema e o seu comportamento real, fazendo com que o sistema, em determinadas situações, funcione em desacordo com suas especificações. Um defeito é dito crítico quando resulta no comportamento desordenado do sistema. Em outros casos, pode haver apenas uma degradação nos serviços oferecidos pelo sistema, que mantém parte de sua funcionalidade intacta.

A ocorrência de um defeito (Figura 4) pode ser associada a um determinado estado interno do sistema que, sob determinadas entradas, provoca aquela ocorrência. Esse estado interno do sistema, que pode ou não provocar o defeito, é chamado de erro*. Já o agente causador deste erro é chamado de falha (LEE & ANDERSON, 1990 apud GUERRA, 2004 pp. 24).



Figura 4 – Origem da ocorrência de um defeito

Um defeito em um componente pode significar uma condição de falha para outro componente relacionado. Uma sucessão de eventos em que uma falha de componente produz outra falha em outro componente é denominada propagação de falha (GUERRA, 2004).

O tratamento de uma falha visa a evitar que esta se configure em um erro e, posteriormente, em um defeito. Adicionalmente, deve-se evitar a propagação de falhas. Desta forma, tem como objetivo maior garantir a confiabilidade e continuidade de funcionamento do sistema como um todo.

O principal obstáculo à tolerância a falhas é a imprevisibilidade de ocorrência de uma falha e dos seus efeitos sobre o sistema, já que a ação dos mecanismos de tolerância a falhas em geral é iniciada com a detecção de erros já presentes no sistema (GUERRA, 2004).

Um aspecto fundamental no desenvolvimento de sistemas confiáveis é o estabelecimento de hipóteses a respeito dos tipos de falhas a que o sistema estará sujeito. Durante o desenvolvimento de um sistema são assumidas diversas hipóteses de falhas, que limitam o escopo das várias estratégias de confiabilidade utilizadas no desenvolvimento do sistema. As hipóteses de falhas assumidas na fase de prevenção de falhas, por exemplo, podem não ser as mesmas assumidas na fase de tolerância a falhas. É essencial, portanto, que em cada fase desse processo sejam definidas claramente as hipóteses de falhas assumidas (KAÂNICHE, LAPRIE & BLANQUART, 2000 apud GUERRA, 2004 pp. 52-53).

Quanto ao tipo, Guerra (2004) classifica uma falha basicamente em quatro tipos:

- **Falhas humanas:** são aquelas provocadas acidentalmente ou intencionalmente por um operador ou qualquer usuário que tenha acesso ao sistema.
- **Falhas ambientais:** são aquelas causadas pelos agentes da natureza e do meio-ambiente físico em que o sistema é utilizado.
- **Falhas de projeto:** introduzem no próprio sistema, de forma permanente, "mecanismos" capazes de levá-lo a um estado interno inconsistente. Quanto mais complexo for um componente, maior a probabilidade de conter falha desse tipo. Falhas de software (componentes de natureza imaterial) estão associadas a falhas de projeto, que ocorrem nas fases de planejamento e implementação de um sistema computacional.
- **Falhas de hardware:** decorrentes de desgaste físico ou de falhas ambientais em componentes materiais.

Quanto à duração, Guerra (2004) classifica uma falha em três categorias:

- **Permanente:** quando exige uma ação externa de manutenção do sistema para remover seus efeitos e reparar o agente causador, como no caso do rompimento de uma tubulação.
- **Intermitente:** que, embora também exija uma ação externa para reparar o agente causador, não se manifesta permanentemente. O desgaste físico de um componente mecânico, por exemplo, pode, sob certas circunstâncias, interferir no funcionamento de algum dispositivo de modo intermitente.

- **Transiente:** que se manifesta por um curto período de tempo, desaparecendo espontaneamente sem que seja necessária qualquer ação externa, como no caso de uma sobretensão momentânea na rede de alimentação elétrica.

O tratamento de falhas pode ser feito basicamente de três formas:

- **Correção automática:** neste caso, na ocorrência de uma falha, o sistema atua de forma automática de modo a corrigir a falha detectada e evitar estados de erro no sistema ou ainda defeitos que possam afetar o funcionamento local de forma crítica ou propagar falhas aos demais sistemas integrados.
- **Lançamento de exceção:** ocorre quando o sistema identifica uma falha não crítica no sistema, mas não é capaz de corrigi-la de forma automática (ou esta ação não é recomendável). Consiste na sinalização das falhas para que os responsáveis ou demais sistemas possam executar as ações de recuperação mais apropriadas ao contexto atual e ao estado global* do sistema.
- **Parada imediata:** ocorre quando o sistema identifica uma falha crítica cuja ação automática ou por especialistas não seja possível, ou não possa ser realizada em tempo hábil, e possa vir a causar defeitos permanentes ou irreparáveis em um componente ou em todo o sistema. Neste caso, é necessário que a parada do sistema ou de componentes ocorra de forma segura. Ou seja, o sistema deve evitar conseqüências como perdas de vidas humanas ou danos materiais, em decorrência do funcionamento do sistema, mesmo na presença de defeito. Além disso, o sistema deve ser capaz de preservar a integridade e confidencialidade das informações que mantém, mesmo na presença de defeito.

Este trabalho visa a identificar e a tratar as falhas permanentes ou intermitentes de sistemas em seu estágio inicial, evitando que estas se configurem em erros e defeitos e evitando a propagação de falhas tanto localmente como em sistemas interligados. De forma a delimitar o escopo de atuação do GCAD, algumas hipóteses de falha são assumidas na seção 3.2.6.

O tratamento às falhas visa a ser automático, corrigindo-as, sempre que possível, em tempo real e sinalizando ou negociando os ajustes locais realizados ou necessários com os sistemas relacionados, para que estes analisem a eventual necessidade ou possibilidade de

ajuste interno. Nas situações em que as falhas forem permanentes ou não tratáveis em nível local, ou ainda quando o tratamento a uma falha não é identificado, deve-se realizar o lançamento de exceções para sistemas relacionados. Adicionalmente, em situações extremas, através da configuração de um Modo de Falha (ver seção 3.3.1) integrado ao sistema de intertravamento, o GCAD deve conduzir o sistema a uma parada segura imediata, interrompendo dispositivos ou equipamentos que apresentarem conflitos não tratáveis em nível local ou ainda que possam desencadear a propagação de novas falhas.

2.3 SISTEMAS DE CONTROLE E SUPERVISÃO

Um sistema clássico de controle (Figura 5) consiste na realimentação de um processo, a fim de refiná-lo ou ajustá-lo.

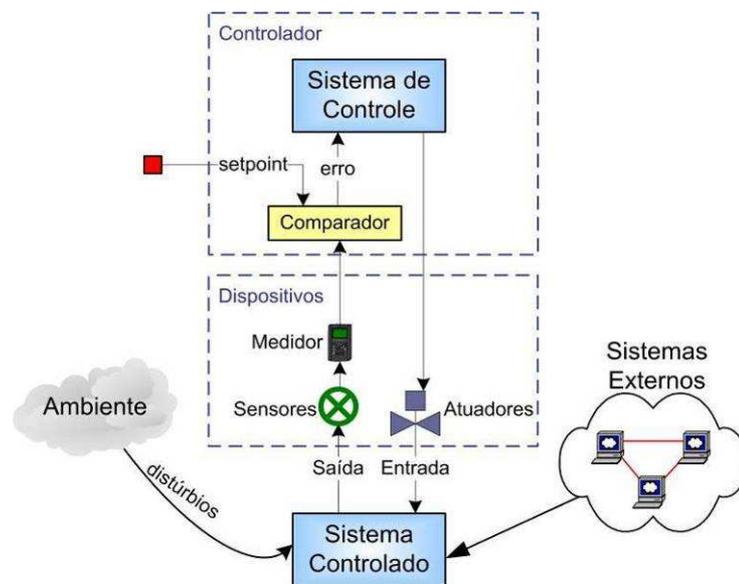


Figura 5 – Representação de um sistema de controle simples

As variáveis de saída do sistema controlado são obtidas através de instrumentos de medição, que contém sensores* (Figura 6). Estes valores são comparados com um valor de referência (*setpoint*) fornecido externamente. Sendo produzido um erro, este serve de informação para a decisão de como agir no sistema. A realimentação no sistema é feita através de atuadores, de forma que o sistema controlado apresente um determinado resultado (HEINEN, 2002).

O projeto de sistemas de controle envolve alguns princípios que lhes permitam cumprir seus objetivos, e uma exigência fundamental é a estabilidade*. Ou seja, mesmo diante

de perturbações*, o sistema deve ser capaz de retornar a uma condição de equilíbrio. Em geral, o processo clássico de controle é realizado por métodos precisos, como o controle PID.

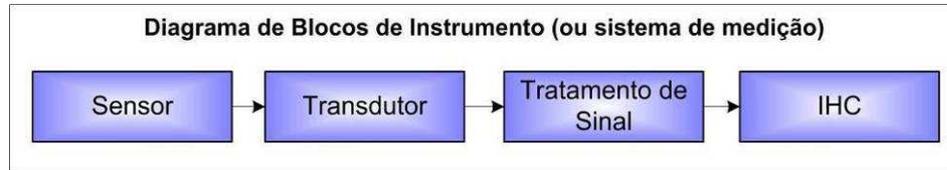


Figura 6 – Diagrama de bloco de instrumento (ou sistema de medição)

O sistema deve apresentar um tempo de resposta aceitável e deve ser ajustado até que seus erros sejam reduzidos a algum valor mínimo aceitável e o processo possa ser otimizado. No entanto, exatidão e tempo de resposta aceitável tendem a ser requisitos conflitantes entre si, sendo necessário estabelecer uma relação eficaz entre eles, de modo a satisfazer às restrições mais críticas do sistema.

Como já dito, os sistemas de controle industriais tendem a se tornar complexos, com um grande número de variáveis, ações e controles. Conseqüentemente, um controle centralizado pode se tornar caro, complexo e lento. Assim, dividir o controle em partes menores que possam ser controladas individualmente possibilita sua distribuição em dispositivos com recursos limitados de memória ou processamento, passando a ser uma solução atrativa. Vários são os motivos para esta alternativa, dentre eles: maior facilidade de desenvolvimento, operação e administração, manutenção simplificada e confiabilidade do sistema como um todo – mau funcionamento de uma parte não implica, necessariamente, no mau funcionamento de todo o sistema (WATANABE, 2006).

Com a entrada da tecnologia *fieldbus* no mercado, surge uma nova alternativa para o controle distribuído, disseminando ainda mais a utilização de dispositivos inteligentes. Esses dispositivos são dotados de alguma capacidade de processamento e interligados através de um barramento, formando uma rede através da qual será possível a troca de mensagens entre eles. Além disso, o controle do sistema de automação passa a ser de responsabilidade também da rede de controladores, ou ainda de uma rede de dispositivos, e não mais exclusivas a um único elemento centralizador (CLP Mestre, PC, etc.) (WATANABE, 2006).

O conceito de células autônomas ganha evidência quando surge ou aumenta a necessidade de decisões e atuações mais rápidas em nível local. Mas para isso, é necessário que estas células sejam dotadas de uma capacidade de análise e decisão local, mesmo quando

existem sistemas externos influenciando seu comportamento e mesmo em ausência de um especialista.

A necessidade de existência do elemento centralizador fica por conta de um gerenciador remoto e não mais com a finalidade de controle total. As células do sistema (dispositivos inteligentes conectados ao barramento de campo), quando isoladas, executam tipicamente tarefas simples de sensoriamento, monitoração e atuação, mas, quando dispõem de um módulo de inteligência local e trabalham de forma conectada às demais, ainda que desconectadas do gerenciador remoto, podem realizar tarefas mais complexas, como um controle autônomo (WATANABE, 2006).

2.3.1 Controladores Lógicos Programáveis

Um CLP é um equipamento capaz de executar funções como: lógica, sequenciamento, temporização, contagem e operações aritméticas, para, através de módulos de entrada e saída (digital e analógica), controlar diversos tipos de máquinas e processos. São sistemas modulares compostos basicamente de: fonte de alimentação, Unidade Central de Processamento (UCP), memórias volátil e não-volátil, dispositivos de entrada e saída, terminal de programação, módulos de comunicação e módulos especiais (opcionais) (MORAES & CASTRUCCI, 2001). Próprios para ambientes industriais, os CLPs apresentam como principais vantagens: alta confiabilidade, flexibilidade, velocidade, execução de funções avançadas, comunicações e diagnóstico (FERNANDES JUNIOR *et al.*, 2005).

Os CLPs realizam uma rotina cíclica de operação, o que caracteriza seu princípio de funcionamento. A cada dia, novos recursos lhe são adicionados, tornando-o cada vez mais prático e eficiente nas tarefas a que se destina. Dentre esses novos recursos, as principais inovações observadas são relacionadas à comunicação, tanto entre os operadores e os sistemas (interfaces humano-computador) como entre máquinas (redes de campo) (FERNANDES JUNIOR *et al.*, 2005).

Os CLPs para processos contínuos evoluíram juntamente com a microeletrônica e passaram a utilizar circuitos mais complexos, microprocessados, de forma a poderem utilizar poderosos recursos e efetuarem técnicas de ação de controle dos mais diversos tipos, como: PID, PID adaptativo (não linear), Lógica *Fuzzy* (lógica nebulosa), Preditiva, entre outros (FERNANDES JUNIOR *et al.*, 2005).

Neste trabalho, os CLP são utilizados para a demonstração da atuação do GCAD, que visa a lidar com falhas que em geral não são identificadas ou não são tratadas em tempo hábil e de forma eficiente pelos controladores tradicionalmente utilizados.

2.3.2 Sistemas de Supervisão e Controle

Os Sistemas de Supervisão e Controle (SSC), a exemplo dos *Distributed Control System* (DCS) e *Supervisory Control And Data Acquisition* (SCADA), são softwares destinados a obter dados de controladores, dentre outros dispositivos, e a atuar como IHC do processo, com base em procedimentos pre-estabelecidos. Os SSCs permitem a operadores humanos (engenheiros e operadores do processo): visualizar as informações e cenários operacionais dos processos supervisionados, a partir de telas preconfiguradas, alterar parâmetros de controle dos dispositivos interligados, ativar ou desativar dispositivos, ou ainda visualizar relatórios e gráficos, de forma a realizar análises e diagnósticos que lhe permitam tomar decisões e interferir no processo, especialmente em situações emergenciais.

Atualmente, os SIAs podem alcançar elevados níveis de complexidade, tornando difícil a supervisão eficiente de todas as células por um único operador. Assim, para sistemas relativamente complexos, tem sido comum designar diversos operadores, para que cada um monitore e controle células específicas. Por conta disso, os operadores acabam se tornando especialistas em subáreas do processo, muitas vezes operando diversas IHCs simultaneamente. Estas ações geralmente ocorrem de forma manual, requerendo a presença de operadores em salas de supervisão e controle, e estando sujeitas às implicações decorrentes de processos não automáticos (PACHECO & LEPIKSON, 2010).

Os SSCs têm como objetivo prover uma visão remota das células distribuídas, exibindo os dados dos processos e de seus dispositivos, tais como sensores, medidores, atuadores, alarmes e equipamentos de segurança. Além disso, sinalizam os sistemas que apresentem alguma anormalidade, realizando análises remotas e exibindo gráficos de tendência.

Os SSCs dispõem de telas, que representam o processo, que podem ser animadas (através das telas de sinóticos) em função das informações recebidas dos dispositivos conectados. Por exemplo: no acionamento de uma bomba, a representação na tela muda de cor indicando que ela está ligada; se um determinado nível varia no campo, a representação na tela muda indicando a alteração de nível (FERNANDES JUNIOR *et al.*, 2005).

Em uma arquitetura de controle para sistemas de produção, a principal função de um SSC é a tomada de decisão em tempo real, de forma a resolver os indeterminismos inerentes ao funcionamento do sistema. O SSC permite a configuração de planos de ação que especificam previamente um escalonamento das operações a serem executadas (AGUIRRE, 2007a).

Entretanto, os SSCs mais comuns auxiliam remotamente permitindo apenas configurações de controle tais como liga/desliga ou parametrizando variadores de frequência, o que nem sempre são suficientes. Em se tratando de sistemas* críticos, se a obtenção de informações do processo ocorrer em intervalos irregulares de tempo, o sistema pode se tornar ineficaz, já que muitos problemas que deveriam ser detectados e tratados rapidamente são tratados manualmente ou com atraso, quando o sistema já pode estar em colapso e com comprometimento irreversível do sistema controlado ou do seu ambiente (TORRES & HORI, 2005).

Os SSCs mais modernos, ainda quando permitem uma visão integrada da planta em tempo real, em geral se resumem ao acompanhamento de sistemas de produção e à notificação de alarmes das unidades através de sistemas de comunicação, como e-mails e mensagens de celular. Mas em se tratando de sistemas distribuídos com forte interdependência entre as informações ou envolvendo cooperação entre eles, a tarefa de supervisão e controle se torna difícil de realizar manualmente, especialmente quando se observam restrições de continuidade e tempo de resposta (PACHECO & LEPIKSON, 2009).

Os SSCs apoiam a decisão em situações críticas, como em sistemas com redundância, em que há diagnósticos conflitantes. Por exemplo, quando um sensor indica que determinada variável está normal e um segundo indica anormalidade. Uma alternativa de hardware seria a redundância física, a exemplo da redundância tripla, que consiste no uso de duas réplicas de um mesmo componente para permitir a comparação dos resultados e a seleção de um resultado considerado correto por desempate. Entretanto, em se tratando de sistemas com diversas malhas de controle, algumas delas bastante complexas, uma solução de hardware, embora seja de grande utilidade para possibilitar a continuidade de funcionamento, oneraria muito mais do que uma solução de software, caso fosse aplicada em toda a planta. Adicionalmente, softwares analisadores podem ser utilizados em conjunto com a redundância de hardware.

O GCAD propõe uma nova abordagem de SSC: os MGRs, que além de incorporarem funções de supervisão, visam a realizar de forma remota atividades de otimização, simulação, análises preventivas e corretivas. Adicionalmente, visa a fornecer aos

especialistas do processo uma IHC para configurações e ajustes remotos das células gerenciadas.

2.3.3 Arquiteturas de Controle

Segundo Aguirre (2007a), os sistemas de controle, a depender da disposição e utilização dos seus controladores, podem ser classificados basicamente em quatro arquiteturas: centralizada, hierárquica, heterárquica e híbrida.

O sistema de controle centralizado (Figura 7) utiliza um computador central ou um controle que gerencia e mantém todos os planos e informações de funções dos processos em um banco de dados global (AGUIRRE, 2007a).

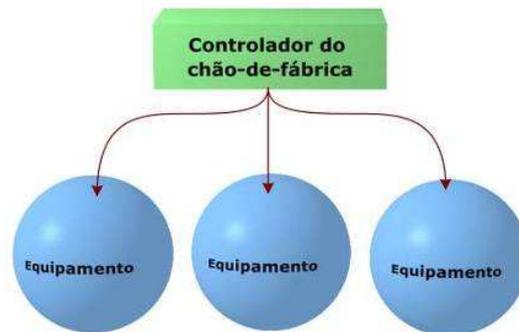


Figura 7 – Arquitetura de controle centralizado

Dentre as vantagens desta arquitetura, estão: acesso às informações globais; possibilidade de otimização global; informações de estado do sistema em uma única fonte. Dentre as desvantagens, citam-se: o tempo de resposta demorado e inconsistente; uma única unidade de controle pode se tornar um gargalo e comprometer a confiabilidade do sistema; software de controle de difícil modificação (AGUIRRE2007a).

Tradicionalmente, uma arquitetura centralizada torna o controle refém do desempenho do computador central, sendo mais adequada a um ambiente completamente determinístico, em detrimento dos SIAs distribuídos, onde esse tipo de controle não tem seu melhor desempenho (DESHMUKH *et al.*, 1995; CHOI *et al.*, 2000).

A arquitetura hierárquica (Figura 8) tem sido comumente utilizada entre os SIAs que, em virtude disto, têm adotado um controle tipicamente mestre/escravo, no qual a troca de informações entre os controladores da mesma hierarquia não é permitida e um elemento superior enxerga somente o subordinado imediato. O rigoroso relacionamento entre

mestre/escravo pode tornar esta arquitetura impraticável ou ineficiente em sistemas de controle industrial, devido à complexidade da unidade a ser controlada ou aos atrasos introduzidos pela separação física das operações (AGUIRRE, 2007a).

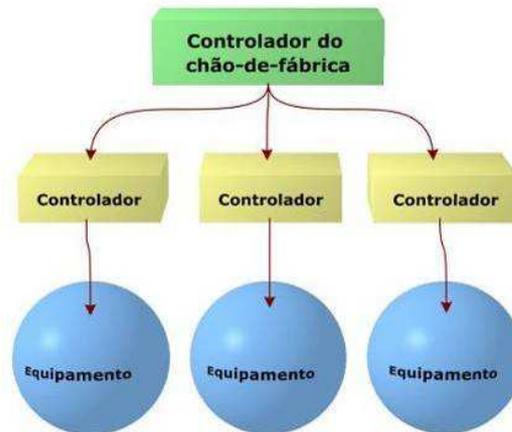


Figura 8 – Arquitetura de controle hierárquico

Em uma arquitetura hierárquica, a essência de seus componentes possui um aspecto fixo e outro variável. O primeiro é determinado por um conjunto de regras físicas, as quais lhe impõem um padrão característico; o segundo, associado à flexibilidade, ocorre através de escolhas entre alternativas permitidas (FRANCO, 2003). Entretanto, devido à sua natureza estática e determinística, esta arquitetura é de difícil modificação, para incorporar, por decorrência, mudanças não previstas dentro do sistema (MARTINS, 2005).

A arquitetura heterárquica (BONGAERTS *et al.*, 2000) é uma forma de controle altamente distribuída, onde as decisões de controle podem ser alcançadas pela livre troca de informações entre os agentes participantes. É composta de um conjunto de controladores semi-independentes, sem uma hierarquia mestre/escravo (Figura 9), tendo como principais características a autonomia local completa e cooperação na tomada de decisões.

Conseqüentemente, esta arquitetura leva o chão de fábrica a ser modular, expansível e autoconfigurável. Além disso, o avanço tecnológico da computação e dos sistemas de comunicação permitiu um aumento de velocidade de processamento de dados, permitindo que as comunicações entre controladores sejam feitas a uma velocidade muito mais alta e com uma carga computacional reduzida (AGUIRRE, 2007a).

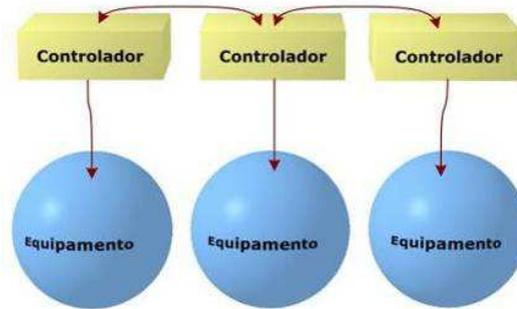


Figura 9 – Arquitetura de controle heterárquico

Uma vantagem desta arquitetura é poder ser aplicada em SIAs relativamente complexos, já que consiste de entidades autônomas ligadas em barramento, retendo um mínimo de informação global. Em contrapartida, isso causa uma grande dificuldade na resolução de conflitos, já que os controladores têm a visão unilateral do fabricante de cada entidade e só se comunicam com controladores da mesma hierarquia (AGUIRRE, 2007a).

Um importante aspecto que indica se um sistema distribuído se comporta como uma unidade é a coerência. O problema é como manter a coerência global, criando-se uma estrutura capaz de determinar os objetivos em comum e dividir as tarefas de modo a evitar conflitos desnecessários. Os avanços tecnológicos em computação e comunicação possibilitaram que arquiteturas pudessem ser construídas para tratar esse tipo de problema (FRANCO, 2003).

A arquitetura de controle é considerada híbrida (Figura 10) quando seus elementos estão interconectados uns aos outros, como um sistema heterárquico, fazendo com que seja modular, expansível, autoconfigurável e com uma relação hierárquica com o nível mais alto (controlador do chão de fábrica) (AGUIRRE, 2007a).

Esta arquitetura traz como vantagem a possibilidade de cooperação entre os elementos do nível de controle, além de possibilitar um gerenciamento em nível remoto. Entretanto, para alguns sistemas, sua implantação pode se mostrar complexa, especialmente para um grande número de elementos distribuídos.

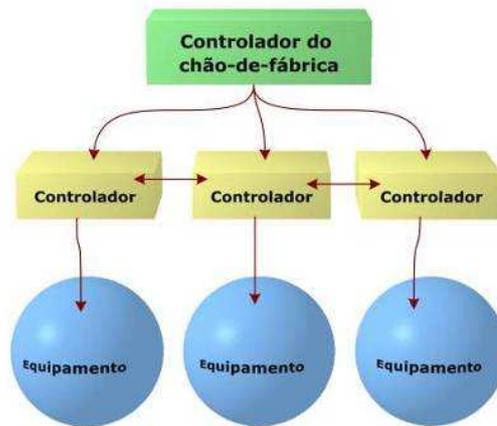


Figura 10 – Arquitetura de controle híbrido

O surgimento do conceito de integração acoplado à evolução do sistema em rede vem possibilitando a distribuição das diferentes funções do SIA em: controle, supervisão e gerenciamento de negócios, porém de forma integrada. Em seguida, o surgimento das redes *fieldbus* integrou dispositivos de campo (entrada e saída), IHC e CLP, e proveu o uso da inteligência para a execução dos protocolos digitais, tendo como conseqüências: a execução de autodiagnósticos, a distribuição e execução do algoritmo de controle (ou partes dele) de forma embarcada nos dispositivos de campo e a garantia de que os dados transmitidos sejam os mesmos que os dados encontrados nos sensores ou os enviados para os atuadores. Um exemplo de arquitetura de supervisão e controle pode ser representado pela Figura 11 (AGUIRRE, 2007b).

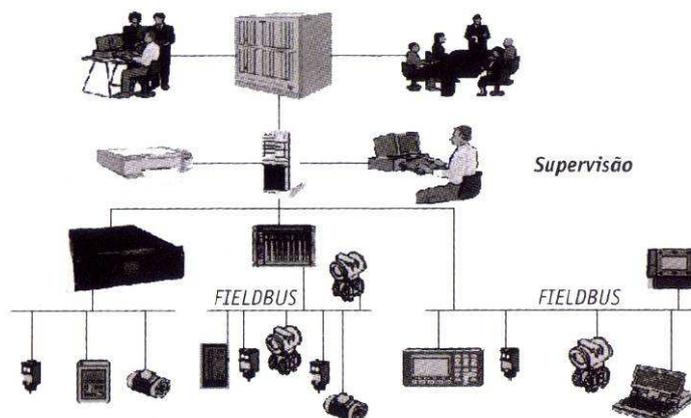


Figura 11 – Arquitetura de controle e supervisão com *fieldbus*
Fonte: Aguirre (2007b)

O GCAD utiliza uma arquitetura híbrida de controle e propõe que os SIAs sejam interconectados através de Módulos Cognitivos (MC) acoplados a cada sistema local. Adicionalmente, cada MC deve estar hierarquicamente subordinado a um Módulo de Gerenciamento Remoto (vide Capítulo 3).

2.3.4 Controle de SIA Críticos

Com o avanço da tecnologia e da complexidade dos processos, tornou-se ineficaz ou até impossível a utilização dos controladores convencionais obtidos a partir da Teoria* Clássica de Controle. Isto desencadeou uma busca por novos métodos e estratégias de controle, como: multivariável, adaptativo, preditivo e inteligente, entre outros (FERNANDES JUNIOR *et al.*, 2005).

A disponibilidade de recursos computacionais e o aumento significativo do fluxo de informações possibilitam que os SIAs sejam dotados de especificações cada vez mais rigorosas e disponham de funcionalidades cada vez mais complexas. Assim, seus respectivos SSC devem ser capazes de incorporar constantemente novos requisitos para atender de forma consistente a estas novas especificações, o que leva ao aumento da complexidade dos componentes dos SSCs a serem projetados (ARAKAKI, 2004).

Uma característica fundamental para um SIA considerado crítico é a capacidade de reconfiguração, em caso de ocorrência de situações (eventos) inesperadas, como a falha em alguma de suas células. Neste caso, é desejável que os demais serviços e tarefas essenciais sejam mantidos, ou ainda, havendo a necessidade de desligar todo o sistema, isto deve ser realizado de forma controlada, minimizando impactos nos outros módulos ou nos usuários das células, visando sempre a atingir os objetivos inicialmente definidos para o SIA. Entretanto, a grande maioria dos sistemas de controle não possui mecanismos de reconfiguração e o problema local de um módulo afeta o funcionamento do sistema como um todo (ARAKAKI, 2004).

Para tratar estas situações, é necessária uma constante supervisão e controle das tarefas do SIA, sendo que os componentes do sistema de controle devem ser dotados de um adequado grau de autonomia e de inteligência, bem como estar organizados de modo distribuído e atuando como agentes inteligentes dentro de um sistema integrado e cooperativo. Estes requisitos são fundamentais para melhorar a eficiência, flexibilidade e a robustez dos sistemas de controle dos SIA (SANS & ARZÉN, 2003).

Para facilitar a manipulação do conjunto de elementos que compõem o sistema de controle, a utilização de técnicas de encapsulamento* dos componentes de software baseadas no paradigma Orientado a Objetos (OO) traz boas contribuições, quando permite a modularização destes elementos. Entretanto, segundo Aguirre (2007a), os Sistemas Multiagentes (ver seção 2.4.2) são fortes candidatos à sucessão dos sistemas OO e têm sido amplamente discutidos nos principais centros de pesquisa em inteligência artificial (IA) do mundo.

Arakaki (2004) considera essencial que novos métodos para desenvolvimento de algoritmos que aumentam o grau de confiabilidade dos sistemas de controle no contexto de ocorrência de falhas sejam investigados. Desta maneira, os conceitos de controle distribuído em tempo real e Sistemas Multiagentes também devem ser considerados nas especificações para o projeto de controle dos SIAs, para que, na implementação de novos sistemas produtivos ou na alteração de sistemas já existentes, os softwares responsáveis pelo controle incorporem a flexibilidade e a robustez necessárias para o funcionamento efetivo e desejado. Assim, no caso de situações anormais em alguma parte do sistema, um controle inteligente deve desligar os serviços ou processos sem afetar de forma drástica todo o funcionamento do sistema produtivo ou ainda se recuperar e, de acordo com alguma contingência, retornar ao seu funcionamento normal (total ou parcial).

Seguindo as premissas descritas, este trabalho propõe o GCAD, que visa a possibilitar aos SIAs críticos: autonomia de decisão para as células distribuídas, maior confiabilidade e continuidade operacional, mesmo em ocorrência de falhas. As decisões devem ser tomadas, de preferência, localmente e distribuídas pela rede em tempo real. Adicionalmente, o GCAD é estruturado em módulos configuráveis e com interfaces bem definidas, baseados em agentes, de modo que manutenções corretivas e evolutivas sejam realizadas com impacto mínimo nos demais. O GCAD é descrito no Capítulo 3.

2.3.5 Controle Inteligente para SIA e Decisão distribuída

Modelos matemáticos de sistemas físicos são ferramentas essenciais para inúmeras áreas de conhecimento, inclusive para a automação. Modelos lineares são muito estudados e adotados para a solução de problemas do mundo real, porém, a representação precisa da maioria dos fenômenos da natureza inclui não-linearidades (AGUIRRE, 2008c).

Em processos industriais, operadores e especialistas eventualmente orientam decisões sobre o processo com base na observação e intuição. Este procedimento é definido

por Stephanopoulos e Han (1996) como uma habilidade cognitiva dos operadores especialistas, que permite avaliar o comportamento do processo, associar os atuais acontecimentos a padrões conhecidos e prever os efeitos de possíveis ações de controle. Entretanto, O'Shima (1983) expõe deficiências na fundamentação deste conhecimento por conta de possíveis erros de julgamento dos operadores a partir de uma impressão errada do que está acontecendo no processo.

O controle de um processo industrial envolve a realização de inúmeras tarefas que vão desde o acionamento de equipamentos e dispositivos de produção, passando pela contínua supervisão e ajuste de dispositivos, suspensão ou até interrupção da operação.

Entretanto, na realidade atual, em situações emergenciais que exijam solução ou, ao menos, a identificação rápida e imediata, como no rompimento de uma tubulação crítica, a detecção de um problema a partir de centrais remotas, tais como SSC, pode não ser imediata, já que requer a presença constante de pessoas observando os painéis de supervisão. Já a identificação da solução, bem como a atuação, em geral, requer análises em campo e a ação de operadores *in loco*, em especial quando se considera a grande quantidade de variáveis interconectadas. Além disso, os operadores estão sujeitos desde aos riscos do ambiente de uma planta de processo, muitas vezes em locais inóspitos, a atrasos na detecção do ponto de falha e atraso devido ao deslocamento.

O GCAD propõe o controle local autônomo, com decisões distribuídas em tempo real para os sistemas interrelacionados, de forma a minimizar o tempo de atuação em situações de falha e visando a restringir a ação manual por operadores *in loco*, muitas vezes em locais inóspitos, para situações de fato necessárias.

2.3.6 Controle de Sistemas de Produção de Petróleo

Na indústria do petróleo, a necessidade de um controle automático e autônomo se justifica pela grande complexidade envolvida no processo de produção. Um campo de produção de petróleo em geral abrange vários grupos de poços, cada um com seus níveis específicos de produção e características particulares de funcionamento.

As plantas reais instaladas em campos produtores são, na maioria das vezes, bastante complexas, com grande número de equipamentos e componentes, com características de um sistema não linear, com variações no decorrer do tempo e com tarefas multiobjetivas (PATRICIO, 1996). Além de prejuízos econômicos, se estas plantas não forem controladas corretamente e em tempo hábil, existe o risco de acidentes ambientais (provocados, por

exemplo, por vazamentos) ou problemas decorrentes de um funcionamento inadequado de uma ou mais unidades de produção (CORRÊA, 1995). Dessa forma, tais sistemas se enquadram na classificação dos sistemas críticos.

Sistemas de produção de petróleo (ver Apêndice B – Sistemas de Produção de Petróleo), além de envolverem um produto de alto valor agregado e de alto risco, apresentam diferentes comportamentos em função das características de cada unidade de produção, dificultando a adoção de soluções genéricas e passando a exigir um acompanhamento mais específico. É, portanto, natural candidato a sistemas igualmente complexos de controle e gerenciamento, sendo um campo bastante adequado para a aplicação de técnicas avançadas de controle (CORRÊA, 1995).

Essas unidades desafiam a construção de modelos matemáticos práticos que as representem. Algoritmos padrões de controle e aperfeiçoamento são utilizados com limitações para controlar uma planta, já que, em geral, realizam funções elementares de controle convencional (TANI, MURAKOSHI & UMANO, 1996).

Em muitas situações, existe a necessidade de supervisão e controle a longa distância, seja pela distribuição geográfica dos sistemas controlados distantes entre si, em regiões inóspitas ou locais de difícil acesso, dificuldade de manutenção, necessidade de racionalização e rapidez na tomada de decisões, dentre outros motivos. Dessa forma, os sistemas de supervisão e controle inteligente são de grande utilidade, pois oferecem eficiência e confiabilidade no gerenciamento destas tarefas, agilizando a prevenção e solução de problemas.

Entretanto, a topologia mais encontrada atualmente no controle de poços, quando automatizados, é tipicamente mestre/escravo, onde um controlador mestre envia requisições a cada controlador escravo, sobre estados dos pontos de Entrada e Saída (E/S) – sensores, atuadores, motores, etc. – e os escravos controlam os pontos de E/S e repassam as informações ao controlador mestre, quando solicitadas ou espontaneamente, caso ocorram eventos especificados (WATANABE, 2006).

Além disso, as operações de controle de um sistema, em geral, não são automaticamente negociadas com as tarefas realizadas em demais sistemas interligados, o que pode ocasionar em interferência negativa de um sistema em outro ou ainda, mais comum, em uma atuação limitada, a qual poderia ser expandida mediante negociação com sistemas envolvidos.

A comunicação dos SSCs remotos com os controladores locais existentes em cada sistema de produção, em geral, ocorre de forma hierarquizada, onde SSC coletam

periodicamente, por meio de controladores (em geral, CLPs) acoplados a cada sistema de produção, os resultados produzidos.

Em muitas situações, a solução de um impasse, ou uma situação que requer uma decisão complexa, demanda um conhecimento prévio e não trivial sobre situações anteriores. Sistemas de produção geralmente são supervisionados e controlados por especialistas que, através de SSCs, interpretam os dados coletados, para então decidir que ação de controle deve ser executada, muitas vezes baseados apenas em sua experiência.

Isto significa que decisões sobre atuações envolvendo sistemas distribuídos e fisicamente relacionados entre si, em geral, ainda estão sujeitas a atrasos decorrentes de uma atuação não-automática, pois até o momento do reparo ou ajuste por operadores *in loco*, as ações poderão não mais refletir com fidelidade a realidade.

Em se tratando de sistemas críticos, a centralização total do processo decisório demonstra grandes desvantagens, pois caso suas demandas de confiabilidade e de tempo real não sejam atendidas, os resultados podem ser indesejáveis, tanto em termos de continuidade operacional e confiabilidade do processo, como em termos financeiros.

Além disso, em virtude dos diferentes níveis de experiência dos diversos especialistas, há o risco de se obterem interpretações diferentes e subjetivas, ou ainda, possíveis erros de julgamento. Ademais, procedimentos manuais e não-automatizados podem tornar o processo decisório mais susceptível a falhas de controle e a eficácia do processo acaba sendo reduzida ou comprometida. Quando isto ocorre com sistemas críticos, especialmente quando estes requerem um nível elevado de precisão na detecção e atuação do controle, é possível que ele esteja trabalhando em condições de operação inadequadas e, muitas vezes, perigosas. Por isso, a utilização de técnicas de processamento inteligente pode ser bastante útil, sistematizando este conhecimento e minimizando discontinuidades, o que pode ser útil em caso de ausência do especialista responsável.

Quando a tarefa de decisão é designada a sistemas locais autônomos, distribuídos e heterogêneos de uma rede, a coordenação se torna um aspecto importante, já que as ações devem estar direcionadas para os objetivos globais do sistema. Assim, as ações locais devem ser realizadas de forma a alcançar os resultados esperados e evitar situações consideradas indesejadas por um ou mais sistema interligado, e possibilitando que o sistema, na sua totalidade, possa evoluir de maneira harmônica e segura (PACHECO & LEPIKSON, 2010).

De modo geral, o fluxo de operação da produção atual no estado da arte é representado pela Figura 12 (PACHECO & LEPIKSON, 2010).



Figura 12 – Unidade de Produção no estado da arte

Segundo Patrício (1996), a utilização da automação em um campo de petróleo tem como principal objetivo aumentar a produtividade do campo através de:

- Manutenção da produção com a redução das equipes de operação (ou aumento da produção com o mesmo contingente operacional);
- Acompanhamento mais preciso dos poços e do processo, já que, em um sistema automatizado, as anormalidades no funcionamento são detectadas rapidamente;
- Maior continuidade em locais isolados;
- Acréscimo e otimização da produção, devido à continuidade operacional;
- Redução de custos e a otimização da manutenção dos equipamentos.

A ideia central é a automação e controle de poços e seus processos de forma a otimizar a produção, já que é consideravelmente difícil maximizar a vazão de um campo produtor controlando manualmente a produção de vários poços (PATRICIO, 1996).

A recente evolução das tecnologias de automação para campos de petróleo tem promovido uma grande revolução na indústria de óleo e gás de todo o mundo, levando ao emergente desenvolvimento de campos inteligentes (AL-KHAMIS *et al.*, 2009).

Campos inteligentes de petróleo (em inglês, *smart fields*) têm sido caracterizados como sistemas de produção automatizados, equipados com sensores que leem variáveis como: pressão, temperatura e vazão, além de controlar atuadores, alguns destes podendo ser ajustados em tempo real e à distância por meio de IHCs, de forma a controlar o funcionamento do sistema de produção.

A integração de tecnologias de campos inteligentes associadas às redes de comunicação, juntamente com aplicações sofisticadas de gerenciamento remoto têm levado a avanços significativos não apenas nas capacidades de supervisão e controle, mas também nos processos de tomada de decisão (AL-KHAMIS *et al.*, 2009).

O conceito visa a melhorar a qualidade e a velocidade na tomada de decisão e atuação, integrando pessoas, processos e tecnologias suportadas pelo acesso, em tempo real, a dados de processo e informações gerenciais, pelo uso de modelos de simulação e outras ferramentas analíticas. Esta integração tem permitido monitorar o desempenho de poços e instalações de campo em relação às metas definidas, para então detectar anomalias em um estágio inicial.

Entretanto, embora exista um elevado número de pesquisas significativas nesta área, as propostas de controle e supervisão inteligente em geral se referem ao suporte à decisão (de operadores, especialistas ou gerentes) com base nas informações agrupadas e processadas por estes sistemas, e não em uma decisão automática do próprio processo (a não ser em caso de ajustes mais simples). Em sistemas industriais automatizados críticos, estes ajustes nem sempre são suficientes, pois o sistema pode requerer correções imediatas envolvendo variáveis que afetam outros sistemas correlacionados. E quando os ajustes não são realizados em tempo hábil, é possível que haja descontinuidade nas operações envolvidas no processo, muitas vezes, com implicações em cadeia.

O GCAD apresenta características que visam a tratar sistemas heterogêneos, interdependentes e com fortes restrições de tempo de decisão e atuação. Sendo assim, é um forte candidato a beneficiar os sistemas de produção de petróleo.

2.4 INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

A busca por sistemas computacionais que apresentam algum tipo de comportamento inteligente, similar ao exibido por seres humanos sempre fascinou muitos cientistas graças a características como adaptabilidade, tolerância a falhas e robustez a variações ambientais. Tais características são bastante desejáveis em sistemas de engenharia, levando diversos pesquisadores a propor estratégias que procuram emular alguns destes aspectos observados. Dentre as áreas de pesquisa que procuram por sistemas artificiais inteligentes, uma das mais promissoras é a chamada inteligência computacional (IYODA, 2000). Esta compreende paradigmas computacionais que procuram desenvolver sistemas que

apresentam alguma forma de inteligência similar à exibida por determinados sistemas biológicos, a exemplo de RNAs, sistemas nebulosos (*fuzzy*) e computação evolutiva.

Características como capacidade de utilização e compartilhamento de conhecimentos entre agentes, rapidez de processamento, dentre outras (vide seção 2.4.2) tornam os Sistemas Multiagentes bastante úteis à proposta. Adicionalmente, consideram-se os aspectos dos Sistemas Complexos Adaptativos (vide seção 2.4.3) relacionados à auto-organização das estruturas (vistas como agentes), mesmo em face de situações que tendem ao caótico, e também para lidar com a necessidade de decisão e cooperação em ambientes complexos.

2.4.1 Sistemas de Controle Inteligente e Autônomo

A inteligência (Figura 13) pode ser definida como a habilidade de um sistema em integrar autonomia, cooperação e organização de forma eficaz, de modo a prover meios para se adaptar a diferentes situações e utilizar todo o conhecimento que se tem a sua disposição para conduzir à solução de um problema (FRANCO, 2003). E este é o princípio utilizado pelo trabalho proposto, integrando os dados do sistema a ser controlado com uma base de conhecimentos especializados e com características que possibilitem ao sistema se autoajustar para corrigir ou evitar falhas, sejam estas internas ou originadas por sistemas relacionados.

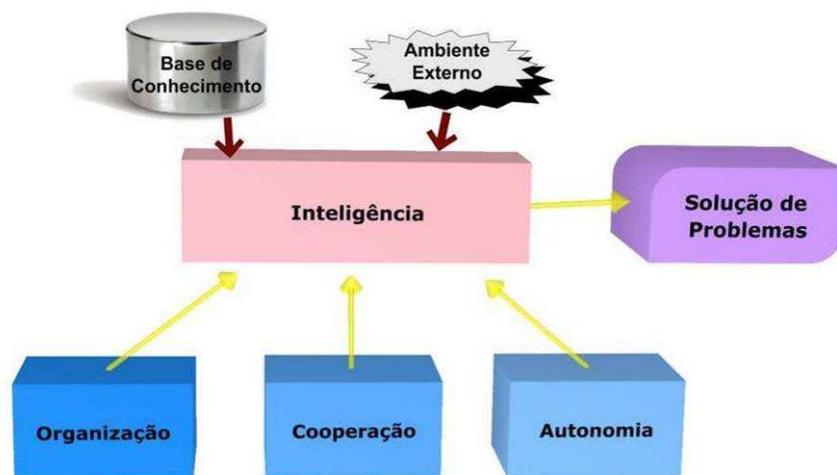


Figura 13 – Visão sistêmica da definição de inteligência (adaptado de Franco, 2003)

A utilização de sistemas inteligentes em controle tem despertado grande interesse nos últimos anos (CHEN & LINKENS, 2001). Sistemas de controle inteligente e autônomo

são designados para operar sem intervenção externa em ambientes submetidos a incertezas por longos períodos de tempo. Além disso, devem executar alguns procedimentos de controle, além dos convencionais, mesmo em sistemas estocásticos*. Estes procedimentos incluem regulagens, aprendizagem, reação e, quando possível, adaptação às mudanças do ambiente e às falhas internas do sistema, para assim, aprimorar seu desempenho e robustez (ANTSACLIS, 1989; ANTSACLIS, 1990).

Sistemas estocásticos podem ser lineares ou não-lineares. Em caso de sistemas estocásticos-lineares, estratégias aproximativas podem ser utilizadas para transformar restrições probabilísticas, definidas no problema estocástico, em equivalentes determinísticas*, permitindo uma simplificação do problema. Entretanto, o esforço computacional aumenta exponencialmente com a adição de novas variáveis de estado, além de não se poder garantir a factibilidade da solução frente às restrições impostas. Algumas estratégias aproximativas e restrições probabilísticas são listadas em Silva Filho (2000).

No caso de sistemas* complexos, não-lineares e baseados em informações imprecisas ou aproximadas, uma simplificação determinística dificilmente transformaria restrições probabilísticas, definidas no problema estocástico, em equivalentes determinísticas. Consequentemente, não atenderia de forma eficaz aos objetivos, já que alguns termos linguísticos descrevem contextos complexos que são muito difíceis de modelar com precisão matemática.

Entretanto, embora estes sistemas não possuam uma solução determinística, os especialistas conseguem resolvê-los de forma satisfatória usando seu conhecimento e percepção. Sistemas de controle inteligente podem ser definidos como controladores cujo mecanismo coordena a comunicação, decisões e banco de dados, podendo ter uma estrutura interna hierárquica e função de aprendizado conforme o ambiente. Alguns são providos de mecanismos de IA, podendo ainda incorporar um sistema de recuperação de erros, de forma a restaurar o sistema ao estado normal de operação (CHOI *et al.*, 2000)

Sistemas computacionais funcionam, em geral, interagindo com um ambiente externo diversificado, sujeito a incerteza e em constante mutação, formado por usuários, operadores, desenvolvedores, dispositivos de entrada e saída, redes de comunicação, sistemas de fornecimento de energia, outros sistemas computacionais, o meio-ambiente natural, dentre outros possíveis agentes (GUERRA, 2004).

Essa complexidade, durante o desenvolvimento de um sistema, demanda a criação de um modelo simplificado do ambiente externo, ignorando-se determinados agentes e definindo-se padrões de interação idealizados para os demais. Quanto maior a distância entre

esse modelo de projeto e as condições reais do ambiente em que é utilizado, maior será a probabilidade de ocorrerem eventos capazes de perturbar o funcionamento normal do sistema, os quais serão percebidos como falhas (GUERRA, 2004).

Para que o impacto destas variações não seja refletido no sistema de forma crítica, é necessário que o sistema reaja a estas mudanças, de forma que medidas corretivas e preventivas sejam adotadas imediatamente após a percepção destas variações, e assim, resultados inesperados ou indesejáveis não assumam maiores proporções.

Em se tratando de sistemas críticos, a adoção de funções de controle puramente convencionais, a exemplo do controle PID, nem sempre é satisfatória, pois pode ser necessário que o sistema reaja, em tempo real, a falhas internas ou a mudanças não previstas do ambiente, para assim garantir e até mesmo aprimorar seu desempenho e robustez (ANTSACLIS *et al.*, 1989). Isto ocorre porque, em ambientes dinâmicos ou com múltiplos sistemas interligados e cooperando entre si, é difícil prever, mapear e incorporar aos controladores convencionais, todos os eventos que interferem em seus resultados. Segundo Scholz-Reiter (2009), o aumento de complexidade dos atuais sistemas de manufatura combinado com as constantes mudanças nos parâmetros dos processos tem demandado uma descentralização do controle dos processos, a exemplo do controle autônomo proveniente da teoria de auto-organização (DEBRUN, 1996).

Um sistema de controle inteligente se diferencia de sistemas de controle convencionais justamente por sua habilidade de tomar decisão, mesmo em ambientes não estruturados. São aplicáveis em sistemas que operam com incertezas, com variações nos modelos de referência, que utilizam diferentes critérios de desempenho, e que podem ser sujeitos a falhas de componentes (CAVALCANTI *et al.*, 1999). O desenvolvimento de uma metodologia efetiva para o projeto desses sistemas de controle pode ser favorecido pela síntese de conceitos da Inteligência Artificial, computação em tempo real e engenharia de controle (PORTER, 1989).

Havendo falhas, estas deverão ser solucionadas e o sistema restaurado a uma condição segura, ou a parte do sistema onde ocorreu a falha deverá ser desativada, de forma a minimizar o impacto em outras regiões e, com isto, manter estável o funcionamento geral do sistema. Para isto, as ações corretivas devem ser rápidas e seletivas, tratando imediatamente o efeito desta falha no sistema e no ambiente (evitando que este efeito assumam maiores proporções) e evitando sua reincidência (tratando a origem da falha).

Grande parte da complexidade de um sistema de alta confiabilidade está relacionada com rotinas de detecção e recuperação de erros (RANDELL & XU, 1995). E

quanto maior a complexidade do sistema a ser controlado, maior é o nível de sofisticação necessário para o controlador. No contexto deste trabalho, ter autonomia de controle significa ter capacidade de autocomando e executar funções complexas, sem a necessidade de intervenção humana, ou com intervenção mínima, mesmo em um ambiente não estruturado.

A utilização de métodos de controle inteligente e autônomo no GCAD visa a permitir o encapsulamento de funções complexas em módulos reutilizáveis e adaptáveis, capazes de prover ao sistema capacidade de tomar decisões com base nos eventos ocorridos e associando-os a uma base de conhecimento, adaptável pelo sistema, através de sua interação com o ambiente, e por especialistas.

2.4.2 Sistemas Multiagente

Pesquisas relacionadas à coordenação e a cooperação entre Sistemas Multiagentes (SMA) são amplamente reconhecidas como um importante passo para se conseguir alto desempenho e flexibilidade na automação industrial (HSIEH, 2009).

No contexto dos SMAs, os componentes são representados por agentes, que são definidos como objetos capazes de concluir uma dada tarefa de forma independente, sem interferência humana. De forma geral, um agente deve apresentar três importantes características: autonomia, adaptabilidade e coordenação. Autonomia significa que o agente deve completar as tarefas relacionadas de forma ativa, sem interferências externas (humanas ou de outro software). Adaptabilidade se refere à capacidade do agente de perceber e se adaptar ao ambiente externo e às necessidades internas. A coordenação é uma característica importante de um SMA, em que os agentes devem coordenar e completar uma tarefa de forma conjunta e cooperativa (BAFFO *et al.*, 2008; ILARRI *et al.*, 2008).

A ideia primária de SMA se baseia na incorporação de vários agentes para resolver um problema de complexa resolução por parte de um só. Tirando partido da capacidade e características de cada um, implementam-se processos de interação que podem conduzir mais facilmente à realização de um objetivo. Desta interação, resultam as principais caracterizações de um SMA (MARTINS, 2005):

- Complementaridade dos agentes: pode acontecer que um único agente não consiga isoladamente resolver um determinado problema devido à falta de informação ou capacidade.
- A informação está distribuída: ao distribuir e replicar a informação por vários agentes diminui-se a probabilidade de perdas de informação.

- Sistema descentralizado de controle: quando nenhum elemento é responsável pelo controle direto do sistema, ou seja, o controle não depende de um único elemento.

Portanto, um agente isolado pode não determinar a capacidade do SMA, já que a inteligência é mostrada pela coordenação mútua entre os agentes. Um agente utiliza recursos do paradigma OO, como herança*, encapsulamento, transferência de informação, etc. e possui atributos básicos, como objeto, rótulo, conhecimento, dentre outros. É composto por unidades funcionais, como módulos de comunicação, processamento de negócios, inferência, aprendizagem e transmissão de informações. GUO e ZHANG (2009) estruturam a composição de um agente conforme a seguir:

- Objetos: os objetivos específicos que o agente deve buscar de forma consistente e que determina a sua responsabilidade e obrigação;
- Rótulo: um atributo pelo qual um agente se diferencia de outros no SMA, incluindo nome e endereço;
- Conhecimento: inclui fatos e regras armazenadas na base de conhecimento do agente;
- Módulo de Comunicação: é responsável pela comunicação, recebimento e envio de informações, podendo transferir tarefas, operar resultados e compartilhar conhecimentos.
- Módulo de Raciocínio: infere e realiza a tomada de decisão com base no conhecimento, habilidade e informações mais recentes do agente, e as decisões tomadas devem ser de utilidade para demais agentes.
- Módulo de processamento de negócio: composto de métodos de transformação de dados de negócios, ou seja, os dados que afetam diretamente as tomadas de decisão dos gestores, tais como índices de qualidade da produção, estatísticas de processo, índices de produtividade, dentre outros.
- Módulo de aprendizagem: resume as experiências do processo de funcionamento do agente, acrescenta novos conhecimentos à base de conhecimento e melhora a capacidade de adaptação ao ambiente mutável.

Os agentes compartilham recursos, inclusive através da rede de computadores, e compõem um grupo organizado para completar a tarefa comum. Em geral, considera-se que

um SMA é especialmente adequado para as aplicações que são desintegradas e divididas em espaço, tempo ou função. A adoção dos SMAs nestas aplicações, em relação a outras técnicas, possibilita as seguintes vantagens (GUO & ZHANG, 2009):

- Maior rapidez de processamento, devido ao aproveitamento da capacidade de processamento paralelo;
- Menor demanda por largura de banda de comunicação já que o processamento de informações é realizado próximo à fonte de informação;
- Uma falha em um agente não necessariamente afeta todo o sistema, provendo maior confiabilidade ao sistema;
- Para processamentos locais, o sistema apresenta menor tempo de resposta;
- Capacidade de utilização e compartilhamento de conhecimentos entre agentes, ao invés da simples utilização dos dados.

Tais características levam a certa independência entre os agentes, permitindo que sistemas muito complexos possam ser implementados através do comportamento mais simples de diversos agentes (MARTINS, 2005).

O GCAD é inspirado nos conceitos dos SMAs para a definição dos módulos de inteligência local e remota, onde cada módulo, composto por agentes, é responsável por uma funcionalidade do sistema e, através da cooperação entre eles, são concedidas ao sistema características como autonomia e colaboração. Dessa forma, MCs e MGRs podem ser vistos como SMAs, e sua inteligência é mostrada pela coordenação mútua entre os módulos, implementados na forma de agentes. Adicionalmente, o MC de uma célula pode interagir e cooperar com MCs de células relacionadas (ver seção 3.2.3 – Interface entre células), conferindo em todos os SMAs locais uma capacidade de autonomia, adaptabilidade e coordenação frente a variações externas.

2.4.3 Teoria da Complexidade e os Sistemas Complexos Adaptativos

De acordo com Nóbrega (1996, apud DUTRA & ERDMANN, 2007, p.408), sistemas do mundo empresarial que atingem alto grau de complexidade só sobrevivem se aprenderem a mudar. Agostinho (2003, apud DUTRA & ERDMANN, 2007, p.408) afirma que, segundo a Teoria da Complexidade (Munné, 1995), os Sistemas Complexos Adaptativos (SCA) possuem um tipo de dinamismo que os torna capazes de responder ativamente ao que

ocorre ao seu redor, fazendo-os qualitativamente diferentes de objetos estáticos. Estes sistemas apresentam uma característica peculiar: a capacidade de auto-organização.

Quando se caminha do simples para o complexo, em que os problemas são interligados, o paradigma mecanicista/newtoniano convencional, cujo foco das organizações está na estrutura e nas tarefas, tem se mostrado ineficiente na solução dos problemas organizacionais, pois torna as soluções isoladas (DUTRA & ERDMANN, 2007). A organização* é, então, dividida em unidades isoladas e é organizada em conformidade com conjuntos de tarefas específicas executadas em cada unidade, promovendo uma fragmentação generalizada (TORRES, 2005). Entretanto, na era do conhecimento, as organizações que continuam presas ao paradigma mecanicista têm dificuldade em acompanhar as mudanças do mercado, pois a produção e a disseminação das informações acontecem de maneira cada vez mais rápida (DUTRA & ERDMANN, 2007).

Uma das possibilidades de compreender a realidade fora do modelo mecanicista sugere que os sistemas sejam vistos como sendo sistemas complexos adaptativos. Os SCAs tratam a solução considerando a dinâmica do sistema como um todo, e não da simples soma das ações isoladas das partes (DUTRA & ERDMANN, 2007).

Com base no funcionamento dos SCAs, Agostinho (2003, apud DUTRA & ERDMANN, 2007, p.409-410) elege quatro conceitos-chave que definem a abordagem dos sistemas vistos como sendo complexos adaptativos: autonomia, cooperação, agregação e auto-organização. Estes conceitos são fortemente entrelaçados e indicam como a ordem no sistema pode emergir através das ações de suas partes: agentes autônomos, capazes de aprender e de se adaptar, cooperam entre si obtendo vantagens dessa interação. Tal comportamento tende a ser selecionado e reproduzido, chegando ao ponto em que estes agentes cooperativos se unem formando um agregado, que também passa a se comportar como um agente, e assim por diante. Diz-se, então, que o sistema resultante se auto-organiza, fazendo emergir um comportamento global cujo desempenho também é avaliado por pressões de seleção presentes no ambiente (externo e interno).

Em busca por melhores resultados, as companhias têm a urgente necessidade de operar de forma distribuída, com subsistemas produzindo em cooperação, dispondo boa flexibilidade, resposta rápida e habilidade de tolerância a falhas, reduzindo ou eliminando riscos* e aumentando a segurança (GUO & ZHANG, 2009).

Os SCAs, apesar de se constituírem em sistemas globalmente complexos, apresentam simplicidade local, pois são integrados por elevado número de agentes que interagem entre si e influenciam uns aos outros (DUTRA & ERDMANN, 2007). Sendo

assim, o nível de agregação da inteligência é também uma dimensão importante, pois muitos sistemas são compostos de agentes, que também se constituem em subagentes. No caso de sistemas com recursos de processamento de informações e comunicação suficientes, muitas capacidades de processamento de informações e tomadas de decisão podem ser incorporadas, sendo que algumas partes podem ter apenas um identificador (MEYER, 2009).

A essência de um projeto intrinsecamente seguro é evitar ou remover perigos ao invés de adicionar equipamentos, itens ou instalações de proteção. Quanto menos a segurança for dependente de equipamentos, sistemas e procedimentos, mais intrinsecamente seguro é a planta ou o processo. Medidas extrínsecas podem falhar, fato este levado em consideração em qualquer quantificação de eventos perigosos, e que muitas vezes implica na adoção de sistemas de proteção redundantes ou diversos. Medidas intrínsecas em uma planta oferecem economias, reduzindo a necessidade de sistemas e instrumentação de segurança dispendiosos, aliviando a carga nas pessoas e dos procedimentos, e simplificando os planos de emergência tanto dentro como fora das plantas. Entretanto, muito da “segurança” se constitui numa questão de bom senso, sendo o grande problema garantir que ele seja sempre aplicado. Já a aplicação da segurança intrínseca e otimização do processo podem ser atividades sinérgicas (PASCON, 2005).

Os SIAs que apresentam células distribuídas, e com fortes relações de dependência entre elas, são fortes candidatos a serem concebidos sob a ótica um SCA, já que o comportamento de uma célula pode promover uma nova ordem no SIA como um todo. Sendo assim, o GCAD visa a contribuir para a concepção de SIAs cada vez mais colaborativos entre si, mas sem perder de vista o equilíbrio entre aspectos de modularidade* e acoplamento entre componentes, autonomia e tendência ao comportamento caótico, complexidade e flexibilidade (ver seção 3.2.1 – Principais Desafios da Abordagem Proposta).

3 GERENCIAMENTO E CONTROLE AUTÔNOMO E DISTRIBUÍDO PARA SISTEMAS INDUSTRIAIS AUTOMATIZADOS

Uma alternativa proposta para o controle de SIAs, em especial com restrições críticas de continuidade e tempo de resposta, é a utilização de um mecanismo de controle automático e autônomo, de forma a evitar a descontinuidade operacional dos processos e a melhorar a eficiência de seus resultados, através da identificação da ação mais adequada em caso de um diagnóstico de falha, instabilidade ou possibilidade de melhoria.

O grau de inteligência de um sistema inteligente pode variar de uma entidade completamente controlada a entidades completamente autônomas. O primeiro nível de inteligência é verificado quando um sistema é capaz de controlar suas próprias informações, obtidas por meio de dispositivos, a exemplo dos sensores, leitores de RFID e demais técnicas e dispositivos, e não somente manipular informações. Em um segundo nível, o sistema pode notificar o seu gestor quando há um problema. O terceiro nível de inteligência é verificado quando o sistema é capaz de tomar decisões e gerenciar suas regras de conhecimento, mesmo sem intervenção externa. Neste caso, o sistema tem controle total sobre suas tarefas e não há nenhum controle externo a ele (MEYER, 2009).

A alternativa proposta pelo GCAD visa a que SIAs atinjam até o terceiro nível de inteligência, sendo que intervenções externas podem ser admitidas nos casos em que uma ação puramente local e autônoma de fato não é recomendável ou não é possível, por exemplo, por haver necessidade de substituição de equipamentos ou dispositivos.

A proposta para controle de SIAs, com células geograficamente dispersas e com restrições críticas de continuidade e tempo de resposta, é estruturada de modo que cada célula tenha a habilidade de tomar decisões de forma autônoma, predominantemente em nível local e sem a necessidade de constante interferência humana ou externa.

A descrição do GCAD envolve: definições gerais relativas à proposta, descrição do modelo, caracterização da camada reativa do processo, caracterização da camada de controle autônomo e caracterização do módulo de gerenciamento remoto (Figura 14).

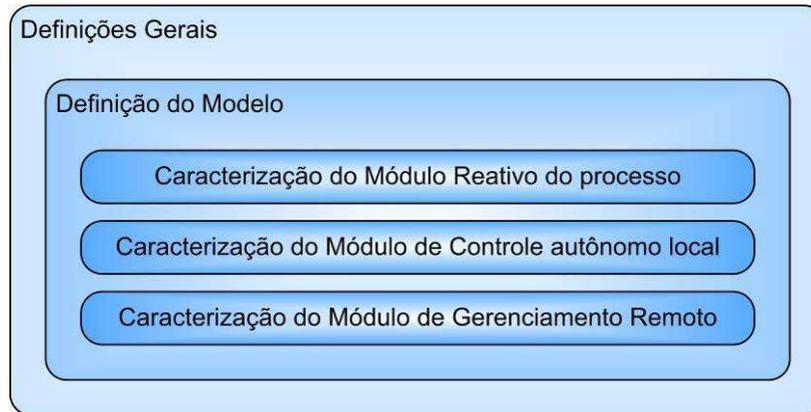


Figura 14 – Definição do GCAD

3.1 DEFINIÇÕES GERAIS

O controlador é o principal elemento responsável por garantir o desempenho de uma célula, pois sua ação pode compensar algumas ineficiências dos demais elementos do sistema controlado. Uma premissa inicial e fundamental para que uma célula possa se tornar autônoma é que o sistema de controle local disponha de mecanismos de atuação automática no processo.

A proposta de células autônomas (Figura 15) flexibiliza o controle dos processos, de forma que as células possam manter a continuidade de operação em segurança e com eficiência.

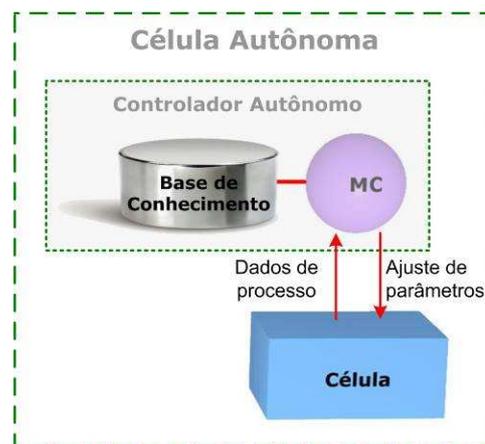


Figura 15 – Célula Autônoma

Uma célula autônoma consiste em uma célula industrial (e seus respectivos dispositivos de campo e controladores) conectada a um Módulo Cognitivo e a uma Base de Conhecimento, de forma que seus dados de processo sejam continuamente analisados, e seus

parâmetros de controle sejam ajustados, de acordo com as regras de conhecimento estabelecidas.

Para cada célula, a Base de Conhecimento deve permitir, aos especialistas do processo, a definição das restrições de segurança local e global do sistema. Estas restrições devem refletir ou, ao menos, preservar o sistema de intertravamento local, adicionando regras de conhecimento complementares que permitam a identificação de diagnósticos e ações correspondentes em nível local. De forma a atender aos novos contextos operacionais que se configurarem, as restrições locais devem ser passíveis de readequação de forma autônoma pelas próprias células.

O GCAD visa à integração das funções de controle convencional (como o controle liga/desliga e o controle PID) com funções inteligentes de controle, de forma a lidar, mesmo na ausência de interferência humana, com ambigüidades ou incertezas existentes no processo de decisão local e com situações de falha não tratadas de forma automática pela camada de controle.

O controle local foi estruturado em duas camadas hierárquicas: o Módulo Reativo (MR) e o Módulo Cognitivo (MC), cujas lógicas de processamento podem ser distribuídas lógica e fisicamente em camadas independentes e integráveis. O MR é representado pelo controle convencional da célula (a exemplo dos CLP). Já o MC representa a camada de controle inteligente a ser acoplada ao MR para realização de ajustes em tempo real. Paralelamente, cada MC sincroniza as informações de sua Base de Conhecimento com as células diretamente relacionadas e com o nível remoto, representado pelo Módulo de Gerenciamento Remoto (MGR) (Figura 16).

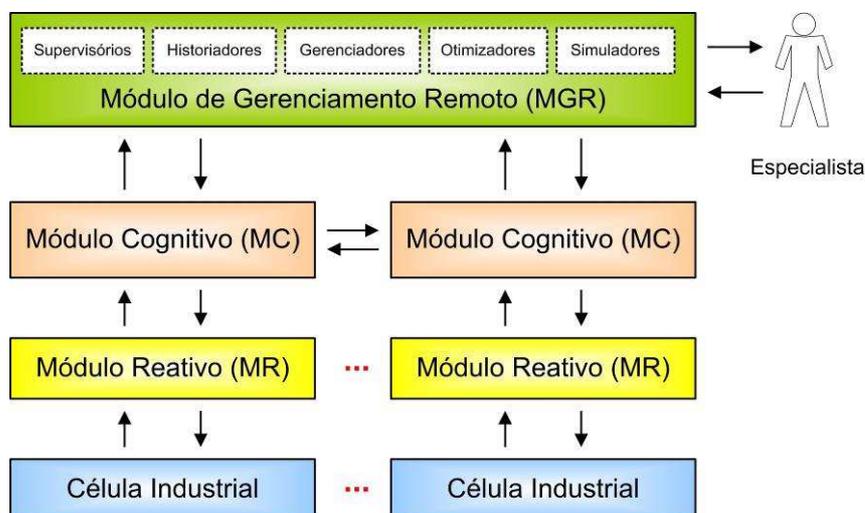


Figura 16 – Estrutura proposta

A tomada de decisões pode ocorrer de duas formas no GCAD: por meio da cooperação e da negociação. A cooperação, apoiada pela sincronização periódica de dados de interesse entre células relacionadas (ver seção 3.2.3 – Interface entre células), visa a propagar ajustes locais que podem afetar sistemas relacionados, para que estes possam readequar as operações locais. Já a negociação significa o acordo sobre uma decisão conjunta firmado por um ou mais sistemas com metas e objetivos próprios.

Os MGRs podem incorporar funcionalidades como: supervisão, historiamento, gerenciamento, otimização e simulação, dentre outras. Alternativamente, a depender da infraestrutura já existente na planta, em que os dados de processo podem já estar conectados a bases de dados temporais, otimizadores ou gerenciadores remotos, a critério do especialista, esta configuração pode ser preservada e integrada, sendo acrescentados ao MGR apenas os dados das Bases de Conhecimento distribuídas e demais dados pertinentes às células.

Esta modularização possibilita que as análises ou tratamentos específicos relacionados a um módulo sejam distribuídos em dispositivos de hardware distintos. Os algoritmos, quando encapsulados em cada camada de forma modular, podem lhes conferir uma independência de controle. Sendo assim, mesmo em caso de falha na conexão entre camadas, desde que o intertravamento entre os módulos seja bem definido, possibilita-se que o funcionamento do sistema local seja mantido estável, ou eventuais problemas em um módulo se torne mais rastreável. Além disso, funções mais complexas podem ser executadas de forma eficiente e ajustes posteriores em uma camada podem ser feitos sem necessariamente impactar em outra. Estes conceitos são demonstrados na validação do estudo de caso (capítulo 4).

A principal vantagem da detecção de erros por software é o baixo custo desses mecanismos, quando comparados com os mecanismos de hardware, a exemplo da redundância tripla, em que muitas vezes são utilizados critérios de desempate para definir qual valor de uma variável de processo deve ser considerado. Isso justifica, em muitos casos, a migração de funções de verificação, antes incluídas no hardware, para as camadas de software. E, assim, a redundância de hardware poderia ser utilizada basicamente para fins de substituição de dispositivos.

Entretanto, em SIAs com células dispersas, estas tarefas podem se tornar demasiadamente complexas, pois uma decisão de atuação sobre determinada célula pode depender de resultados de outras células dispersas. Sendo assim, no GCAD, cada MC deve estar apto a coordenar a interação distribuída com informações das eventuais células relacionadas e a suportar eventuais reconfigurações em tempo real.

3.2 MODELO CONCEITUAL PROPOSTO

O GCAD (Figura 17) foi estruturado usando como inspiração alguns dos conceitos dos Sistemas Multiagentes (SMA), cuja ideia básica consiste na incorporação de vários agentes para resolver um problema que seria de complexa resolução por parte de um único, e tirando partido da capacidade e características de cada agente em um processo de cooperação que pode conduzir mais facilmente à realização de um objetivo. Para o tipo de sistema estudado, esta particularidade é de grande representatividade, dado o grande número e complexidade de equipamentos e dispositivos existentes em um SIA, bem como de suas interações, que os classificam como SCAs.

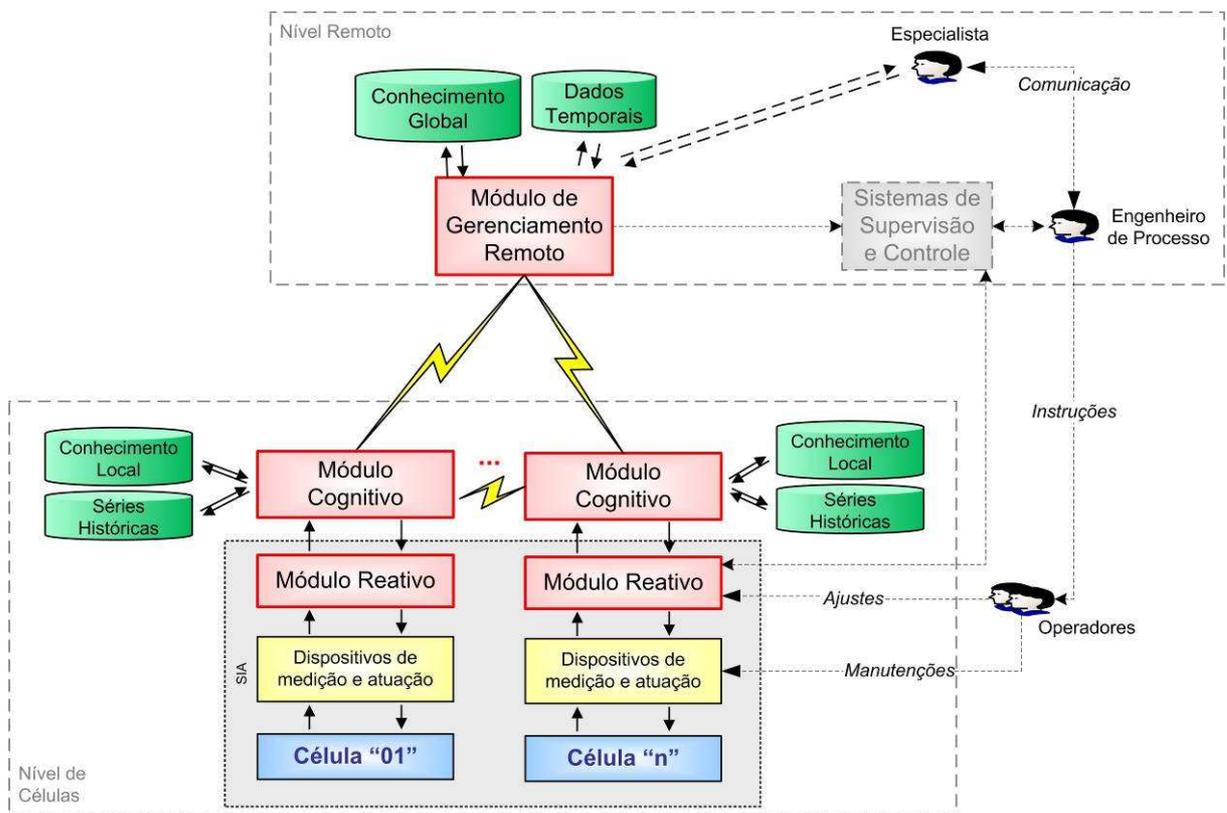


Figura 17 – Infraestrutura local e remota do GCAD

O GCAD adiciona um MC à camada de controle dos processos, ou seja, ao MR, conferindo-lhes uma capacidade de comunicação horizontal, e não somente vertical como no caso do controle mestre-escravo. Ou seja, a comunicação passa a ocorrer também com controladores em uma mesma hierarquia da rede.

Cada MC deve estar fisicamente conectado ao MR, de forma a obter os dados de processo e interagir com as funções de controle existentes na respectiva célula. Esse acoplamento em nível local pode ser feito de duas formas:

- Embarcando o MC em um dispositivo externo dedicado, e o conectando à camada de controle pre-existente, por meio de protocolos a exemplo do *OLE for Process Control (OPC)*;
- Embarcando o MC no próprio controlador local, desde que este atenda aos requisitos de processamento, armazenamento, comunicação dentre outros necessários à estrutura colaborativa proposta.

O MC deve dispor de uma capacidade local de armazenamento em uma base de conhecimento, contendo dados de configuração local, regras de conhecimento e interface com células relacionadas. Através da correção automática, sinalização de falhas ou minimização da recorrência ou sucessão de erros, o MC visa ao tratamento de falhas não ajustadas ou não identificáveis pelo controle convencional.

As células devem estar interconectadas umas às outras, como um sistema heterárquico, de forma modular, expansível e autoconfigurável. E isto é possibilitado através de cada MC local, que é conectado ao MGR com uma relação hierárquica (Figura 18).

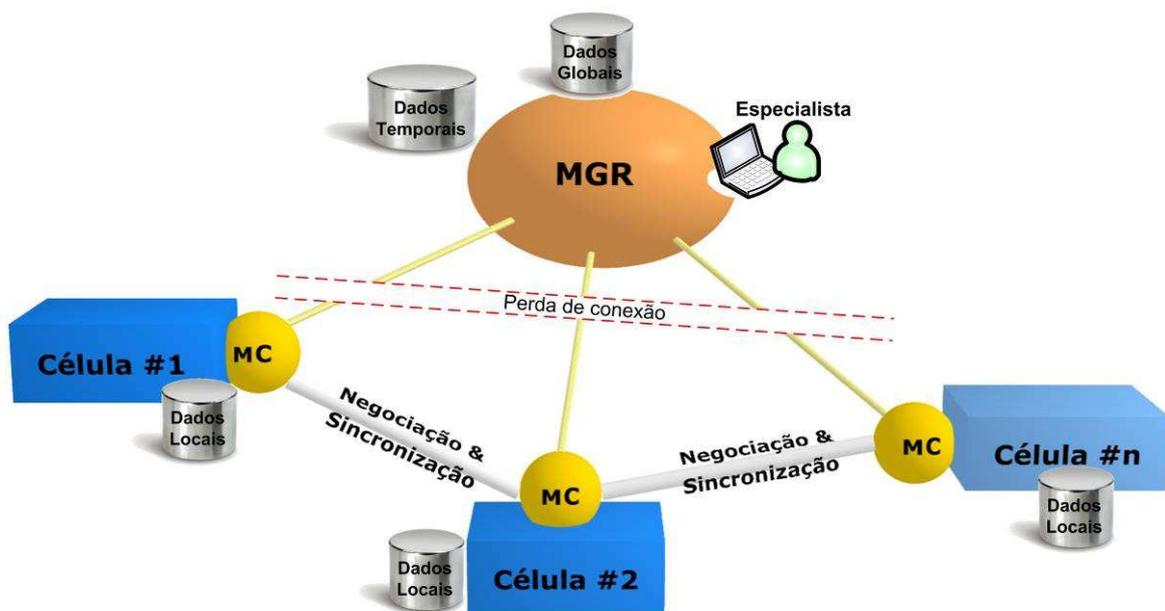


Figura 18 – Visão geral da proposta do GCAD

O MGR visa a dispor dos dados históricos de todas as variáveis de interesse das células gerenciadas em uma base de dados temporais, ou *Process Information Management Systems* (PIMS). Adicionalmente, as regras de conhecimento e configurações provenientes das bases de conhecimento das células, bem como a interrelações entre elas, são concentradas em uma base de conhecimento com dados globais.

Os MCs poderão estar conectados ao MGR por meio de uma conexão sem fios ou qualquer outra estratégia de comunicação em rede disponível e confiável. A partir de uma IHC no MGR, especialistas devem dispor de uma visão integrada das células distribuídas, bem como ajustes remotos e integração dos dados de processo, obtidos de ferramentas PIMS. Adicionalmente, esta IHC enseja a possibilidade de realizar simulações do SIA em paralelo à operação, para fins, por exemplo, de otimização do processo a partir de “ótimos globais”, o que não necessariamente é alcançável pelo conjunto momentâneo de “ótimos locais”.

Entretanto, em caso de perda de conexão entre o MGR e as células, esta desconexão deve ser inócua ao funcionamento local. A capacidade de decisão e atuação tanto local quanto em rede (no mesmo nível hierárquico) deve ser preservada, através de mecanismos de negociação e sincronização entre as células relacionadas.

Quando utilizados padrões abertos de comunicação (Figura 19), possibilita-se a integração de dispositivos de diferentes fabricantes em um só sistema e formando uma rede de dispositivos que podem ser acessados individualmente, através de mensagens padronizadas que permitam maior interoperabilidade.

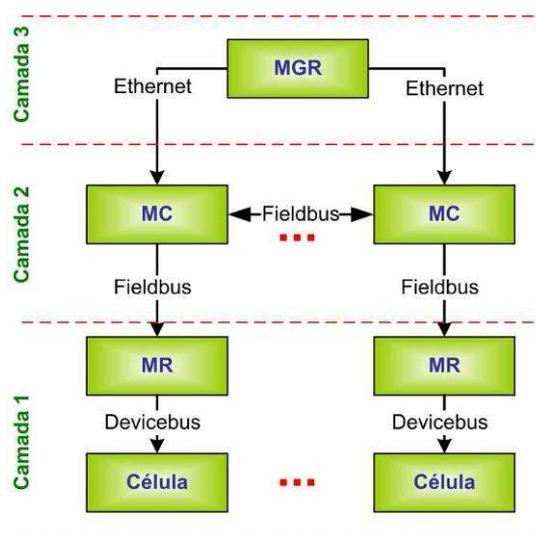


Figura 19 – Exemplos de protocolos para comunicação entre camadas

No caso da comunicação entre a rede de controladores e os dispositivos de campo e também em nível de células, em que a comunicação também é considerada crítica e necessita de respostas em tempo real, é necessária uma comunicação de alta velocidade. Em geral têm-se utilizado os protocolos *Fieldbus*. Já no caso de tarefas para os controles de chão de fábrica através do MGR, requisição de dados dos SSCs pelo MGR, ou transferência de dados do MGR para células distribuídas, considera-se que não há necessidade de respostas em tempo real, já que em geral são realizadas otimizações, simulações a partir de dados históricos armazenados em PIMS, ou supervisões remotas. Entretanto, aspectos relacionados à infraestrutura da rede de automação e aos protocolos de comunicação não são abordados no escopo deste trabalho.

Embora se utilizem algumas técnicas e ferramentas específicas na validação do GCAD, a proposta independe das ferramentas, dispositivos e técnicas utilizadas, podendo ser ajustada às especificidades das células a serem controladas.

3.2.1 Principais Desafios da Abordagem Proposta

De forma a prover aos SIA uma capacidade de gerenciamento e controle que minimize a intervenção humana na planta e a restrinja, sempre que possível, a situações que realmente a demandem e a intervalos de tempo mais adequados, o GCAD visa a estabelecer adequada solução de compromisso entre:

a) Modularização x Acoplamento entre componentes

Segundo Dutra & Erdmann (2007), a utilização de modelos mecanicistas e suas implicações (linearidade, monocausalidade, determinismo, reducionismo e imediatismo) não é suficiente para explicar os acontecimentos de uma realidade, pois isola as partes do fenômeno para analisá-las, considerando o todo como uma simples agregação das diversas partes.

Entretanto, realizar o controle em partes menores, que possam ser controladas individualmente, passa a ser uma solução atrativa por vários motivos, dentre eles, a maior facilidade de desenvolvimento, operação, manutenção e gerenciamento. Além disso, consegue-se maior confiabilidade do sistema como um todo, já que o mau funcionamento de uma parte passa a não implicar, necessariamente, no mau funcionamento de todo o sistema. Em contrapartida, esta modularização, se não projetada adequadamente, pode agregar problemas como a diminuição excessiva do acoplamento entre as partes do sistema, que podem se tornar pouco ou nada integráveis entre si, com conseqüências na eficiência e no comportamento tendente ao caótico. Assim, é importante que seja avaliado e considerado o

acoplamento entre os sistemas autônomos relacionados, sendo necessária a utilização de interfaces bem definidas entre eles.

O GCAD visa a manter distribuídas em camadas as funcionalidades específicas do nível local e do nível remoto. Para cada camada, define módulos e submódulos conectados entre si, definindo suas interfaces e criando mecanismos de interação que os mantenham coesos em decisões sobre objetivos comuns, porém autônomos em atuações locais, visando a preservar a integridade do sistema em nível local e global. Em situações em que uma ação local identificada por uma célula impacta células relacionadas, são utilizados mecanismos de negociação, de forma que as restrições locais das células sejam preservadas e evitando um comportamento distribuído tendente ao caótico.

b) Complexidade x Flexibilidade

Os SIAs são em geral dotados de um grande número de dispositivos, variáveis e ações que, à medida que evoluem, tendem a se tornar cada vez mais complexos. Conseqüentemente, um controle puramente centralizado pode se tornar uma solução cada vez mais cara, complexa e, em alguns casos, ineficiente, já que pode limitar a auto-organização dos componentes que se interrelacionam e que mantêm similaridades dentro da diversidade.

O conceito de Teoria da Complexidade pode ser complementado pelo conceito de flexibilidade, que pode ser definida neste contexto como a facilidade de se modificar os sistemas de forma a melhorar a qualidade dos produtos ou serviços e a capacidade de personalizar os itens a serem produzidos. Para a obtenção desta flexibilidade, é necessário que o sistema disponha de capacidade de adaptação a mudanças, a qual é possibilitada quando as funcionalidades do sistema são estruturadas de forma modular, independente e, ao mesmo tempo, com elevado grau de cooperação (WADA & OKADA, 2002).

O GCAD visa a prover mais flexibilidade aos SIA, através de distribuição da tomada de decisão para o nível de células, integrando o conhecimento local com o conhecimento sobre sistemas relacionados, e visa a permitir um gerenciamento remoto mais eficiente, de forma a lidar com as complexidades que excedem a capacidade local de solução.

Adicionalmente, através de uma estrutura modular e com interfaces bem definidas também no nível local, espera-se flexibilizar manutenções no GCAD. Os submódulos tendem a ser atualizados, tanto em manutenções corretivas como evolutivas, com impacto mínimo nos demais e, conseqüentemente, nas células e no SIA como um todo. Especialmente em caso de manutenções evolutivas, espera-se que as estratégias adotadas em cada submódulo possam ser aperfeiçoadas com funcionalidades mais robustas, de forma a atender aos requisitos de

desempenho e confiabilidade demandados por um sistema em produção, sem que haja uma degradação do modelo adotado.

c) Autonomia x Comportamento indesejável

Por intermédio das interações, sistemas autônomos podem promover uma nova organização do seu ambiente operacional. Quanto mais a ordem e o ambiente se desenvolvem, mais se tornam complexas, mais toleram e evoluem com a desordem. Tem-se, assim, a oportunidade para criar diferenciações internas, capazes de subsidiar a reação a uma desordem e a retomada (ou tentativa) da situação original. Quando a situação original não é alcançada ou não é visada, pode-se buscar um novo patamar de operação, podendo ser um estágio evoluído ou simplificado (DUTRA & ERDMANN, 2007).

Assim, através de interações entre os sistemas, deve-se analisar seu processo de evolução a cada ajuste realizado e avaliar os respectivos resultados, contribuindo para a melhoria de funcionamento do ambiente operacional e evitando um comportamento indesejável dos sistemas.

O GCAD trata um SIA sob a ótica de um Sistema Complexo Adaptativo e o subdivide em células cooperativas e autônomas, para as quais são definidas regras locais de conhecimento e regras relacionadas à interação com outras células. Através de mecanismos de interação (negociação ou sincronização de informações) e conhecendo o impacto de cada ajuste local em demais sistemas, cada célula tem autonomia de atuação frente a situações de falha ou oportunidades de melhoria. Entretanto, de forma a manter a ordem e evitar um comportamento caótico dos SIA, algumas atuações só devem ser efetivadas após mecanismos de negociação com células impactadas (ver seção 3.4.3 – Módulos de um MC), de forma a evitar que se desvie do objetivo global do SIA em prol de objetivos particulares de cada célula.

d) Local x Central

Quando um sistema dispõe de inteligência própria, não significa necessariamente que a inteligência está interna a ele. Embora possam existir soluções intermediárias, Meyer (2009) identifica dois extremos:

- Inteligência através da rede: neste caso a inteligência é completamente externa ao sistema físico. Por exemplo, existe um servidor que contém um agente dedicado ao sistema e o sistema contém um dispositivo que é usado como uma interface para a inteligência. Plataformas em que a inteligência do sistema é

inteiramente executada em outras máquinas podem ser chamadas de plataformas de portal.

- Inteligência no sistema: neste caso, toda a inteligência, sejam tratamentos de informação ou tomadas de decisão avançadas, ocorre no próprio sistema, que deve dispor de poder computacional, capacidade de armazenamento e conectividade de rede necessárias. Plataformas em que a inteligência é inteiramente executada nos próprios dispositivos podem ser chamadas de plataformas embarcadas.

Considera-se que a inteligência deve estar presente nos dois níveis: local e remoto. A inteligência do GCAD deve conferir autonomia local às células, porém condicionando algumas ações a uma negociação entre pares (células em um mesmo nível hierárquico). Adicionalmente, deve possibilitar um gerenciamento mais eficiente em nível remoto, de forma a realizar aperfeiçoamentos a partir de uma visão global do SIA e de forma a garantir redundância e disponibilidade, em casos que uma atuação distribuída não é aconselhável ou possível.

e) Centralização de dados x Distribuição na tomada de decisão

Paralelamente ao controle autônomo em nível local, de forma a possibilitar um gerenciamento de processos em nível remoto, um dos requisitos desejáveis é que os dados do processo sejam historiados em ferramentas do tipo PIMS, para assim permitir a disponibilidade das informações que são trafegadas em nível de célula para os níveis remotos. Esta disponibilidade é de fundamental importância durante uma análise de dados por especialistas para detectar instabilidades e falhas latentes^{*}, bem como propor ações corretivas, já que possibilita análises sobre todo o histórico disponível de eventos ocorridos localmente e sobre a correlação entre variáveis em diferentes intervalos de tempo.

Os dados historiados devem ser integrados ao MGR, para que possam ser analisados em nível remoto. Por limitações de armazenamento de dados nos controladores da planta, seria extremamente custoso ou ainda inviável manter este grande volume histórico de dados em cada célula. Entretanto, cada célula deve dispor de um conjunto mínimo de dados do processo, de forma a analisá-los em conjunto com uma base local de conhecimentos e ser capaz de tomar decisões autônomas de controle.

f) Imprevisibilidade x Tolerância a Falhas

Um sistema computacional tolerante a falhas deve estar apto a continuar a prover serviços, em conformidade com suas especificações, mesmo em presença de falhas. Uma condição necessária para tornar um sistema tolerante a falhas é o emprego de redundâncias, ou seja, características ou estratégias que, em condições ideais de funcionamento, não seriam necessárias ou utilizadas (GUERRA, 2004). Além disso, é necessária identificação e monitoramento de variáveis relevantes ao processo, para que estas sejam controladas em tempo real, possibilitando uma atuação mais imediata e eficiente no sistema.

O principal obstáculo à tolerância a falhas é a imprevisibilidade de ocorrência de uma falha e o desconhecimento dos seus efeitos sobre o sistema já que, em geral, a ação dos mecanismos de tolerância a falhas só é iniciada após a detecção de erros já presentes no sistema. Uma vez detectado um erro, quando possível, este deve ser removido e o sistema reconfigurado para tratar ou isolar o possível causador da falha. Após a recuperação do estado de erro, ou seja, após a remoção de erro e estabilização do sistema, espera-se que o sistema prossiga com seu funcionamento normal, sem apresentar defeito (GUERRA, 2004).

Em se tratando de sistemas críticos envolvendo grande número de incertezas, é difícil prever todas as ocorrências possíveis para então preveni-las. O controle centralizado tende a alto nível de complexidade. Já um sistema distribuído de controle deve ter capacidade de promover uma estratégia de negociação e sincronização de ajustes entre células relacionadas, onde os ajustes locais que podem impactar outras células devem ser autorizados ou notificados, de forma a permitir uma auto-organização em tempo real do sistema como um todo (ver seção 3.2.3 – Interface entre células).

Dessa forma, é provida uma maior tolerância a falhas, já que as atualizações em uma célula passam a ser propagadas em tempo real, evitando que as demais células assumam comportamentos que possam conduzir o SIA a uma situação caótica.

g) Confiabilidade x Tempo de resposta

Um sistema é dito confiável quando é capaz de prover serviços de acordo com suas especificações, mesmo em presença de falhas. Para isso, em geral, é necessário o emprego de mecanismos de redundâncias. Entretanto, confiabilidade e tempo de resposta tendem a ser requisitos conflitantes entre si já que, para se tornar confiável, muitas vezes o sistema precisa executar processamentos sofisticados e computacionalmente mais trabalhosos. Para que as restrições de confiabilidade do sistema sejam atendidas, variáveis importantes devem ser controladas em tempo real, possibilitando uma ação mais imediata e eficiente.

Os métodos de controle inteligente e autônomo devem prover suporte a análises de incertezas e lidar com variações internas ao sistema ou ocorridas no ambiente, e que interferem em seu funcionamento e desempenho, mas sem introduzir as citadas sobrecargas. Para lidar com a tendência ao caos, o GCAD visa a monitorar limites operacionais de variáveis de interesse e, após análise de bases de conhecimento e do impacto de ajustes locais em células relacionadas, estabelece dois mecanismos de cooperação: sincronização e negociação, de modo a manter ou restabelecer a ordem e manter a confiabilidade do sistema como um todo. Em casos críticos, em que as mudanças ocorrem de forma brusca, o Módulo Cognitivo reage localmente às ocorrências enquanto o Módulo de Gerenciamento Remoto ajusta o sistema globalmente.

3.2.2 Interação entre as Camadas

Três níveis de interação são considerados no GCAD (Figura 20).

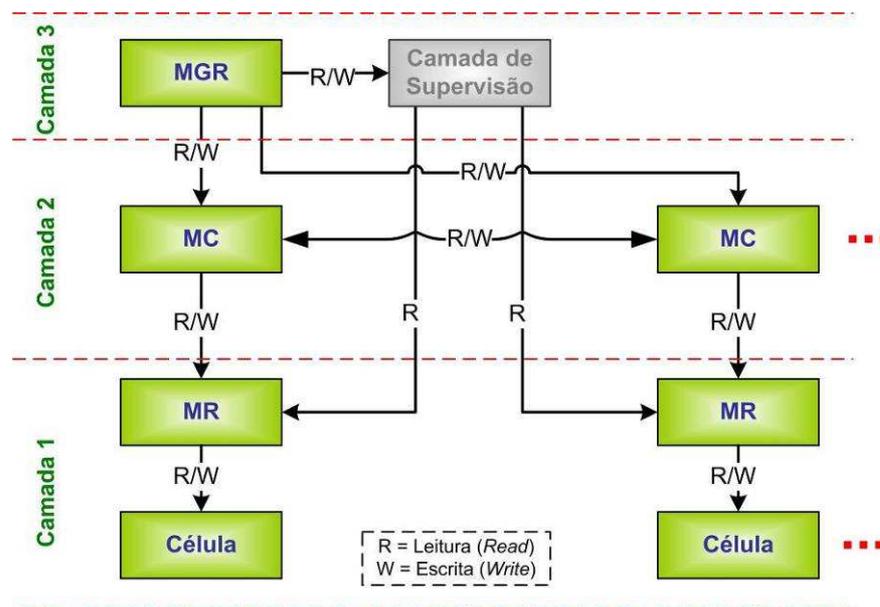


Figura 20 – Interação básica entre as camadas

Fazendo um comparativo desta estrutura com a da pirâmide da automação (Figura 1), observa-se que o GCAD busca sair do formato hierárquico tradicional para favorecer uma estrutura mais colaborativa. Nesta proposta, uma célula, sua respectiva instrumentação (sistemas de medição e atuação) e Módulo Reativo (MR) se enquadram na primeira camada. Estes MRs, a exemplo dos CLPs, realizam as funções de controle

convencional do sistema e podem ter seus parâmetros de controle ajustados por Módulos Cognitivos (MC). Estes MCs, localizados na segunda camada, podem interagir de forma colaborativa entre si e com a terceira camada, composta pelos SSCs e MGRs.

Inicialmente, as decisões devem ser tomadas na segunda camada, com base na integração de dados de processo, provenientes da primeira camada, com as regras locais de conhecimento. Em um segundo nível, as decisões devem ocorrer por meio do MGR, que visa a integrar:

- Dados do processo: estes dados podem ser obtidos por meio de ferramentas PIMS, as quais devem ser integradas ao MGR para possibilitar análises mais robustas em nível remoto;
- Base de conhecimento global: esta base integra o conhecimento de todas as células gerenciadas pelo MGR;
- Variáveis decisórias: fornecidas pelo gestor do processo, quando obtidas em função de variáveis do processo, estas variáveis podem possibilitar a execução de rotinas de otimização pelo MGR. Como exemplo de variáveis decisórias, citam-se: quantidade de produção esperada, custo mínimo necessário e máximo esperado, eficiência máxima, rentabilidade mínima esperada e máxima permitida, dentre outras.

Situações de falha ou instabilidade normalmente são ajustadas inicialmente no MR, utilizando procedimentos padrões para estabilizar o sistema. Entretanto, estes ajustes nem sempre são suficientes (em outros casos nem sempre é possível), pois, para determinados ajustes, pode ser requerida uma tomada de decisão em tempo real precedendo um ajuste. Paralelamente, o MC supervisiona as ações e resultados obtidos do MR, realizando o ajuste de parâmetros, limites operacionais e *setpoints* (decorrentes de análises que excedam os limites de processamento do MR), sempre que necessário, de forma a:

- Evitar que a célula seja conduzida a uma condição de funcionamento não seguro ou anômalo;
- Tratar instabilidades e falhas locais que não puderam ser impedidas, evitando que estas assumam maiores proporções;
- Tomar decisões em nível local, evitando a descontinuidade e melhorando o desempenho a cada ciclo* de operação, já que, em se tratando de variáveis analógicas, os ajustes tendem a ser realizados de forma incremental.

E isto é possibilitado através da análise de regras de conhecimento relativas a cada célula. As decisões locais em cada MC devem considerar também as restrições e condições operacionais das células relacionadas (ver seção 3.2.3 – Interface entre células), de forma a reagir a situações ocorridas em todo o SIA, ajustando os parâmetros ou operações locais para assim manter a estabilidade e integridade operacional do SIA como um todo. Para isso, a cada atualização da base de conhecimentos (ver seção 3.2.4), cada MC deve enviar as novas configurações ou as regras relacionadas a outras células.

A partir das análises feitas, a decisão sobre ajustes ou tarefas deve ser aplicada no processo para obter um resultado satisfatório. O envio de comandos ao MR deve ser feito pelo respectivo MC, através do ajuste de parâmetros ou forçando procedimentos locais de automação, como por exemplo: abrir/fechar válvulas, ligar/desligar relé, acionar/desativar alarme, ligar/desligar motor, regular fluxo e temperatura de um fluido.

Em caso de perda de conexão de uma célula com a terceira camada (SSC ou MGR), os MC devem manter as operações locais estáveis e as decisões devem ocorrer tanto de forma corretiva como preventiva.

3.2.3 Interface entre células

Em geral, as células de um SIA estão relacionadas entre si. Isto significa que uma decisão sobre atuação em uma célula pode impactar diretamente no funcionamento de outras ou pode ser diretamente impactada. Assim, ao identificar um ajuste em uma célula, é necessário verificar se ele pode impactar diretamente o comportamento de uma célula relacionada. Da mesma forma, caso uma célula identifique que uma célula relacionada, que impacta diretamente em suas decisões locais, apresenta falhas de resposta ou se tornou inativa, será necessário avaliar se a continuidade das atividades locais se demonstra segura e quais ajustes são necessários para se adequar ao novo cenário de funcionamento global do sistema (com uma ou mais células relacionadas em Modo de Falha ou Inatividade).

Assim, definem-se células relacionadas (CR) aquelas em que existe uma relação direta de influência ou dependência entre os resultados produzidos. Ou seja, em caso de necessidade de alteração na estratégia de controle de uma célula, é necessário propagar ou negociar a alteração com as CRs, através de mecanismos de sincronização e negociação, de forma que a integridade do sistema não seja comprometida.

Exemplo de interação entre MCs ocorre quando determinada variável de uma célula varia além dos limites aceitáveis (superior ou inferior). Neste caso, o MC inicia uma análise local investigando se a instabilidade é isolada ou se apresenta impacto em CRs. Esta investigação é realizada pelo Módulo de Ajuste do Controlador do MC (ver Apêndice A – Descritivo do Módulo Cognitivo). Se for isolada, a seqüência de investigação e atuação ocorre apenas com dados locais, caso contrário, uma negociação é realizada com as CRs, para que a decisão seja compartilhada e autorizada.

Se um novo MC for adicionado à rede, ou se o funcionamento de um MC inativo for reestabelecido, este deverá enviar mensagens às CRs contendo a interação entre suas variáveis (configurada inicialmente por especialistas). As CRs devem atualizar a base de conhecimento local automaticamente e, a partir de então, as novas células devem ser reconhecidas ou reativadas na BC local.

Quando uma célula se tornar inativa, as CRs devem automaticamente registrar a mudança de seu Modo de Operação na BC local. Caso a mudança do Modo de Operação não seja explicitado, as CRs assumem o Modo Inativo.

3.2.4 Bases de Conhecimento

As bases de conhecimento (BC) são componentes essenciais para a construção da inteligência e autonomia do sistema. Quanto mais completas e precisas, maior a possibilidade de uma identificação eficiente de diagnósticos e ações, para então resolver ou sinalizar problemas, ou ainda para ensejar melhorias do processo.

Cada célula autônoma dispõe de uma BC composta por (Figura 21):

- Dados do processo, onde são armazenadas séries históricas relativas às variáveis de processo consideradas relevantes a cada célula;
- Regras de conhecimento local;
- Dados globais, onde são registrados parâmetros relacionados ao SIA como um todo;
- Interface com demais CRs, onde são armazenadas as regras associadas à relação entre elas, ou seja: de que forma variáveis de diferentes células estão relacionadas entre si e interferem na negociação.

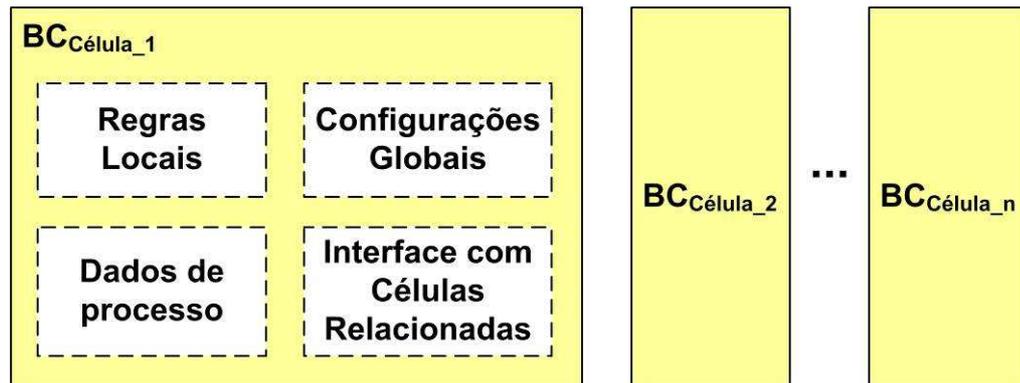


Figura 21 – Estrutura das bases de conhecimento

A BC deve ser inicialmente configurada por especialistas, no cadastramento de:

- Variáveis e limites operacionais (ver seção 3.3.3);
- Restrições operacionais de cada célula e equipamento;
- Relação entre variáveis de CRs;
- Diagnósticos relacionados a eventos conhecidos de falhas;
- Ações típicas, relacionadas aos diagnósticos.

Para cada SIA a ser implantado o GCAD, as informações acima listadas devem ser levantadas e configuradas na BC. Após sua definição, a BC passa a servir de insumo para que cada célula identifique situações anômalas ou inseguras no sistema, aplicando ações previamente cadastradas ou ainda inferindo novas regras de conhecimento, com base no conhecimento pre-existente e em regras de aprendizagem a serem incorporados. Especialistas podem, a qualquer momento, realizar ajustes ou cadastrar novas informações e, para cada situação identificada, o processo deve fornecer respostas consistentes.

Essa estrutura de BC visa a permitir a autonomia de cada célula, através da modularização do seu conhecimento. Adicionalmente, possibilita a integração entre CRs através do mapeamento entre suas variáveis. Desta forma, a cooperação entre múltiplas células em uma estrutura de SMAs passa a ser viabilizada. Na Figura 22 é ilustrada a estrutura interna das BCs locais.

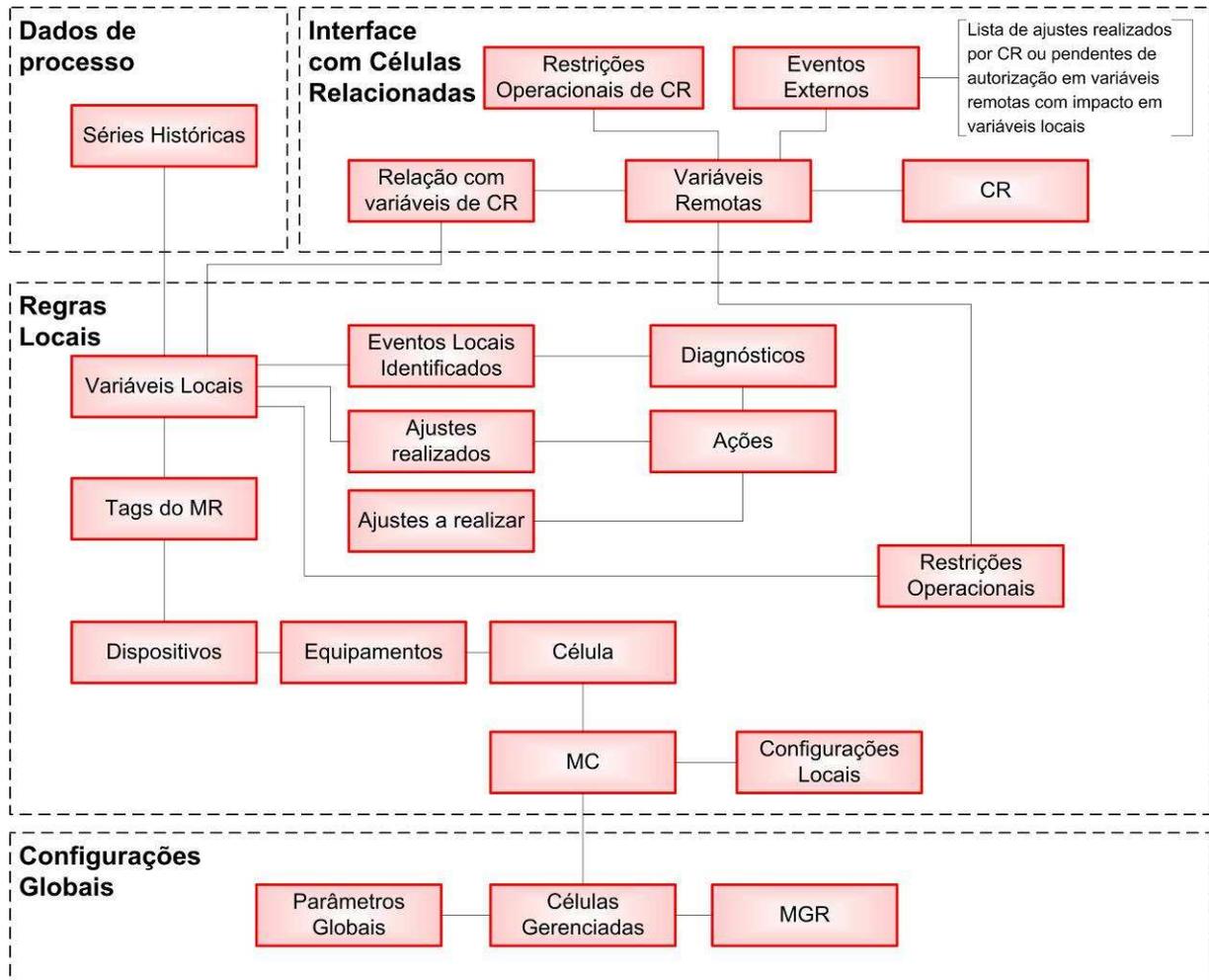


Figura 22 – Proposta de Estrutura para a base de conhecimento local

De forma geral, as regras locais são compostas por conhecimentos especialistas e configurações relativas ao MC e à respectiva célula, sendo que as informações sobre a célula podem ser desmembradas em equipamentos e dispositivos. As variáveis de interesse devem apresentar limites operacionais configuráveis e devem ser mapeadas a variáveis correspondentes no processo (e respectivas séries históricas). Variáveis de cálculo ou parâmetros relativos à célula são cadastrados como restrições operacionais.

Os eventos locais em geral estão relacionados a variações nos valores das variáveis para além dos limites estabelecidos. São estes eventos que direcionam as análises locais para possíveis diagnósticos de falha, e a partir dos diagnósticos são analisadas e identificadas ações corretivas. As ações e diagnósticos identificados localmente são armazenados na BC de forma a possibilitar rastreabilidade de ações. Mas a depender da configuração adotada e capacidade de armazenamento local, o histórico de registros pode ser eliminado da BC local após serem descarregados no MGR.

A partir do mapeamento entre variáveis, eventos locais, diagnósticos e ações na BC, quando uma ação é identificada em uma célula, o MC verifica se as variáveis locais impactadas apresentam relação com variáveis remotas de células relacionadas. Havendo relação, são verificadas restrições operacionais relacionadas à variável. Caso haja restrição, a célula inicia uma negociação do ajuste com as células relacionadas.

As configurações globais armazenadas em cada célula permitem que elas considerem e preservem parâmetros relativos ao SIA como um todo.

Periodicamente, deve-se verificar a existência de eventos externos, relacionados a variáveis locais, sejam eventos de sincronização, negociação de ajustes ou diagnósticos externos.

Em nível remoto (Figura 23), o MGR deve dispor de uma BC Global que concentre as BCs de todas as células sob sua gestão, permitindo que análises sejam realizadas considerando um universo mais amplo de dados.

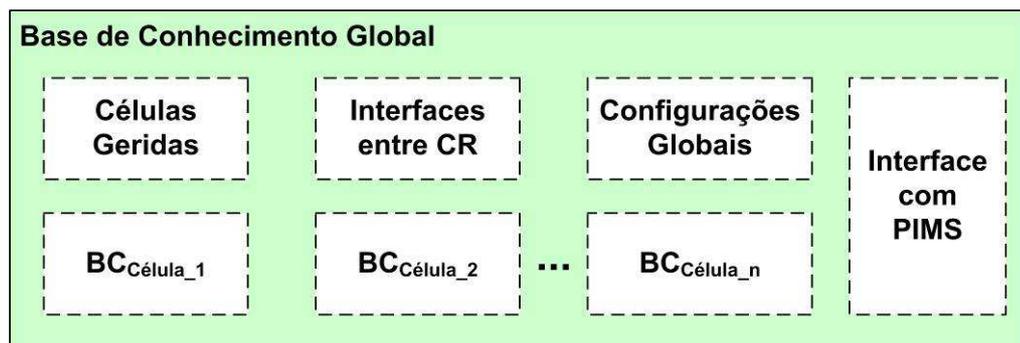


Figura 23 – Estrutura de uma Base de Conhecimento Global

A BC Global é composta por:

- Lista de células gerenciadas;
- Relação entre variáveis de CRs;
- Regras conhecimento das células gerenciadas;
- Parâmetros relativos ao SIA como um todo.
- Interface das variáveis armazenadas com ferramentas PIMS.

A BC Global concentra informações de células distribuídas e funciona ainda como um mecanismo de redundância, já que os dados de células ficam armazenados externamente a elas e podem ser restaurados em sua totalidade para novos dispositivos acoplados à respectiva célula, por exemplo, em caso de falha do MC atualmente em uso.

3.2.5 Requisitos principais do GCAD

O GCAD pressupõe o atendimento dos seguintes requisitos principais:

a) Capacidade de comunicação e decisão distribuída em rede

Durante a análise local de um MC, caso seja detectada a necessidade de ajuste de uma variável local que impacte um valor global do processo, esta atualização deverá ser submetida às CR nas formas de:

- Negociação, de modo que todas as CRs analisem seu cenário operacional com base no ajuste proposto por uma célula e então autorizem ou informem restrições que restrinjam o ajuste. Os ajustes sujeitos a negociação somente são realizados mediante concordância das CRs envolvidas. Caso uma ação seja recusada por CRs, o MC solicitante deve propagar as ocorrências às demais células relacionadas e ao MGR, para eventuais interferências remotas, e executa as medidas locais de segurança.
- Sincronização, de forma que uma célula notifique as CRs quanto a ajustes locais emergenciais já realizados. Os ajustes que não apresentam impacto global são realizados localmente pela célula e só depois são propagados às demais CRs.

b) Capacidade de leitura e escrita em MRs

Cada MC deve coletar, em tempo real, informações do MR, bem como ajustar seus parâmetros ou enviar ações de controle, sem necessariamente interromper o funcionamento local.

c) Capacidade de armazenamento local

Um requisito importante é a capacidade de armazenamento local dos dados, de processo e de configuração, incluindo séries históricas de cada variável de interesse, por um período de tempo configurável. Estas séries, juntamente com a BC, servem de insumo para o MC local realizar análises corretivas ou preventivas de forma autônoma. A capacidade local de armazenamento pode ser configurável, de acordo com a necessidade e importância estratégica de cada célula.

d) Armazenamento em servidores de historiamiento

Além do armazenamento local, havendo estrutura de rede disponível, os dados de processo, de configuração e regras de conhecimento podem ser continuamente enviados ao MGR, de forma a permitir o historiamiento de dados bem como futuras análises para fins de simulação e otimização. Em geral, servidores remotos são implantados em sistema de *failover*^{*}, mas esta discussão bem como restrições relacionadas ao armazenamento de dados não são tratadas no escopo deste trabalho. Aspectos relativos à estrutura de armazenamento de dados são endereçados na seção 3.2.4 (Bases de Conhecimento).

e) Capacidade de sincronização de dados, após a restauração do *link* de comunicação, em caso de perda de conexão.

Ao se restabelecer o *link* de comunicação entre uma célula e o MGR, os dados armazenados localmente precisam ser sincronizados, para que o MGR mantenha um registro completo dos dados de cada célula. Os arquivos devem ser automaticamente coletados pelo MGR e importados para os historiadores de dados e para a BC Global, de forma a restaurar o histórico de dados e atualizações locais ocorridas durante a desconexão.

f) Capacidade de funcionamento autônomo

Em caso de perda de conexão entre o MGR e uma célula, inclusive por falha no próprio MGR, espera-se que as células sejam capazes de funcionar em Modo Autônomo, tomando decisões autônomas ou em cooperação com CRs, sobre ajustes a serem realizados localmente. Além disso, sempre que possível, a malha de controle que contém o MC deverá permanecer estável, mesmo com CRs inativas.

Para as células ligadas a este MGR, é importante que eventual desconexão seja inócua e, desde que sejam observadas as restrições locais de funcionamento e as restrições relacionadas a demais células, as operações locais devem permanecer ativas.

Em caso de situações para as quais a célula não disponha de uma regra ou ação precisa, espera-se que o MC tenha a habilidade de acomodar algoritmos que analisem as informações existentes (dados do processo, limites de operação local, interface com demais CRs) e possam inferir sobre que ação ou ajuste realizar na célula local. Em caso de conflitos nas decisões entre os MCs, a célula submete os diagnósticos identificados a níveis remotos ou a ações manuais, sinalizando o impasse e conduzindo o sistema a um modo seguro de operação.

3.2.6 Hipóteses de Falha

A seguir, são descritas as principais hipóteses de falha, o comportamento esperado dos MCs e do MGR e o comportamento da célula após um restabelecimento.

a) Não convergência entre CRs

Durante uma negociação entre CRs, caso não se obtenha um resultado convergente em tempo hábil entre as CRs ativas, é verificado o impacto da não realização do ajuste identificado, para então decidir pela continuidade ou interrupção, parcial ou total, do funcionamento local.

b) Falha de comunicação entre CR

Caso uma célula detecte uma perda de conexão com CRs, o MC local registra a perda de conexão com a referida CR, atualizando a lista de CRs ativas e manter a atividade local. Caso esta falha de comunicação ocorra durante uma negociação, devem-se avaliar interfaces entre as células e analisar restrições locais e existentes na relação, a partir das informações armazenadas localmente nas BCs, para então realizar uma análise local e realizar eventuais ajustes ou desativações, com base em novo cenário operacional, de forma a manter a integridade da planta.

Em alguns casos, caso se perceba a desconexão de uma CR, é possível que o MC decida por configurar sua respectiva célula para o Modo de Falha. Da mesma forma, podem existir situações em que a desconexão de uma CR é inócua a operação local.

c) Falha de conexão entre MCs e ambiente externo (MGR e CR)

Caso um MC detecte que sua conexão com CRs e com o MGR foi perdida, se tornando isolado de toda a rede, ativa-se o Modo de Falha, de forma a evitar impactos na integridade de informações do SIA, por conta de variações ou reconfigurações não controladas envolvendo CRs ativas (ver seção 3.2.3 – Interface entre células).

A decisão de desativar ou não uma célula isolada que não possua interface com outras células deverá ser definida pelo especialista durante a configuração do Modo de Falha. Caso contrário, o procedimento padrão da célula autônoma no Modo de Falha consiste no acionamento de alarmes e interrupção das atividades locais.

- d) MR insuficiente para estabilizar processo (imprevisibilidade ou incerteza no processo).

Caso os valores de variáveis controladas excedam os limites operacionais definidos e o MR não seja suficiente pra manter ou tornar o processo estável em tempo hábil, o MC realiza uma análise local, utilizando a BC, de forma a identificar uma ação que estabilize a célula. Paralelamente, deve verificar se a ação identificada impacta células relacionadas (CR), de forma a evitar um comportamento caótico. Caso uma ação não seja identificada, o MC deverá inferir uma nova ação com base nas restrições locais, nos dados de processo da respectiva célula, em dados de configuração e nas regras de CR (ver Módulo de Análise Local, no Apêndice A – Descritivo do Módulo Cognitivo), ou submeter a ocorrência às CR e ao MGR, caso algoritmos de inferência não estejam embarcados no MC.

- e) Eventos de falha cujas ações não são identificadas pelo MC (imprevisibilidade)

Caso o MC identifique uma instabilidade, que possa causar danos permanentes à célula ou a algum de seus componentes (lógicos ou físicos) e cuja ação não seja identificada ou, por restrições relativas à integridade, não seja recomendável a execução, o MC sinaliza a ocorrência ao MGR e CRs e configurar a célula para o Modo de Falha.

- f) Falha no *link* de comunicação entre o MC e o MGR

Em condições normais, cada célula deve operar em Modo Autônomo. Assim, em caso de perda de conexão entre uma célula e o MGR, embora a sincronização de dados e o acesso remoto do MGR à respectiva célula sejam interrompidos, o funcionamento local inicialmente não deve ser afetado.

Caso a célula desconectada possua interface com outras células e a comunicação nesta camada permaneça ativa, a célula deverá registrar a desconexão, propagar a ocorrência às CRs e manter suas operações locais.

Caso a conexão não seja restabelecida em tempo hábil e a capacidade de armazenamento local do servidor de armazenamento local seja esgotada, poderá haver perda de dados. Neste caso, haverá uma lacuna de dados e o referido período não poderá ser considerado em análises futuras. Assim, ao se detectar uma desconexão, é importante que as devidas correções sejam realizadas o mais rapidamente possível, de modo a evitar que os recursos de armazenamento se tornem insuficientes e haja perda de informações sobre o histórico de eventos.

g) Falha de comunicação entre MC e célula

Em caso de falha na conexão entre o MC e a respectiva célula, significa que a célula deixou de ser autônoma, devendo-se imediatamente ativar o Modo de Falha (ver seção 3.4.1), já que a célula estará operando apenas com o controle padrão da célula, e eventuais decisões estarão inicialmente condicionadas à intervenção humana. Neste caso, como as informações sobre a célula não estão disponíveis, as demais CRs devem assumir que ela se encontra em Modo Inativo.

3.2.7 Níveis de Prioridade na Execução de Tarefas

Em caso de simultaneidade, a execução de tarefas deve ocorrer de acordo com níveis de prioridade, de modo que os MCs das células não tenham seu processamento sobrecarregado em momentos que precisam executar operações emergenciais. Assim, as tarefas devem ser escalonadas de acordo com a prioridade de execução, onde a prioridade de menor numeração é a de maior urgência em relação às demais, devendo ser primeiramente executada. Inicialmente, são definidos cinco níveis de prioridade, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Níveis de prioridade.

Níveis	Tarefas
Um	MC ou MGR realizando análise corretiva ou atualização do MR (malha-rápida*)
Dois	MC realizando negociação com CR ou com o MGR (malha-rápida)
Três	MC realizando sincronização de dados com o MGR e CR (malha-lenta*)
Quatro	MC ou MGR realizando aperfeiçoamento do sistema (malha-lenta)
Cinco	Tarefas não rotuladas

Sejam duas células C_1 e C_2 relacionadas, é estabelecida uma suposição de que C_2 esteja realizando uma análise preventiva para aperfeiçoamento local (prioridade quatro) e C_1 detecte um problema em uma variável local θ_1 e uma ação corretiva local (prioridade um). Sendo que θ_1 impacta diretamente uma variável θ_2 de C_2 , esta ação deve ser executada em C_1 e propagada imediatamente para que C_2 realize eventuais ajustes ou ações. Ao obter a informação de C_1 , caso não haja recurso de processamento local livre em C_2 , a ocorrência deverá ser escalonada em filas de acordo com os níveis de prioridade definidos na Tabela 1.

Sugere-se a criação de filas prioritárias, em que as de tarefas sejam logicamente distribuídas de acordo com as prioridades definidas (Tabela 1). Em princípio, são propostas: uma fila de execução, escalonando um número configurável de tarefas, e uma fila geral para escalonar as tarefas excedentes. Para o GCAD, foi assumido o limite de uma tarefa por fila prioritária.

Inicialmente, as tarefas são escalonadas na fila geral e com o nível de prioridade sinalizado. À medida que as filas prioritárias são esvaziadas, as tarefas da fila geral vão sendo transferidas de acordo com a prioridade e ordem cronológica de chegada, ou seja, de menor *timestamp*^{*}.

Entretanto, à medida que as filas se tornam congestionadas, o critério de escalonamento a ser adotado deve evitar que tarefas menos prioritárias nunca sejam executadas. Sendo assim, à medida que uma tarefa da fila geral é preterida por tarefas mais prioritárias, esta deverá ter um contador de espera incrementado, com limite máximo configurável. Este contador indica quantas tarefas de maior criticidade e *timestamp* foram priorizadas em relação a ela. Dessa forma, para o GCAD, as tarefas da fila geral são escalonadas de acordo com o seguinte critério de sequenciamento²:

- Em primeiro lugar, é executada a tarefa que apresentar maior valor relativo ao contador de espera (quando este valor tiver ultrapassado o limite máximo configurado, caso contrário, vale o segundo critério);
- Em segundo lugar, é executada a tarefa mais prioritária;
- Em caso de mais de uma tarefa com mesmo valor para o contador de espera, prioriza-se inicialmente a tarefa de maior prioridade e, em seguida, a de menor *timestamp*.

Esta distribuição, além de evitar que uma tarefa de maior prioridade seja comprometida por tarefas menos prioritárias devido à alocação sequencial, visa a evitar que uma tarefa de menor prioridade permaneça indefinidamente em fila de espera.

²² Este trabalho não se propõe a estudar ou desenvolver algoritmos de escalonamento e priorização. Sendo assim, sugere para trabalhos futuros, para melhor desempenho em ambiente de produção, a investigação de técnicas de escalonamento de processos que melhor satisfaça aos requisitos de cada sistema a ser aplicado o GCAD.

3.3 MÓDULO REATIVO

O MR é representado pelos sistemas de controle convencional de processos industriais (em especial, os CLPs). De acordo com a conveniência de cada unidade, os sistemas de controle podem ser ligados ao processo e interconectados a uma rede de controladores, podendo ser estruturados em diferentes configurações.

O MR funciona como uma interface de controle entre a célula e o MC, lidando simultaneamente com eventos de caráter contínuo e discreto. É ligada aos instrumentos de campo e executa basicamente as ações de controle convencional no sistema, como: controle de abertura e fluxo de válvulas, acionamento de motor elétrico, controle PID, etc.

3.3.1 Modos de Funcionamento de uma célula

Considera-se que uma célula pode estar definida em um dos seguintes modos de funcionamento: configuração, operação, manutenção, espera, falha ou inatividade (Figura 24).



Figura 24 – Modos de funcionamento das células

Através do **Modo de Configuração**, é possível que engenheiros especialistas do processo configurem os parâmetros de controle convencional da célula, tais como restrições de operação dos dispositivos, *setpoints* e demais limites operacionais das variáveis. Neste caso, trata-se de um pseudomodo, já que ele pode ser definido em concomitância com os demais sem necessariamente alterar as operações em andamento.

O **Modo de Operação**, em geral, é ativado manualmente e permanece ativo enquanto a célula estiver funcionando em condições normais de operação. Durante o Modo de Operação, os ajustes da célula poderão ser realizados da seguinte forma:

- Manual: presume que eventuais falhas ou impasses deverão ser tratados manualmente ou de acordo com as rotinas padrão de controle do sistema (em alguns casos, alarmes são disparados e a operação da célula pode ser

interrompida). Este é o modo padrão de funcionamento das células, em que não há um Módulo Cognitivo (MC) conectado;

- Autônomo: o MC supervisiona continuamente os dados trafegados no MR de modo a identificar possíveis falhas ou possibilidades de melhoria que não são tratáveis por rotinas comuns ao chão de fábrica;
- Remoto: análises corretivas ou preventivas do MR são realizadas por especialistas a partir de IHCs remotas.

A seleção do tipo de ajuste realizado (manual, autônomo ou remoto) deve ser feita por especialistas do processo, a não ser em caso de falha do MC ou MGR, quando a operação é automaticamente alterada pelo MR para o Modo Manual.

É importante ressaltar que a alteração do modo de funcionamento da célula deve ser feita de forma segura, concluindo as operações críticas em andamento e, quando pertinente, mantendo em funcionamento as funções relativas à integridade e segurança.

O **Modo de Manutenção**, em geral definido pelo operador através de uma IHC do processo, é utilizado para paradas programadas, manutenções corretivas ou substituição de componentes (de hardware ou de software). Durante o Modo de Manutenção, a atividade operacional do processo é cessada, até que a manutenção seja concluída e o sistema apresente condições seguras de funcionamento. Após a manutenção bem-sucedida, o sistema é configurado para um Modo de Espera, até que a operação seja reativada pelos operadores.

O **Modo de Espera** é ativado quando a célula apresenta equipamentos e dispositivos em condições normais de funcionamento, porém não está em operação efetiva (exceto eventuais tarefas mínimas para manutenção da integridade e segurança do processo ou da produção). Pode se tratar de um estado temporário, por exemplo, entre uma atualização ou manutenção bem sucedida (após um período de inatividade) e o reinício de um ciclo de operação.

O **Modo de Falha** (ou modo seguro) em geral é automaticamente ativado quando a célula passa a apresentar resultados indesejáveis ou equipamentos e dispositivos em condições inaceitáveis (podendo inclusive requerer intervenções). Em geral, é ativado quando são excedidos limites máximos de operação ou após uma investigação que teve como plano de ação a parada imediata para manutenção ou por medidas de segurança, requerendo uma análise por especialistas do processo e por operadores *in loco*.

No Modo de Falha, quando pertinente e possível, as operações mínimas para manutenção da integridade e segurança do processo ou da produção devem ser mantidas. Em

se tratando de um desligamento, é interessante conhecer ou estimar o tempo para iniciar o desligamento seguro, como base no tempo médio necessário para conduzir o sistema a um estado seguro e com base no tempo médio até que a falha possa gerar um erro no sistema. Esse tempo varia de acordo com o sistema e normalmente é conhecido pelas equipes de operação para permitir as ações em cascata. Adicionalmente, o Modo de Falha deve ser notificado para CRs e para o MGR, para que medidas remotas de ação corretiva sejam iniciadas.

Eventualmente, especialistas podem decidir por desativar uma célula. Isto pode ocorrer por razões estratégicas, por exemplo, em se tratando de sistemas de baixa produtividade e limitações de infra-estrutura, de forma a reduzir custos operacionais, até que este cenário operacional seja redefinido em condições mais produtivas. Outra possibilidade é a desativação da célula em definitivo, em caso de sistemas que não apresentam vantagens em continuar operando e não apresentam condições para aperfeiçoamento deste cenário. Nestes casos, é definido o **Modo de Inatividade**.

3.3.2 Estrutura e Tarefas do MR

O MR é responsável pela aquisição de dados do processo, acionamento, ajuste e interrupção da operação dos dispositivos do chão de fábrica. À medida que obtém os valores do processo, o MR (Figura 25) processa o fluxo discreto de cada dispositivo para sinais analógicos, que serão aplicados no processo através dos atuadores, fornecendo o conjunto de ajustes necessários para manter estável o processo.

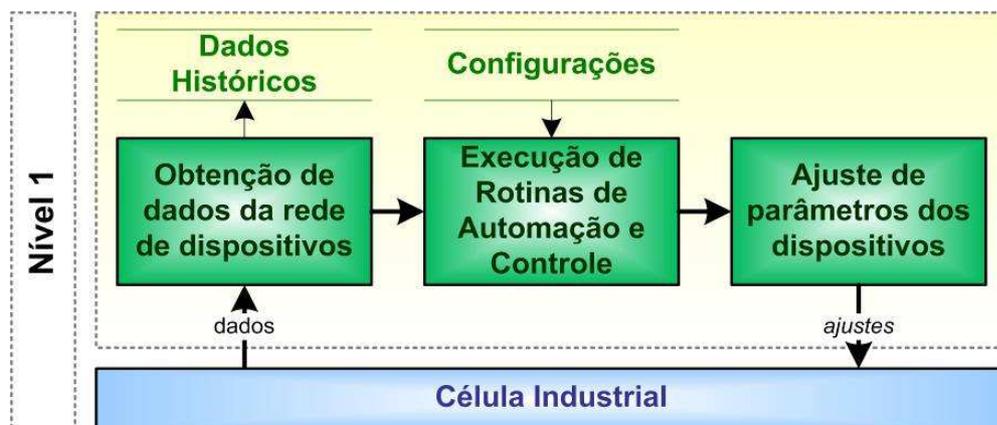


Figura 25 – Representação do Módulo Reativo

Caso seja identificada alguma inconsistência ou alguma variação que possa ocasionar em um resultado não desejado, em um primeiro nível de atuação, o MR deve realizar os ajustes necessários para estabilizar a célula e evitar que sua continuidade seja prejudicada. As atividades básicas e as interações com o MR são apresentadas na Tabela 2.

Entretanto, mesmo após uma tentativa de estabilização e ajuste pelo MR, com base em algoritmos de controle convencional, a célula pode apresentar resultados indesejáveis, sendo necessária uma análise mais apurada dos dados e um controle mais sofisticado.

Tabela 2 – Atividades e interações com o MR.

Atividades e interações com o MR	
Executante	MR
Precondição	Célula em atividade
Plano básico de ações	1. Obtém informações dos dispositivos do processo 2. Executa rotinas de controle
Interações de entrada	Dispositivos do chão de fábrica MC
Interações de saída	Dispositivos do chão de fábrica MC

Porém, os algoritmos de controle convencional incorporados pelo MR, em geral, não dispõem de capacidade para lidar com as incertezas inerentes a uma célula, sendo necessária uma camada que trate desses aspectos. Esta camada é representada pelo MC.

Os algoritmos de controle do MR devem funcionar de forma independente, para que a interferência do MC ocorra apenas quando necessários ajustes que confirmem à célula uma melhoria de desempenho, ou em situações onde a ação local dependa de informações provenientes de CRs para ajustes no modelo local.

3.3.3 Limites Operacionais das Variáveis

Uma variável de processo poder ser medida ou calculada:

- Medida: quando representa um valor medido diretamente do processo;
- Calculada: quando representa um valor calculado, com base em uma ou mais variáveis medidas.

Uma variável medida pode ser controlável ou não controlável. Uma variável controlável é passível de ajustes pelo MR e pelo MC, enquanto que uma variável não controlável somente pode ser ajustada por especialistas, e quando isto for possível.

Para cada variável, devem ser configurados quatro limites operacionais em torno de um valor considerado ideal, ou seja, o *setpoint* (SP): limite máximo de operação (MAX_{OP}), limite máximo de controle (MAX_{CTR}), limite mínimo de controle (MIN_{CTR}), limite mínimo de operação (MIN_{OP}), conforme ilustrado na Figura 26.

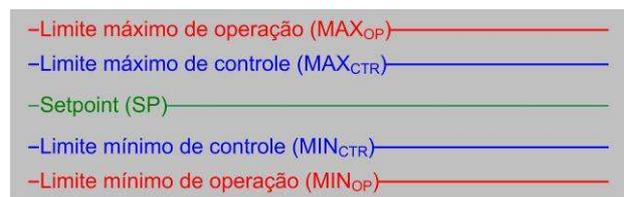


Figura 26 – Limites operacionais

Estes limites se constituem em um meio para identificar quando determinada variável passa a apresentar valores fora da faixa de normalidade, disparando assim uma análise pelo MC com o objetivo de identificar ações corretivas para corrigir o desvio e normalizar o sistema.

Inicialmente, estes valores devem ser configurados pelo responsável operacional, de forma a estabelecer uma configuração inicial que sirva de insumo para o MC. Este então fará o ajuste das variáveis de controle durante o Modo de Operação Autônomo da célula. Estes limites operacionais podem ser associados a interpretações lingüísticas, conforme listado na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites operacionais em termos lingüísticos.

Limites	Interpretação
MAX_{OP}	Muito alto
MAX_{CTR}	Alto
SP	Médio
MIN_{CTR}	Baixo
MIN_{OP}	Muito baixo

Idealmente, um valor de uma variável pode oscilar entre os limites MIN_{CTR} e MAX_{CTR} sem que isso se configure em uma condição de erro para o MC. Entretanto, caso o valor de uma variável oscile entre os limites MAX_{CTR} e MAX_{OP} ou entre MIN_{OP} e MIN_{CTR} ,

esta variação é interpretada como uma falha não tratável pelo controlador convencional, devendo então ser imediatamente investigada pelo MC.

Através da análise de regras locais e dos dados de processo obtidos do MR, o MC deve atuar para estabilizar os valores destas variáveis, de forma a evitar que atinjam os limites de operação, quando o Modo de Falha deverá ser ativado. Assim, embora entre as faixas MAX_{CTR} e MAX_{OP} ou entre MIN_{CTR} e MIN_{OP} a célula possa continuar em Modo de Operação sem necessariamente comprometer a segurança local e do SIA, é importante que, caso o Modo de Falha seja ativado, isto ocorra em uma condição segura. Ou seja, as atividades em andamento da planta que não podem ser interrompidas, devem ser concluídas, além das demais atividades obrigatórias decorrentes, para então manter a integridade do sistema como um todo.

Ao atingir MIN_{CTR} ou MAX_{CTR} , caso o MC detecte que o valor de uma variável apresenta uma oscilação ou tendência de evolução em direção aos limites MIN_{OP} ou MAX_{OP} , o MC deve concluir o ciclo de operação atual da célula até um modo seguro e, em seguida, acionar o Modo de Falha, antes que MIN_{OP} ou MAX_{OP} seja atingido.

Embora a estratégia de verificação da violação de limites seja um procedimento relativamente simples para ser usado como único mecanismo de acionamento de análises e decisões autônomas, a depender da complexidade do sistema analisado, esta alternativa pode ser aperfeiçoada tanto por rotinas que ajustem dinamicamente os limites predefinidos como pelo acoplamento de um módulo de diagnóstico especialista com funcionalidades mais robustas, a exemplo do MAICE (Metodologia para Modelagem e Integração do Conhecimento Especialista).

3.4 MÓDULO COGNITIVO

Uma característica fundamental do GCAD é prover a separação das funcionalidades relativas ao comportamento normal do sistema daquelas relativas ao tratamento de falhas. Esta habilidade é possibilitada por um MC, associado a cada célula, que analisa continuamente os dados do processo e de controle de forma a identificar e ajustar possíveis falhas e pontos de melhoria.

Os dados do MR devem ser continuamente analisados pelo MC, que, através da análise de uma base de conhecimento local, visa a identificar eventuais instabilidades não tratadas pelo MR e ajustar seus parâmetros, corrigindo falhas e tratando impasses, para que a célula apresente resultados satisfatórios e, quando possível, sejam aperfeiçoadas.

Cada MC deve supervisionar as variáveis do MR de forma que:

- Através da verificação de limites operacionais de variáveis de interesse, caso sejam identificadas variações no processo que possam estar associadas a falhas não tratadas pelo MR, ações corretivas ou sinalizações sejam realizadas imediatamente.
- Caso apresentem um padrão de variação que possa evoluir para condições conhecidas de erro na BC, medidas preventivas sejam tomadas para evitar esta recorrência.

Cada célula deve dispor de uma lista com o endereçamento de demais CRs e respectivas variáveis que geram ou sofrem impactos no funcionamento e desempenho local durante ajustes realizados. Caso um MC perca a conexão com toda a rede, se tornando isolado, o sistema deve ser conduzido a um Modo de Falha previamente definido.

Em caso de perda de conexão com o gerenciador remoto, cada sistema local deve manter sua operação local. Isto significa que eventuais falhas ou instabilidades deverão ser tratadas predominantemente em nível local ou em conjunto com CRs.

Enquanto a BC de cada célula não estiver suficientemente configurada com regras de conhecimento especialista, é possível que parte das decisões sobre atuações a serem realizadas localmente seja apenas sinalizada pelo MC, até que sua BC esteja devidamente configurada.

Antes de se adotar o modelo do GCAD, é necessário que seja realizado um procedimento inicial de configuração dos sistemas de controle, de forma a operacionalizar cada célula com uma BC, incluindo as configurações para os Modos de Falha, para então habilitar a célula a operar em Modo Autônomo. A critério do especialista, o GCAD pode ser utilizado em malha aberta ou fechada. Caso seja utilizado em malha aberta, apenas sinalizações serão realizadas e nenhum ajuste será realizado diretamente no processo. Sendo utilizada em malha fechada, o sistema estará operando, sempre que possível, em Modo Autônomo.

O principal benefício oferecido pelo MC, além de possibilitar a aplicação do conceito de células autônomas, consiste na detecção prévia de situações até então imprevistas ou não detectáveis por um controlador convencional, e que venham a impactar no desempenho da célula ou do SIA como um todo de forma danosa. Isso pode ser obtido através da análise local de uma base de conhecimento associada a ocorrências envolvendo variáveis

obtidas do MR. Adicionalmente, permite identificar aspectos em que a célula pode ter seu desempenho aperfeiçoado.

Os MCs visam a exercer a função de um especialista na tomada de decisão sobre atuação no processo em situações envolvendo informações imprecisas, incompletas ou ainda múltiplos diagnósticos possíveis. Cada MC deve ter capacidade de ler e escrever dados no MR do processo, ajustando parâmetros e *setpoints*, ou ainda conduzindo a uma ação específica sobre determinada situação ocorrida, para assim evitar que a célula seja desviada para uma condição insegura. Além disso, através de mecanismos locais de sincronização e negociação, os MCs de células relacionadas devem cooperar entre si, de forma a aperfeiçoar o controle inteligente.

Os MCs devem atuar como controladores locais autônomos e, através de uma base de conhecimento e de um processamento local de análise, devem dispor de uma habilidade de automaticamente identificar diagnósticos ou ações, em resposta a instabilidades percebidas no processo, de forma a corrigir falhas não tratáveis em tempo hábil ou de forma automática por um controlador convencional. Como contingência aos casos em que não haja na BC uma ação corretiva a ser aplicada à célula em resposta a determinado evento de falha, o MC deve estar apto a incorporar rotinas para análise preventiva, aprendizagem e inferência de novas regras de conhecimento e ações de ajuste (ver Módulo de Análise Local do Apêndice A – Descritivo do Módulo Cognitivo), mesmo sem a intervenção externa de engenheiros e operadores, ou ainda no caso de ocorrências de falha de conexão com o MGR.

3.4.1 Modos de Operação de um MC

O MC dispõe de quatro modos de operação: configuração, autônomo, vigilante e falha (Figura 27) e deve analisar as informações de controle trafegadas no MR, durante suas ações de controle padrão, e proceder com os ajustes ou sinalizações.



Figura 27 – Modos de funcionamento e atividades do Módulo Cognitivo

O **Modo de Configuração** é definido por especialistas de forma a preparar uma célula para que esta se torne ajustável pelo MC e MGR. No Modo de Configuração são definidas informações como:

- CRs que possuem interface com a célula;
- Variáveis correlacionadas e do tipo de relação entre elas;
- Procedimento a ser adotado pela célula em caso de falha de comunicação com as CRs, durante a negociação ou sincronização de dados;
- Procedimento a ser adotado pelo MC caso a célula entre em Modo de Falha;
- Procedimento a ser adotado pelo MC após a reativação da célula que se encontrava fora de operação

Somente após estas definições, a célula pode ser configurada em Modo Autônomo. O MC então passa a analisar os dados locais e de CRs, de forma a aprender sobre o processo e sinalizar ou realizar eventuais ajustes.

O **Modo Autônomo** deve ser executado de forma contínua durante o Modo de Operação Autônoma de sua respectiva célula. Durante este modo, o MC verifica os limites operacionais das variáveis cadastradas, para então iniciar suas atividades de análise. Durante o Modo Autônomo, as tarefas do MC podem ser basicamente dos tipos:

- Análise: a tarefa de análise pode ser corretiva ou preventiva e visa a tratar de variáveis cujos valores estão além dos limites de controle ou operação, ou prevenir a ocorrência de falhas. Realiza um processamento local que visa a identificar uma decisão de ajuste ou ação a ser aplicada no processo.
- Negociação: a tarefa de negociação com CRs é realizada em caso de necessidade de ajuste em variáveis locais que compõem valores globais no processo.
- Atualização: durante a tarefa de atualização, são transmitidos ajustes ao MR da célula.
- Sincronização: A tarefa de sincronização é feita após ajustes na BC local, os quais devem ser propagados ao MGR e às eventuais CRs.

O **Modo Vigilante** deve ser definido durante os Modos de Operação Remoto e Manual do MR. Durante estes modos, a análise pode ser realizada em nível local ou remoto, mas o efetivo controle e os ajustes somente são realizados manualmente ou por especialistas

através de IHC. Neste caso, as ocorrências identificadas no MR são transmitidas ao MGR através do Módulo de Tratamento de Exceções (MTE) e, em caso de ajustes identificados em nível remoto, estes são rotulados quanto à prioridade (ver seção 3.2.7 – Níveis de Prioridade na Execução de Tarefas) e propagados para a célula pelo especialista, através de mecanismos de atualização remota.

O **Modo de Falha** deve ser definido em caso de falha:

- Nos componentes de hardware do MC;
- Na comunicação entre o MC e sua respectiva célula;
- Nas tarefas de análise e atualização do Modo Autônomo;
- Na propagação de dados do Modo Vigilante.

Neste caso, o Modo Autônomo deverá ser automaticamente desativado no MR e este passará a operar em Modo Manual ou Remoto.

3.4.2 Estrutura e Tarefas do MC

O MC deve ser embarcado em um dispositivo de hardware capaz de ler e escrever dados na camada de controle do MR da célula a ser controlada, com capacidade para armazenar uma BC, capaz de suportar as condições de um ambiente industrial e com capacidade de comunicação e decisão em rede. Este MC pode ser embarcado, por exemplo, em um CLP, cuja especificação técnica atenda aos requisitos necessários para abrigá-lo (ver item 3.2.5 – Requisitos principais do GCAD).

Entretanto, estes requisitos quando são atendidos, em geral são encontrados em controladores industriais de grande porte e, muitas vezes, inviáveis financeiramente. Uma alternativa economicamente mais viável é acoplar à estrutura de controle já existente no SIA um dispositivo externo que atenda às especificações definidas e que seja capaz de ler e escrever dados no MR existente.

As atividades básicas do MC e interações com outros módulos, realizadas durante o Modo Autônomo são listadas na Tabela 4.

A inteligência local do MC deve permitir que as decisões sejam realizadas de forma objetiva, quando possível minimizando ambiguidades de interpretações, e sem a necessidade constante de interferência de especialistas (através de uma IHC no MGR), ou de operadores, através da IHC do processo

Tabela 4 – Atividades do MC em Modo Autônomo.

Atividades e interações com o MC	
Executante	MC
Precondição	MR em Modo de Operação
Plano básico de ações	<ol style="list-style-type: none"> 1. Obtém informações do MR 2. Verifica limites operacionais 3. Realiza tarefas de análise 4. Realiza tarefas de negociação 5. Realiza ajuste do MR 6. Realiza tarefas de sincronização
Interações de entrada	MR, MGR, CR
Interações de saída	MR, MGR, CR

Em casos em que o MC é externo à camada de controle convencional, havendo necessidade de manutenções corretivas ou evolutivas no MC, o MR deve ser inicialmente configurado para operação em Modo Manual. Esta configuração pode ocorrer:

- Pelo MR de forma automática, em caso de falha no MC;
- Pelo próprio MC, em caso de manutenção programada;
- Manualmente, a partir de IHCs.

Em seguida, a conexão entre as duas camadas pode ser temporariamente interrompida. Assim, manutenções podem ser realizadas sem que haja necessidade de interrupção ou descontinuidade do processo, e sem impacto nas rotinas convencionais de controle. Enquanto o MR estiver em Modo Manual, a célula será controlada de acordo com os procedimentos padrões de controle convencional, estando eventuais decisões complexas condicionadas a decisões humanas.

3.4.3 Módulos de um MC

As operações realizadas pelo MC são distribuídas basicamente em cinco módulos principais e dois complementares (Figura 28): Verificação Continuada, Análise Local, Negociação, Sincronização, Ajuste do Controlador, Tratamento de Exceções e o Gerenciador de Eventos.

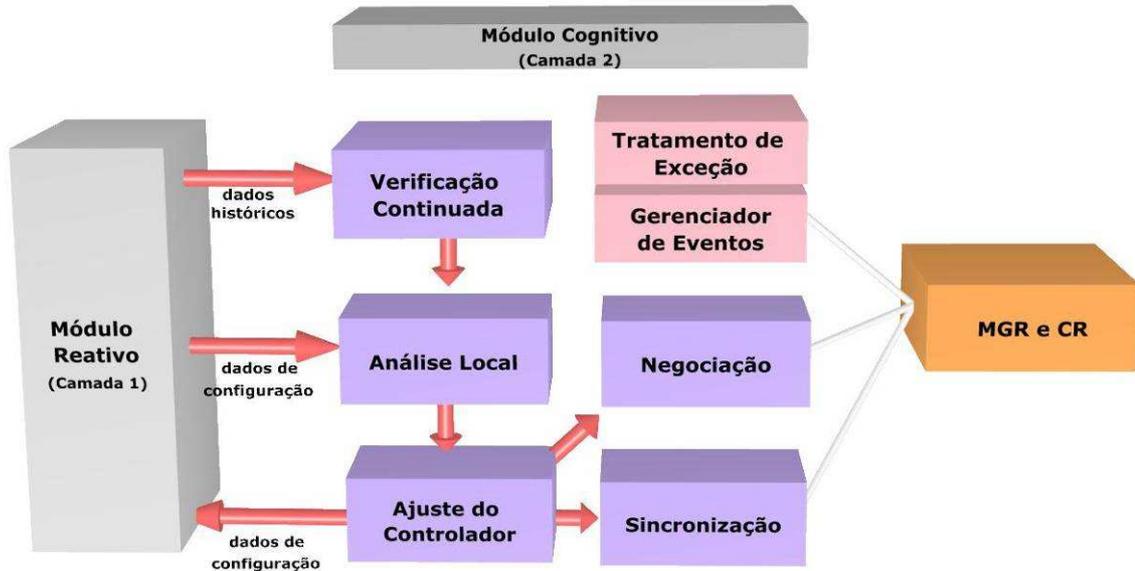


Figura 28 – Interação entre módulos principais do Módulo Cognitivo

O Módulo de Verificação Continuada (MVC) verifica os limites operacionais das variáveis obtidas do MR, de forma a identificar possíveis falhas não tratadas por ela. Em caso de variações além dos limites de controle, o Módulo de Análise Local (MAL) inicia uma análise corretiva. Caso contrário, o MAL pode realizar uma análise preventiva, verificando possíveis tendências de falhas com base nas variações das séries históricas.

Caso sejam identificados ajustes locais, em que não sejam identificados impactos em outras células, a BC é atualizada e os ajustes são enviados ao MR, através do Módulo de Ajuste do Controlador (MAC), sem a necessidade de negociação. Caso os ajustes a serem realizados envolvam atualização de variáveis que compõem valores globais, estes são negociados com CR através do Módulo de Negociação (MNE), de forma a produzir uma ação consistente e sem comprometer o funcionamento do SIA como um todo. Não havendo restrições que invalidem a atualização, os ajustes são enviados ao MR, através do MAC. Em seguida, a BC é sincronizada com o MGR e CRs, através do Módulo de Sincronização (MSI). O MSI realiza periodicamente sincronização de dados com MGR e CRs, de forma a manter atualizadas as BCs.

Em caso de divergências na negociação, o MC que originou a requisição verifica as demais alternativas do MAL. Caso não haja, aciona o Módulo de Tratamento de Exceções (MTE).

O Módulo Gerenciador de Eventos (MGE) gerencia eventos externos à célula, originados pelo MGR ou por CRs. Estes eventos incluem atualizações em BCs.

O tratamento de falha, impasse ou as tarefas de otimização da célula devem ocorrer, quando possível, sem que seu funcionamento seja interrompido ou sinalizando a necessidade de uma intervenção. Nos casos em que não for possível evitar ou tratar a falha, a célula deve automaticamente direcionar suas tarefas para o Modo de Falha.

Vale ressaltar que não é finalidade desta pesquisa solucionar todos os problemas operacionais, e sim minimizá-los. Sendo assim, pode haver situações em que uma célula esteja desconectada do MGR e que, mesmo após possíveis interações com CRs, não se consiga uma solução para determinados problemas. Neste caso, o MC da célula afetada notifica MGR e CRs sobre a insuficiência local e, a depender do grau de criticidade do problema, pode sinalizar (através do MTE) ou ativar o Modo de Falha da célula, evitando impactos de maiores proporções. Paralelamente, especialistas podem investigar e auxiliar na solução da instabilidade através de uma IHC para análise remota do MGR.

Caso a continuidade de operação possa ocasionar em falhas, o MTE realiza o lançamento de exceções, indicando, por exemplo, uma falha cujo tratamento não foi identificado ou uma manutenção que exceda a capacidade local de atuação.

Para mais detalhes sobre os módulos que compõem o MC, ver Apêndice A – Descritivo do Módulo Cognitivo.

3.5 MÓDULO DE GERENCIAMENTO REMOTO

Adicionalmente aos MCs locais, um MGR permite a análise simultânea das diversas células integradas em um SIA, visando a identificar ou tratar situações que excedem a capacidade de processamento dos MCs.

O MGR (Figura 29) visa a englobar funções de supervisão e a adicionar tarefas de controle em nível remoto, executando funções de um MC, porém em nível global, com base em informações de todas as células sob sua gestão e realizando análises da BC Global e dos dados armazenados em historiadores de processo.

O MGR deve prover rotinas e funções de verificação global de componentes remotos e gerar ajustes corretivos ou preventivos para tratar de forma eficiente as situações de instabilidade ou de insuficiência local. Para isso, cada MC deve sincronizar sua BC com o MGR.

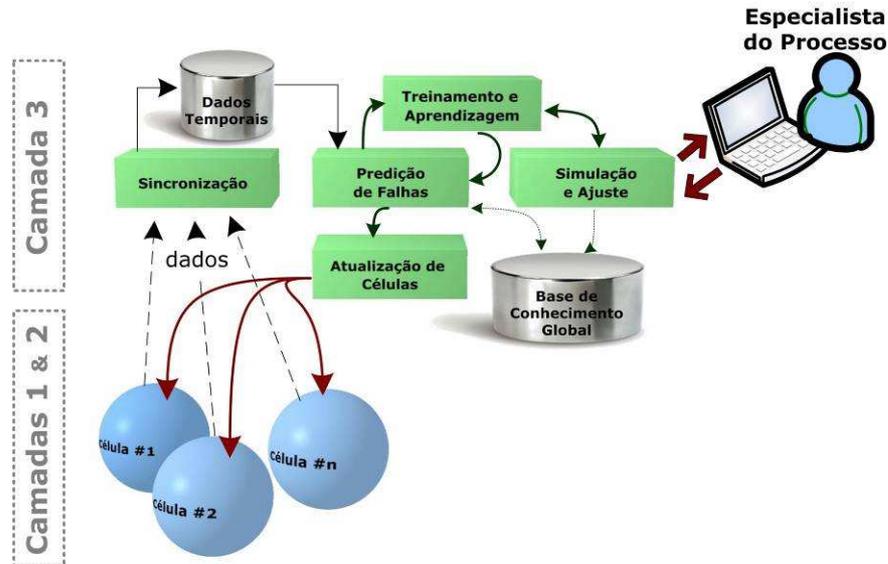


Figura 29 – Gerenciamento Remoto de células

O MGR visa a dispor de uma visão completa de todo o SIA e realizar um processamento remoto dos processos de maneira mais robusta, em especial para fins de operações e tarefas de malha lenta*. Além disso, através de uma IHC do MGR, especialistas do processo podem realizar configurações nos MCs de cada célula, as quais servirão de insumo para as análises locais e remotas.

Continuamente, o MGR deve analisar as séries históricas das variáveis e, periodicamente, havendo melhorias, sincronizar a BC Global com os MCs. Nesta sincronização, podem ser transmitidas atualizações referentes às variáveis específicas de cada sistema local bem como itens das BCs.

O MGR proposto provê suporte aos MCs distribuídos, em especial caso estes não sejam capazes de convergir para um resultado final em tempo hábil em razão de dados insuficientes. Para isso, enseja a permitir simulações do sistema, para fins, por exemplo, de otimização do processo a partir de “ótimos globais”, o que não necessariamente é alcançável pelo conjunto momentâneo de “ótimos locais”. Isto porque, mesmo em se tratando de células autônomas e cooperativas entre si, cada célula tem uma visão limitada dos dados das CRs, além de que, no modelo proposto, apenas se consideram as relações diretas com cada célula, o que pode dificultar otimizações em médio e longo prazo.

Ao propagar um ajuste através do MGR, é necessário que haja a garantia de que a condição operacional da célula ajustada não será alterada desde o momento do envio do comando até a chegada da mensagem na respectiva célula. Sendo assim, antes da transferência da mensagem, a fila de tarefas de células a serem atualizadas deve ser bloqueada

para a recepção de novas tarefas e a fila atual é exibida para o especialista já com o escalonamento do ajuste por ele programado. Após a confirmação do envio, e da recepção pela célula, a fila de tarefas é liberada.

Além disso, o MGR, dotado de um controle remoto mais robusto, complementar ao controle autônomo local, deve dispor de uma IHC que permita aos especialistas ou operadores a realização de ajustes remotos ou *in loco*, em caso de uma ou mais células entrarem em Modo de Inatividade por conta de análises não-conclusivas.

Entretanto, por ser um sistema concentrador, pode se tornar um gargalo, um ponto de falha ou de vulnerabilidade do sistema, caso as células dependam de suas informações para prosseguir com uma decisão sobre que ação executar. Desta forma, sua interação com MCs deve preservar as restrições de prioridade e escalonamento de tarefas, como descritas na seção 3.2.7.

Embora a definição de um MGR seja de grande importância em um modelo de gerenciamento e controle distribuído, as atividades de análise, simulação, otimização, dentre outras realizáveis em nível remoto, estão além do escopo deste trabalho.

3.6 RESULTADOS ESPERADOS

Com a utilização do GCAD, espera-se que os SIAs passem a se comportar da seguinte forma:

- a) Contendo imediatamente e em nível local os efeitos de falhas, evitando que estas assumam maiores proporções, com impactos nos objetivos globais do SIA;
- b) Atualizando os parâmetros do controlador, de forma a corrigir falhas. Caso a atualização não estabilize o sistema, e o limite de operação seja atingido, o sistema deverá ser configurado para um Modo de Falha previamente configurado;
- c) Detectando, em malha-lenta, o instante em que os sinais supervisionados passaram a evoluir para condições de erro, investigando os eventos e condições que possivelmente provocaram este cenário;

4 VALIDAÇÃO DA PROPOSTA

De forma a validar o modelo conceitual do GCAD em um sistema real, optou-se por realizar uma prova de conceito através da implementação dos principais itens propostos em um SIA em particular: os sistemas de produção de petróleo, de forma a ilustrar o cunho prático do modelo conceitual.

A escolha dos sistemas de produção de petróleo automatizados como estudo de caso se justifica por se tratar de um campo em crescente evolução e com importantes pontos passíveis de melhoria pelo uso da automação, em especial, relacionados ao tempo de decisão e atuação. Particularizou-se nas unidades baseadas em bombeio mecânico pela sua representatividade (para mais detalhes, vide Apêndice B – Sistemas de Produção de Petróleo). Contudo, uma vez ajustados os parâmetros específicos de cada sistema (*tags*, propriedades, relações entre variáveis, ações decorrentes, etc.), espera-se que a mesma proposta possa ser reutilizada para as demais técnicas de elevação* artificial, bem como demais SIAs, devido ao caráter generalista do trabalho.

Um exemplo é a ocorrência de incidentes envolvendo mais de um Poço e que não possam ser contidos por apenas um controlador, como o vazamento em um *manifold* de uma Estação de Coleta ou em um duto que conduz fluido produzido por poços distintos. Neste caso, ao identificar, por exemplo, que a origem do problema é de fato um duto ou *manifold*, uma ação seria fechar as válvulas relacionadas e interromper a produção dos poços a ele relacionados, de forma a evitar vazamentos ou outros problemas relacionados. Mas, para que isto ocorra de forma eficiente, é necessário que haja sincronização das informações relevantes entre os sistemas envolvidos (neste caso, os poços e as estações de coleta), para que se obtenha um diagnóstico preciso da falha e seja proposta uma ação eficiente e rápida.

As seções a seguir apresentam uma contextualização para a utilização dos Sistemas de Produção de Petróleo como estudo de caso, a definição do escopo dos experimentos, a definição das interfaces entre as células, a estrutura laboratorial e do ambiente utilizado e os experimentos realizados.

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Assim como grande parte dos SIAs, os sistemas de produção de petróleo automatizados atuais em geral possuem sua estratégia de decisão e controle predominantemente remota e assíncrona. Ou seja, havendo a necessidade de uma decisão e ação no processo, sobre um determinado cenário operacional, as informações são analisadas em nível remoto por um especialista do processo (através de uma interface remota, como um Sistema de Supervisão e Controle), que analisa os dados obtidos e os transforma em conhecimento, identificando diagnósticos e ações a serem realizadas. Além disso, tais sistemas apresentam restrições de tempo de resposta, disponibilidade e confiabilidade, já que, em geral, apenas as ações de controle mais elementares são realizadas remotamente.

Grande parte dos problemas observados nos SIAs é decorrente principalmente de um tempo de resposta inadequado frente a uma situação de instabilidade no sistema, quando ações corretivas são adotadas após um período de instabilidade suficiente para gerar perda de produção causada, por exemplo, por problemas de equipamentos ou perda de material. Conseqüentemente, são gerados problemas de disponibilidade e de continuidade, já que o sistema demonstrou não dispor de tratamento eficaz para prevenir ou ainda conter o problema em tempo hábil. Os campos de produção de petróleo se enquadram neste contexto.

A administração eficaz de um campo de produção de petróleo é uma das principais preocupações na indústria petrolífera e a obtenção de bons resultados exige que os objetivos a serem alcançados sejam bem definidos, tanto em curto quanto em longo prazo. No entanto, aprimorar uma estratégia de produção implica, em alguns casos, na utilização de procedimentos não-triviais, como sistemas especialistas, por conta do grande número de variáveis envolvidas e das muitas interdependências entre elas, principalmente, quando são considerados os modelos complexos inerentes a este tipo de produção e quando está envolvido um grande número de poços (NAKAJIMA, 2003).

Campos de petróleo são caracterizados por um comportamento intrinsecamente complexo, não-linear e variante no tempo. Fluidos – como água, vapor ou gases – são injetados em muitos reservatórios para recuperar mais óleo. Embora um campo de petróleo seja um sistema complexo e altamente acoplado, fluidos de injeção e poços produtores são geralmente controlados individualmente, por unidades específicas, com *setpoints* constantes e sem comunicação entre os vizinhos (NIKRAVESH, KOVSCEK & PATZEK, 1996).

4.2 DEFINIÇÃO DE ESCOPO – ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso, considera-se que os poços se encontram em condições estáveis de operação, ou seja, sem variações na estrutura do poço ou nas propriedades do fluido produzido, tais como as relações: razão gás-óleo* (RGO), razão água-óleo* (RAO) e percentual de água e sedimentos (*Basic Sediments and Water** – BSW).

Adicionalmente, não são consideradas limitações relacionadas ao escoamento de Gás Natural (GN) e água, às etapas de transferência e armazenamento de óleo e aos respectivos equipamentos relacionados (Figura 30).

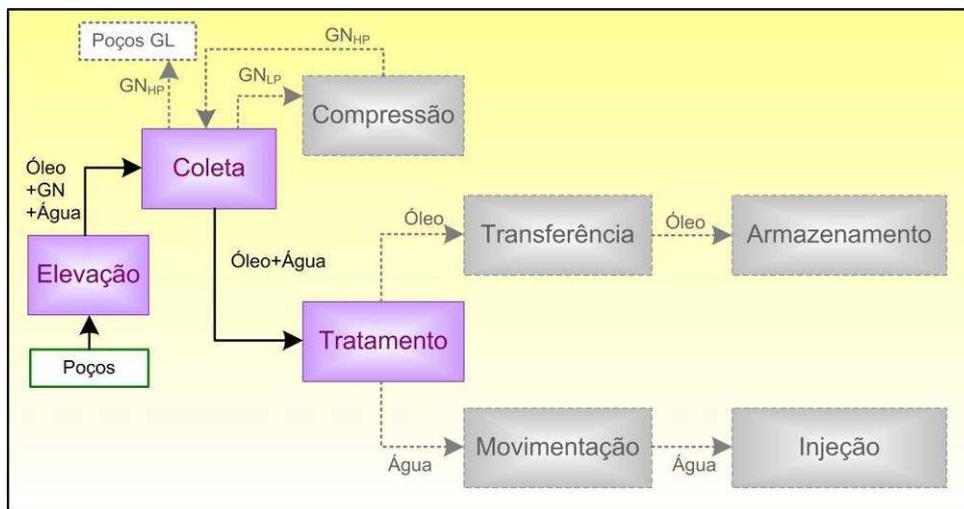


Figura 30 – Etapas analisadas da produção

Consequentemente, não são consideradas restrições nos limites operacionais de *manifold* de saída de *Gás-Lift* (GL), bombas alternativas para movimentação de água e tanques de armazenamento de água, nem limitações relacionadas à etapa de armazenamento e distribuição, nos sistemas à jusante do armazenamento do campo.

De forma simplificada, o estudo de caso considera as etapas relacionadas especificamente à produção de óleo, desde a etapa de elevação até a etapa de tratamento (Figura 31).

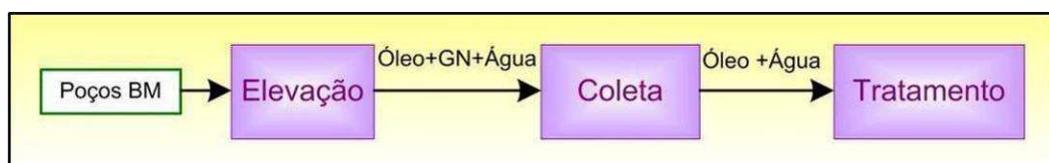


Figura 31 – Escopo do estudo de caso

4.3 DEFINIÇÃO DAS INTERFACES ENTRE CÉLULAS

Exemplo de células relacionadas (CR) são Poços produzindo óleo a partir do mesmo reservatório. Neste caso, se a pressão de fundo de um poço não estiver devidamente controlada, esse diferencial de pressão pode fazer com que o petróleo existente na coluna de produção do outro poço retorne para o reservatório, em virtude do diferencial de pressão provocado. Em contrapartida, caso uma célula Poço tenha sua produção reduzida por restrições locais e isso provoque uma redução na média global de produção, as CRs, após serem notificadas da nova média local de produção da célula e a depender das condições estabelecidas, podem negociar entre si o aumento da produção local, visando a equilibrar a média.

Para o estudo de caso, são definidas três células: Poço, Estação de Coleta de Óleo (ECO) e Estação de Tratamento de Óleo (ETO). Em um caso geral, as células identificadas são dispostas conforme a Figura 32, onde o óleo de diferentes grupos de poços (com características e técnicas de elevação diversas) é conduzido às ECOs, e diferentes ECOs transferem óleo para uma ETO.

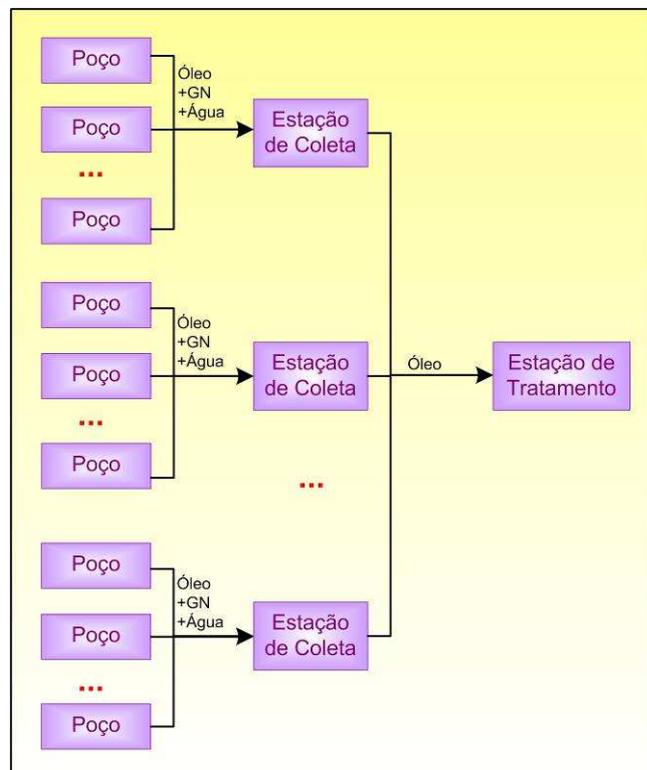


Figura 32 – Interface entre as células em um caso geral

Para o experimento, foi considerada uma estrutura simplificada. É utilizado um poço usando o Sistema de Bombeio Mecânico (SBM) como método de elevação artificial. Este poço transfere o óleo produzido para uma ECO, com a qual possui relação de cooperação. Já a ECO transfere o óleo coletado para uma ETO, com a qual também possui uma relação de cooperação. Na Figura 33 são exibidas as interdependências entre as células selecionadas, onde uma seta entre elas indica que há uma relação direta.

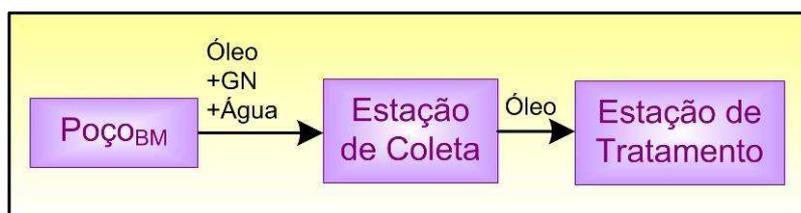


Figura 33 – Interface entre as células do estudo de caso

Independente da origem do problema, este deve ser identificado o mais rapidamente possível e conhecido por todas as células envolvidas, para que medidas corretivas ou preventivas sejam tomadas.

Por exemplo, quando se detecta uma despressurização no *manifold* de coleta de óleo em uma ECO, é necessário identificar se a origem é algum dos poços ou a própria ECO. No primeiro caso, é necessário identificar que poço originou a falha para que, a partir daí, ele seja tratado de forma a evitar que o problema se agrave. Depois de restabelecido, o critério de reativação dos poços é feita visando à maximização ótima da produção. Entretanto, é preciso controlar a pressão na ECO a cada poço reativado, até o restabelecimento completo, para evitar problemas decorrentes de possíveis variações bruscas de pressão. No segundo caso, é necessário analisar cada componente da ECO, para identificar se o problema está no *manifold* de entrada de óleo ou nos demais componentes da ECO.

4.4 ESTRUTURA LABORATORIAL

Para validação da proposta, foram realizados alguns experimentos para verificação da adequação e características definidas.

Os experimentos foram realizados com apoio do Laboratório de Elevação Artificial (LEA) da UFBA, onde está montado um Sistema de Bombeio Mecânico (SBM) composto basicamente por uma Unidade de Bombeio (UB) e um tanque de armazenamento de óleo. A implementação dos experimentos foi realizada no contexto do trabalho de Araújo

(2011), aproveitando a infraestrutura, desenvolvimento e resultados da instanciação nos campos de produção de petróleo.

Constituído de três poços, para simulação de diferentes métodos de elevação artificial, o LEA está na fase intermediária de implantação, sendo que o SBM se encontra operacional e disponível à comunidade. Na Figura 34 são apresentados os três tubos de revestimentos, na cor alumínio, e um tubo âncora, em laranja, por onde passam utilidades, tais como energia e ar comprimido.



Figura 34 – Colunas de produção do Sistema de Bombeio Mecânico do LEA

Toda a montagem do SBM foi realizada com equipamentos e dispositivos industriais, cujas dimensões são todas reais, excetuando-se a profundidade do poço, que no caso do LEA é de 32 metros (Figura 35). Desta forma, este SBM reproduz a maioria das condições operacionais encontradas nos poços rasos de petróleo. A única variável que caracteriza o modelo reduzido é a profundidade do poço, sendo esta dependente de condições simuladas (BARRETO FILHO *et al.*, 2008).



Figura 35 – Fundo do poço do Sistema de Bombeio Mecânico do LEA

Esta planta conta também com instrumentação para medição e controle das variáveis importantes ao processo, a exemplo dos sensores de carga e posição (Figura 36). O controle é exercido por um CLP Compact Logix da Rockwell Automation, capaz de executar as operações e lógicas exigidas, e um sistema para supervisão, coleta e registro dos dados, o RsView da Rockwell Automation (BARRETO FILHO *et al.*, 2008).



Figura 36 – UB equipada com sensores de posição e carga na haste polida

Por razões referentes à metodologia do trabalho, durante a idealização do laboratório e no projeto conceitual, a área de campo foi separada em algumas partes (Figura 37) (BARRETO FILHO *et al.*, 2008):

a) Poço

O poço está dividido em duas partes: superfície e subsuperfície. Entre os equipamentos e componentes de superfície destaca-se a UB, cuja função é transformar o movimento rotatório do motor em movimento alternativo na viga oscilante (*walking beam*), necessário para operar a bomba do poço (BARRETO FILHO *et al.*, 2008).

O conjunto produtor (*wellhead*) é composto de cabeça de produção e árvore de natal, sendo responsável pelo recebimento da produção na superfície, *stuffing box* (elemento de vedação na haste polida) e o “T” de bombeio que direciona o fluido produzido para a linha, conduzindo-o para a armazenagem. Normalmente, o anular é conectado com a linha (*flowline*), através do respiro do anular (*casing vent*), passando por uma válvula de retenção (BARRETO FILHO *et al.*, 2008).

O fluido usado no SBM-LEA tem suas características próprias, sendo a viscosidade a mais relevante. Apesar de ser possível a troca de fluidos por movimentação no sistema de tancagem, muitos ensaios são realizados ajustando a viscosidade por meio do controle da temperatura (BARRETO FILHO *et al.*, 2008). Entretanto, estas características não são abordadas no experimento, sendo consideradas apenas as variáveis: nível dinâmico do poço e quantidade de Ciclos Por Minuto (CPM) da UB.

b) Tanque de Armazenagem

O tanque de armazenamento é disposto na seção pós-produção, para onde é encaminhado o fluido produzido pelos poços. A linha de produção (*flowline*) começa a partir do “T” de bombeio e segue até o tanque de estocagem, com capacidade total de 2 m³. A linha que sai do respiro do anular (*casing vent*) se conecta com a de produção contém uma válvula de retenção (*check valve*). As linhas de retorno foram projetadas para manter o processo cíclico, com uma linha para o retorno da água e outra para o retorno do óleo, que se conectam aos equipamentos que fazem parte do sistema de simulação do reservatório (BARRETO FILHO *et al.*, 2008).

Os tanques de armazenamento funcionam também como separadores. A fase gasosa (no caso, ar) é direcionada para a atmosfera por um sistema de respiro (BARRETO FILHO *et al.*, 2008). O tanque foi equipado com um medidor ultrassônico de nível.

De forma a simular um ambiente real de produção, o tanque de armazenamento representará uma Estação de Coleta de Óleo (ECO).

c) Retorno

A linha de retorno é um mecanismo que torna o processo fechado. Ou seja, o fluido que é retirado do reservatório é recirculado para o fundo do poço.

d) Reservatório

O reservatório foi simulado através de equipamentos mecânicos que tornam possível fornecer ao fluido a ser produzido características semelhantes às encontradas em um campo de produção, possibilitando fazê-las variar conforme as necessidades dos testes a serem realizados.

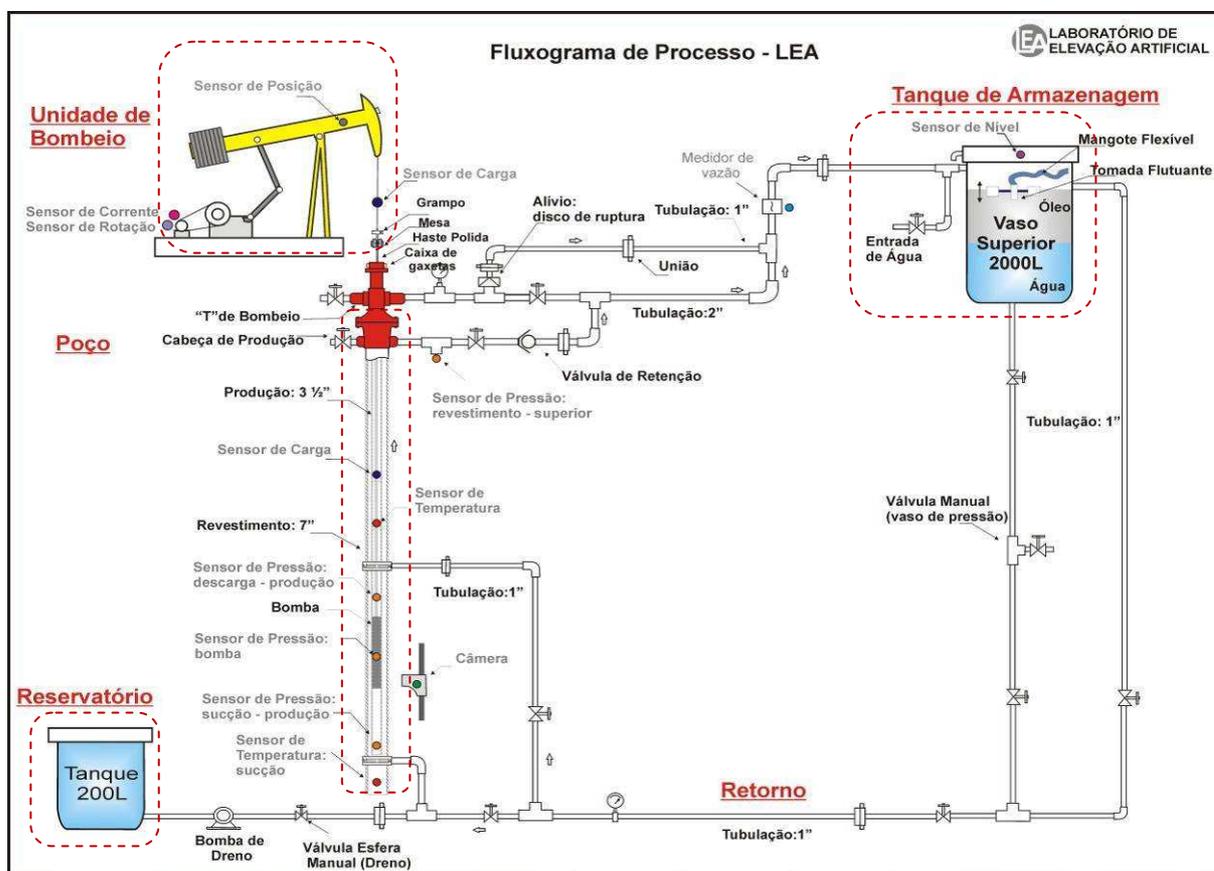


Figura 37 – Fluxograma simplificado dos Processos

O SBM–LEA funciona basicamente da seguinte forma: na superfície do poço (que fica localizado no terraço da Escola Politécnica) está a Unidade de Bombeio. Essa Unidade provê um movimento alternativo que é conduzido, através de um conjunto de hastes, à bomba de fundo (localizada no andar térreo). Esse movimento alternativo faz com que a bomba de fundo bombeie óleo do reservatório para a cabeça de produção. A partir daí, o óleo é conduzido para um tanque de armazenamento. Do tanque de armazenamento, o óleo é recirculado para o fundo do poço por uma linha de retorno, e o processo permanece funcionando de forma continuada.

O sistema de controle do SBM–LEA permite inserir perturbações inerentes à elevação artificial e possibilita a simulação de interferências indesejáveis ao processo. Na Figura 38 são listadas as variáveis manipuladas, os parâmetros físicos da instalação, as variáveis controladas e as possíveis perturbações para utilização em experimentos, disponíveis em tempo real. Estas variáveis e parâmetros possibilitam diversas configurações, permitindo a validação de modelos matemáticos complexos (BARRETO FILHO *et al.*, 2008).

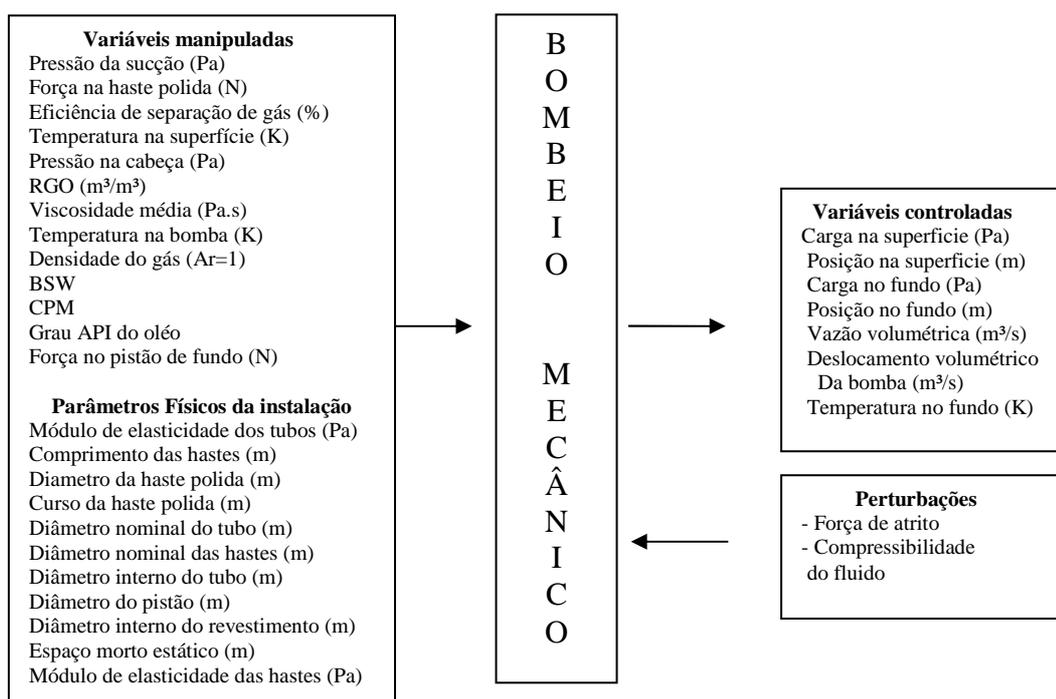


Figura 38 – Diagrama de Controle (adaptado de BARRETO FILHO *et al.*, 2008)

O CLP está equipado com placas de entradas e saídas digitais e analógicas permitindo a leitura dos dados medidos, por meio de sensores, transdutores e transmissores eletrônicos. O controlador possui cartões analógicos de alta resolução permitindo leituras precisa das variáveis de processo (BARRETO FILHO *et al.*, 2008).

O SBM-LEA dispõe de um variador de frequência (também conhecido como inversor de frequência) que permite o controle de velocidade da UB. Também dispõe transmissores de temperatura, pressão, vazão, carga, posição e ângulo, possibilitando manipular e controlar todo o processo. O controlador permite configurações de supervisão por malhas abertas e controle por malhas fechadas, visando a atender modelos de controles mais exigentes do ponto de vista matemático (BARRETO FILHO *et al.*, 2008).

Alguns parâmetros como densidade, diâmetro de tubos e hastes, grau do óleo, dentre outros são informados pelo operador. Pressão na sucção, velocidade e temperatura na superfície e na bomba são variáveis medidas do processo. A vazão é medida por um medidor mássico. Quanto às perturbações, a força de atrito é medida indiretamente pela diferença calculada entre o peso da superfície e o do fundo, enquanto a compressibilidade pode ser informada também pela IHC criada no SSC. O SBM-LEA foi projetado de forma a ser flexível, na inserção de novas variáveis, parâmetros ou perturbações, em atendimento às demandas específicas dos experimentos (BARRETO FILHO *et al.*, 2008).

Para mais detalhes sobre a parte mecânica e demais peculiaridades do SBM-LEA, vide Barreto Filho *et al.* (2008).

4.5 PREPARAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

A infra-estrutura de hardware e software utilizada para a realização do experimento foi composta por:

- Notebooks com Sistema Operacional Microsoft Windows XP, processador Intel Core 2 Duo 1,8 GHz, 512 MB de memória RAM, 256 MB de espaço para armazenamento em disco, conexão wi-fi;
- SBM-LEA;
- 2 CLP Compact Logix e 1 CLP SLC 500, ambos da Rockwell Automation;
- Roteador wireless 802.11g, para conexão entre os notebooks;
- Rede devicenet e ethernet.

Para a realização dos experimentos e validação dos principais itens propostos no GCAD, o SBM-LEA foi distribuído em três células Autônomas: Poço, ECO (representada pelo Tanque de armazenagem) e ETO, visando a representar as etapas de elevação, coleta e tratamento de um campo de produção.

É importante ressaltar que as células foram simplificadas para o experimento, bem como os procedimentos e as variáveis envolvidas em diagnósticos e ações, já que o objetivo é validar o modelo proposto e seus principais módulos e não as práticas de controle e supervisão de um campo de produção.

a) Célula “Poço”

Representa o poço de produção de petróleo propriamente dito, onde se encontram os equipamentos de superfície (Unidade de Bombeio e seus componentes) e de subsuperfície.

O Módulo Reativo da célula Poço foi representado por um CLP modelo Compact Logix da Rockwell Automation e as variáveis utilizadas no experimento foram: altura do nível dinâmico e velocidade de bombeio da UB (Tabela 5).

Tabela 5 – Variáveis consideradas na célula “Poço”

Variáveis	MIN _{CTR}	MAX _{CTR}
Altura do nível dinâmico	0,5 m	0,8 m
Velocidade do bombeio	5 cpm	10 cpm

b) Célula “Estação de Coleta”

A estação de coleta (ECO) simulada no experimento é composta de um tanque de armazenamento (oriundo do SBM–LEA) e de três bombas de transferência (Figura 39). A representação geral de uma ECO em ambiente real de produção é descrita no Apêndice B – Sistemas de Produção de Petróleo.

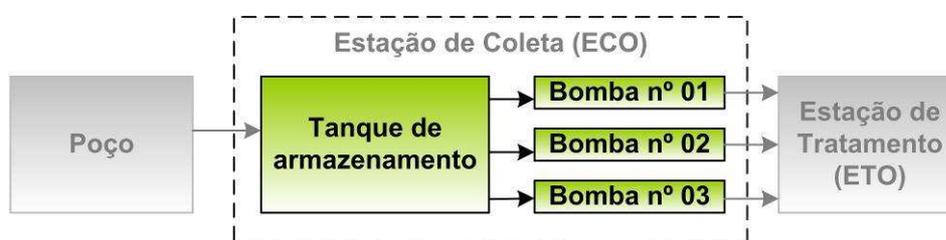


Figura 39 – Diagrama de Blocos da Estação de Coleta e interações com outras células

Devido à impossibilidade de instalar bombas de transferência na ECO para sistemas de distribuição à jusante, já que o SBM–LEA foi projetado para manter o óleo

recirculando, estas foram simuladas através de um programa escrito em LADDER e embarcado no Módulo Reativo³.

O Módulo Reativo da célula ECO foi representado por um CLP modelo SLC 500 da Rockwell Automation e as variáveis utilizadas no experimento foram: nível de fluido no tanque de armazenamento e estado (ligado ou desligado) de três bombas de transferência (Tabela 6).

Tabela 6 – Variáveis consideradas na célula “ECO”

Variáveis	MIN _{CTR}	MAX _{CTR}
Altura do nível do tanque de armazenamento	0,5 m	1,0 m
Estado da bomba de transferência nº 01	-	-
Estado da bomba de transferência nº 02	-	-
Estado da bomba de transferência nº 03	-	-

Quanto ao nível de fluido no tanque da célula ECO, como no SBM-LEA o óleo circula de maneira cíclica para o reservatório, foi necessário utilizar um valor virtual. Embora sua alimentação utilize a variação de nível medida no tanque, considera-se apenas a variação positiva. Ou seja, o nível virtual não irá decrescer quando a recirculação do sistema for ativada, mas somente através do acionamento das bombas de transferência. Este nível virtual foi implementado em LADDER no próprio CLP responsável pela leitura do sensor de nível. Pela mesma razão, as bombas de transferências da ECO e o nível de fluido nos tanques da ETO foram simuladas em LADDER, conforme descrito em Araújo (2011).

c) Célula “Estação de Tratamento”

Para uma Estação de Tratamento de Óleo (ETO), em geral se consideram os seguintes elementos principais: tanque de óleo não tratado, tratadores de óleo, tanques de óleo tratado e bombas alternativas para transferência do óleo. A representação geral de uma ETO em ambiente real de produção é descrita no Apêndice B – Sistemas de Produção de Petróleo.

Como o SBM-LEA não contempla a etapa de tratamento de óleo, já que a linha de retorno foi projetada para manter o processo cíclico, a ETO necessária ao experimento foi simulada utilizando programação em LADDER e embarcada no Módulo Reativo.

³ Embora as bombas de transferência sejam alternativas, de forma a simplificar o experimento, foram simuladas bombas de vazão contínua.

A ETO simulada no experimento é composta de um tanque de armazenamento (oriundo do SBM–LEA) e de três bombas de transferência (Figura 40).

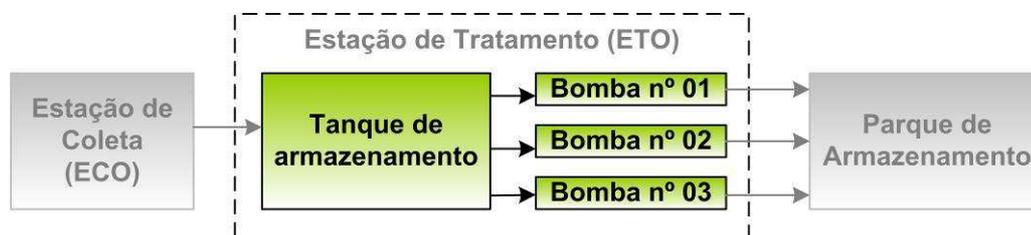


Figura 40 – Diagrama de Blocos da Estação de Tratamento e interações com outras células

Para o experimento, o Módulo Reativo da célula ETO foi representado por um CLP modelo Compact Logix da Rockwell Automation e as variáveis consideradas foram: nível do tanque de óleo e estado (ligado ou desligado) de três bombas de transferência para sistemas à jusante (Tabela 7).

Tabela 7 – Variáveis consideradas na célula “ETO”

Variáveis	MIN _{CTR}	MAX _{CTR}
Altura do nível do tanque de armazenamento	0,5 m	1,0 m
Estado da bomba de transferência nº 01	-	-
Estado da bomba de transferência nº 02	-	-
Estado da bomba de transferência nº 03	-	-

Com base no modelo proposto (Capítulo 3), o experimento foi estruturado em camadas independentes, porém integráveis (Figura 41). O MC foi embarcado em computadores móveis externos ao MR, um para cada célula. O CLP da célula Poço foi interligado ao CLP da ETO por meio de uma rede DeviceNet, da Rockwell Automation. Os demais foram ligados diretamente ao roteador usando o protocolo Ethernet/IP.

O MGR não foi implementado no escopo deste experimento. Assim, alguns softwares auxiliares foram utilizados para visualização remota de eventos, a exemplo do RsView, da Rockwell Automation, utilizado para a construção de um SSC.

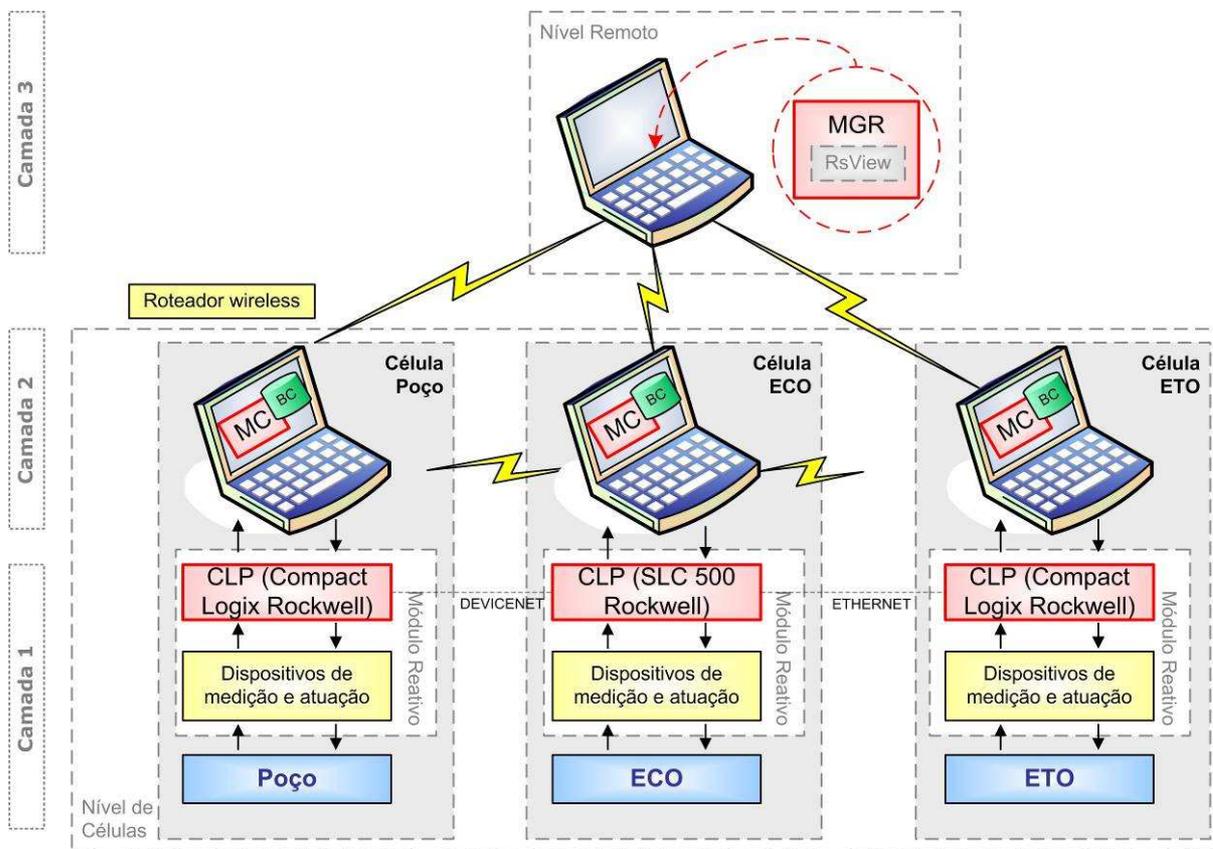


Figura 41 – Arquitetura montada para o experimento

O protótipo do GCAD foi construído utilizando a plataforma de software JADE, que provê toda a infraestrutura para explorar o paradigma de agentes na construção de aplicações distribuídas. O principal objetivo da plataforma JADE é prover uma infraestrutura independente para o gerenciamento do ciclo de vida dos agentes, e a comunicação entre eles. Por isso sua implementação foi feita sobre a linguagem Java, que é uma das linguagens de programação OO mais utilizadas, por oferecer uma arquitetura de execução independente de plataforma. Os módulos definidos no GCAD foram implementados através de agentes JADE (ver ARAUJO, 2011).

Para o MC, o MAL foi implementado utilizando um mecanismo de inferência, baseado na linguagem Prolog, que integra na BC as regras escritas por especialistas e os dados coletados dos dispositivos de controle na BC. O mecanismo de inferência é descrito em Araújo (2011).

A BC das células também foi construída em Araújo (2011) utilizando a linguagem Prolog e permitem:

- Alimentar a base de regras com os fatos existentes na fila de tarefas do MAL;
- Identificar diagnósticos sobre as condições operacionais analisadas;

- Propor ações de ajustes para corrigir condições de falhas (identificadas através da variação de variáveis decisórias para além dos limites operacionais estabelecidos).

Informações adicionais relativas à implementação do GCAD em ambiente experimental podem ser obtidas em Araújo (2011).

4.6 CASOS DE TESTE E RESULTADOS OBTIDOS

Os experimentos a seguir descritos visam a demonstrar as principais funcionalidades propostas bem como os principais requisitos, tais como capacidade de uma célula solucionar falhas locais de forma autônoma e capacidade de solucionar uma falha de uma célula em cooperação com CR, através da negociação de ajustes que envolvam impacto global no sistema.

As ações de controle, utilizadas nos experimentos, foram simplificadas para demonstrar as potencialidades do GCAD. Por exemplo, em um ambiente de produção real, acionamento de uma bomba pode ser mais complexo que o apresentado, pois envolve verificação de alinhamento, segurança, etc. Em alguns casos, pode inclusive requerer a presença do operador da área. Assim, em um ambiente real, sistemas relacionados à segurança da operação, modelos fenomenológicos existentes, controle preditivo, dentre outros, precisarão estar conectados ao Módulo Cognitivo de forma que as ações sejam realizadas de forma integrada.

Observa-se ainda, em alguns casos, que as ações de controle foram excessivas durante a atuação, fazendo com que as variáveis oscilassem frequentemente entre os limites mínimos e máximos de controle ou de operação. Estas ações excessivas foram provocadas com o objetivo de forçar instabilidade nas variáveis monitoradas para então observar e avaliar o comportamento do Módulo Cognitivo.

4.6.1 Experimento 01

O experimento 01 visa a demonstrar a capacidade de interação entre as células Poço e ECO, visando a solucionar uma falha identificada na célula Poço e com impacto na célula ECO, a exemplo do aumento do nível dinâmico do Poço para acima do limite de controle (MAX_{CTR}).

A solução considerada no experimento consiste em aumentar gradualmente a velocidade de bombeio da UB, de forma a aumentar a produção e restabelecer o nível do anular de produção para limites esperados (maior que MIN_{CTR} e menor que MAX_{CTR}).

Na Figura 42 é representada a dinâmica do processo durante o diagnóstico “nível dinâmico alto”, descrevendo:

- Para a célula Poço: a dinâmica de evolução da velocidade de bombeio da UB e do nível dinâmico do anular (representados pela linha azul);
- Para a célula ECO: a dinâmica de evolução do nível de fluido no tanque de armazenamento (representado pela linha azul) e a variação de estado das bombas que transferem fluido para a ETO.

Para ambas as células, a linha verde representa o limite de controle máximo (MAX_{CTR}) das variáveis analisadas, e a linha vermelha representa o limite de controle mínimo (MIN_{CTR}). Esses limites, quando ultrapassados, disparam as análises realizadas pelo Módulo Cognitivo. O comportamento das variáveis descritas na Figura 42 é comentado em dois cenários distintos, de forma integrada aos eventos apresentados na Figura 43 e na Figura 44.

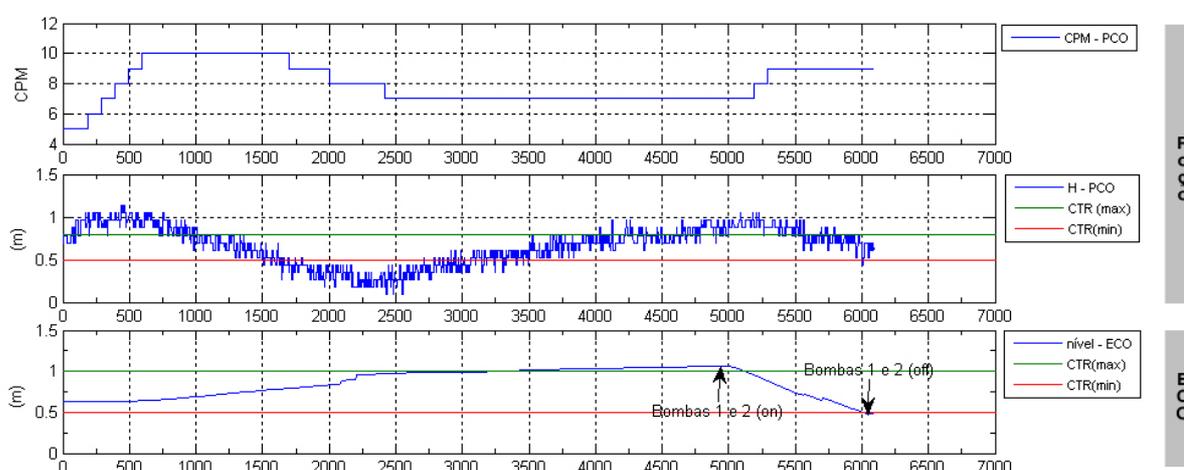


Figura 42 – Dinâmica do processo

a) Cenário 01: atuação local com impacto global e negociação autorizada

Na Figura 43 é ilustrada a sequência de ações realizadas pelos submódulos do MC para estabilizar o Poço e as respectivas mensagens trafegadas entre ele e a ECO.

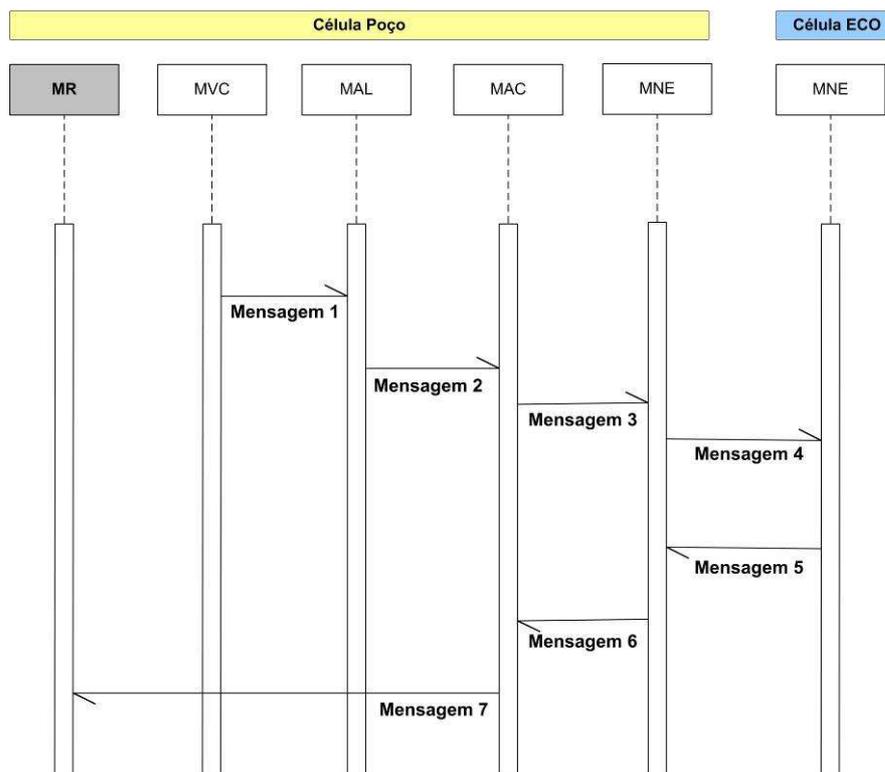


Figura 43 – Sequência de ações do MC para estabilizar nível dinâmico

Aproximadamente no instante 500 (Figura 42), na célula Poço, observou-se um aumento no nível dinâmico (H) do Poço para acima de MAX_{CTR} , sendo acionado o MAL (mensagem 1). Este, então, realizou uma varredura na BC para a identificação de diagnósticos ou ações corretivas. Ao identificar o diagnóstico “nível dinâmico alto”, o MAL identificou a correspondente ação “Aumentar vazão de saída do poço”, enviando-a ao MAC (mensagem 2).

Entretanto, o MAC identificou que a ação apresentava impacto na célula ECO, já que o aumento na vazão do Poço impacta o nível de tanque da ECO. Assim, o Poço iniciou uma negociação da requisição “aumentar vazão de saída do Poço” com a ECO (mensagem 4), de forma que esta avaliasse o impacto local e autorizasse ou negasse a ação.

Ao receber a requisição do Poço, a ECO analisou as variáveis impactadas pela ação proposta, identificando que seus valores se encontravam dentro do faixa de controle. Sendo assim, a ECO enviou uma mensagem de “ajuste aceito” para o Poço (mensagem 5).

Aproximadamente no instante 200 (Figura 42), após receber a aceitação do ajuste pela ECO (mensagem 6), o Poço procedeu com o ajuste no MR (mensagem 7).

Entretanto, após a ação, embora o nível dinâmico tenha reduzido, ainda permanecia alto. Sendo assim, a ação foi repetida até, aproximadamente, o instante 600 (Figura 42), quando a velocidade máxima de bombeio foi atingida (MAX_{OP}).

Do instante 600 ao 1000 (Figura 42), o diagnóstico “nível dinâmico alto” ainda permanecia. Como não havia na base de conhecimento nenhuma ação local alternativa que respondesse ao diagnóstico, uma notificação foi enviada ao MTE, para que este a propagasse às células relacionadas. O nível dinâmico do poço foi estabilizado no instante 1000.

A partir deste experimento, foi possível observar a negociação entre células diretamente relacionadas, demonstrando um processo de decisão autônoma e distribuída em rede, e os ajustes decorrentes de uma célula sendo refletidos em outra. Esta etapa de negociação foi apoiada por BC que armazenavam em cada célula as configurações locais e as relações com as demais. Tão logo o ajuste foi validado pela negociação, a atualização pelo MAC foi realizada no MR.

b) Cenário 02: atuação local com impacto global e negociação negada

Já em torno do instante 4300 (Figura 42), ao identificar que o nível dinâmico excedeu MAX_{CTR} , o MVC acionou o MAL (mensagem 1 da Figura 44), para que este iniciasse uma investigação local.

Ao identificar a ação “Aumentar velocidade de bombeio”, esta foi enviada ao MAC (mensagem 2), que identificou impacto na célula ECO. A ação foi então negociada com a ECO (mensagens 3 e 4). Entretanto, ao analisar a requisição da célula Poço, a ECO identificou que a ação impactaria a variável local “nível do tanque”, que se encontrava acima do limite de controle. Portanto, ajustes externos que possam impactar a vazão de entrada na ECO e conseqüentemente o nível do tanque não são permitidos, até que esta variável seja estabilizada. O ajuste proposto pelo Poço foi negado pela ECO (mensagem 5).

Ao obter uma resposta desfavorável ao ajuste solicitado, não havendo ações locais alternativas, o Poço propagou o diagnóstico às células relacionadas (mensagens 6, 7 e 8). Paralelamente, novas tentativas de negociação com a ECO foram realizadas.

Aproximadamente no instante 4900, duas bombas de transferência da ECO foram acionadas, fazendo com que o óleo fosse transferido para a ETO. Esta ação fez com que o nível do tanque da ECO tivesse uma redução, até que, aproximadamente no instante 5200, o nível foi restabelecido à faixa de normalidade.

Após este evento, ao obter nova requisição de aumento na velocidade de bombeio da célula Poço e conseqüente aumento no nível do tanque da ECO, o ajuste foi autorizado (mensagem 10).

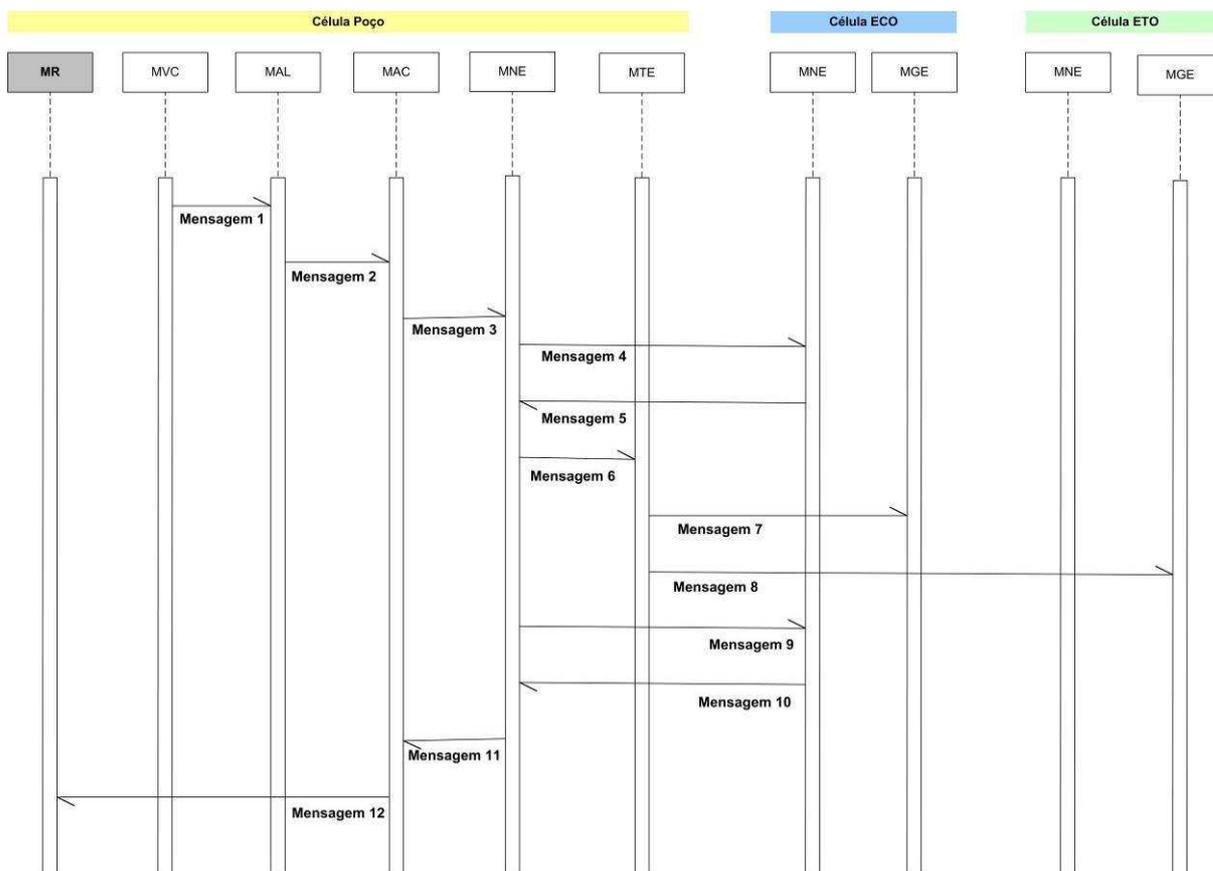


Figura 44 – Sequência de ações do MC para estabilizar nível dinâmico

Através desse experimento, é possível verificar a proposta de decisão distribuída, porém preservando a integridade e autonomia das células relacionadas e recusando ajustes que feriam restrições locais.

4.6.2 Experimento 02

O experimento 02 visa a demonstrar a proposta de decisão autônoma e distribuída em rede, bem como o comportamento das células quando uma negociação realizada apresenta restrições para a ação corretiva identificada.

Exemplos de situações a serem beneficiados pelo GCAD são: aumento nos níveis dos tanques de uma ECO para além do limite de controle máximo (MAX_{CTR}) ou a redução nos seus níveis para abaixo do limite controle de mínimo (MIN_{CTR}). Em quaisquer dos casos, a ausência de um tratamento imediato pode implicar em danos, e a solução a ser adotada deve preservar as configurações globais do sistema, a exemplo dos limites globais de produção, de forma a evitar que o sistema entre em funcionamento indesejado.

Este experimento descreve uma situação em que o nível do tanque da célula ECO se encontra acima do limite de controle (MAX_{CTR}). Neste caso, a solução considerada consiste em acionar bombas de transferência de óleo para a célula ETO, de forma a estabilizar o nível dos tanques locais. Quando esta ação não é possível ou permitida, tanto por falha na transferência da ECO para a ETO quanto por incapacidade da ETO em receber óleo de outras células, uma solução alternativa consiste na redução dos níveis de produção da célula Poço.

Na Figura 45, são descritas (representadas por linhas em azul):

- Para a célula Poço: a dinâmica de evolução da velocidade de bombeio da UB;
- Para a célula ECO: a dinâmica de evolução do nível do tanque e a variação do estado das três bombas de transferência;
- Para a célula ETO: a dinâmica de evolução do nível do tanque e a variação do estado das três bombas de transferência.

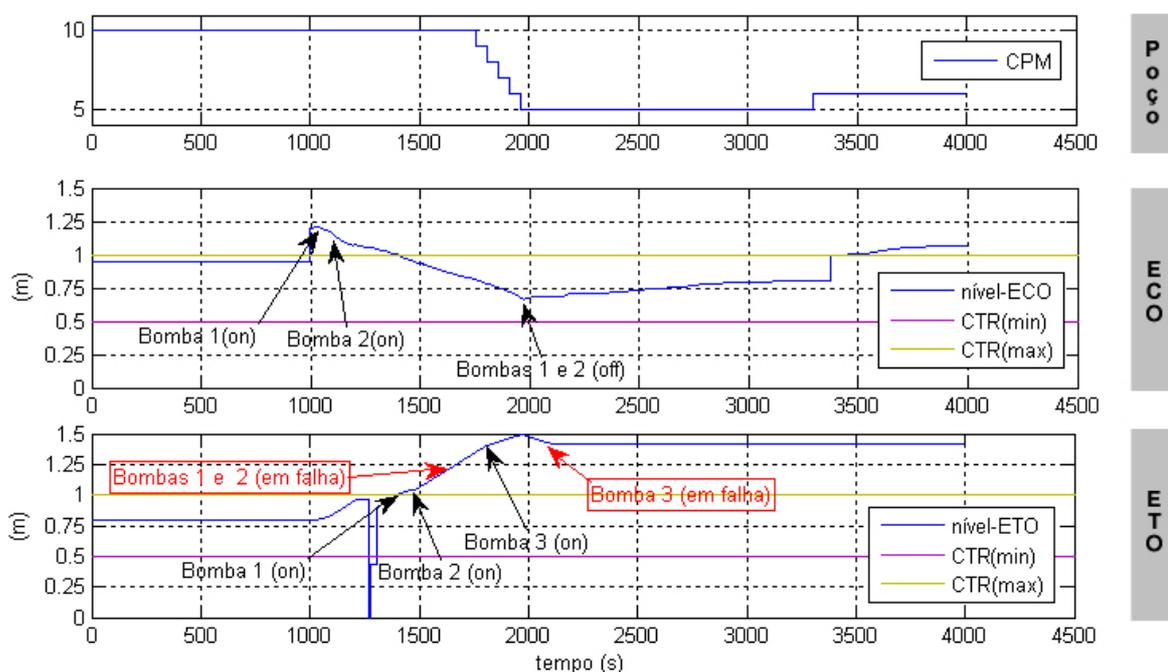


Figura 45 – Dinâmica do processo

Para as células envolvidas, a linha amarela representa o limite de controle máximo (MAX_{CTR}) das variáveis analisadas, e a linha rosa representa o limite de controle mínimo (MIN_{CTR}). Esses limites, quando ultrapassados, disparam as análises realizadas pelo Módulo Cognitivo. O comportamento das variáveis descritas na figura é comentado a seguir, de forma integrada aos eventos do MC descritos e agrupados em quatro cenários distintos.

a) Cenário 01: Atuação local sem impacto global

O objetivo deste primeiro cenário é apresentar a interação entre os submódulos do Módulo Cognitivo para tentar solucionar uma falha local de forma autônoma. O cenário envolve uma única célula: a Estação de Tratamento (ETO).

No instante 1300 (Figura 45), ao identificar que o nível dos tanques havia excedido MAX_{CTR} , o MVC enviou a ocorrência ao MAL (mensagem 1 da na Figura 46) para que fossem identificadas ações corretivas. Analisando a Base de Conhecimento local, o MAL identificou o diagnóstico “nível de tanque alto” e a ação “Ligar bomba 1”, enviada para o MAC (mensagem 2).

Ao identificar que a ação não apresentava impacto relacionado à integridade de células relacionadas, a ação foi enviada pelo MAC ao Módulo Reativo (mensagem 3), iniciando a transferência de óleo para os Parques de Armazenamento. Isto porque, para simplificar, considerou-se que não havia restrição de transferência da ETO para os sistemas de armazenamento à jusante (a não ser em caso de falha nas bombas de transferência da própria ETO).

Entretanto, como a ETO estava recebendo mais óleo do que conseguia transferir, o nível do tanque continuou a subir, e o diagnóstico “nível de tanque alto” foi detectado pelo Módulo Cognitivo em um segundo ciclo de verificação. Sendo assim, foi enviada a ação “Ligar bomba 2” e o ciclo de ajuste disposto na Figura 46 foi repetido para a outra bomba.

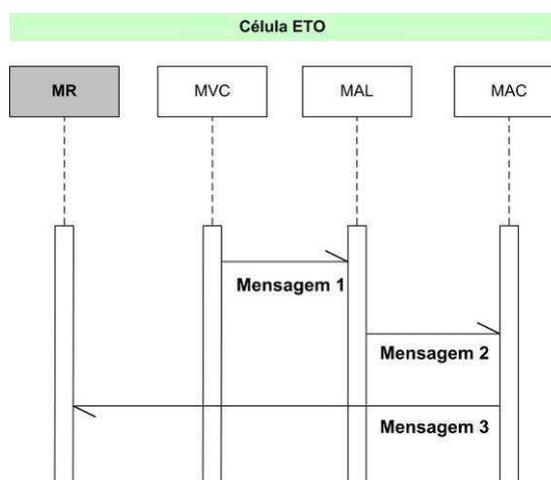


Figura 46 – Tentativa de estabilização do nível dos tanques pela ETO

b) Cenário 02: Negociação com resposta favorável

O segundo cenário é continuação do anterior, sendo que neste é analisado também o comportamento da Estação de Coleta (ECO). Até então, as bombas 1 e 2 da ETO estavam acionadas, em virtude de um diagnóstico “nível de tanque alto na ETO”.

Entretanto, aproximadamente no instante 1600, forçou-se uma falha nas bombas 1 e 2 da ETO. E como o nível do tanque permanecia acima de MAX_{CTR} , a terceira bomba foi acionada (instante 1800). Mas com as demais bombas em falha, não foi possível estabilizar o nível do tanque, já que a ECO continuava a transferir óleo para a ETO. Conseqüentemente, o nível do tanque da ETO continuou a subir até que, aproximadamente no instante 1950, atingiu seu limite máximo de operação

Como, propositalmente, não havia sido cadastrada na base de conhecimento uma ação correspondente ao diagnóstico “nível de tanque muito alto”, a ETO (através do Módulo de Tratamento de Exceção) propagou o diagnóstico (mensagem 3 da Figura 47) para as células relacionadas (neste caso, a ECO)

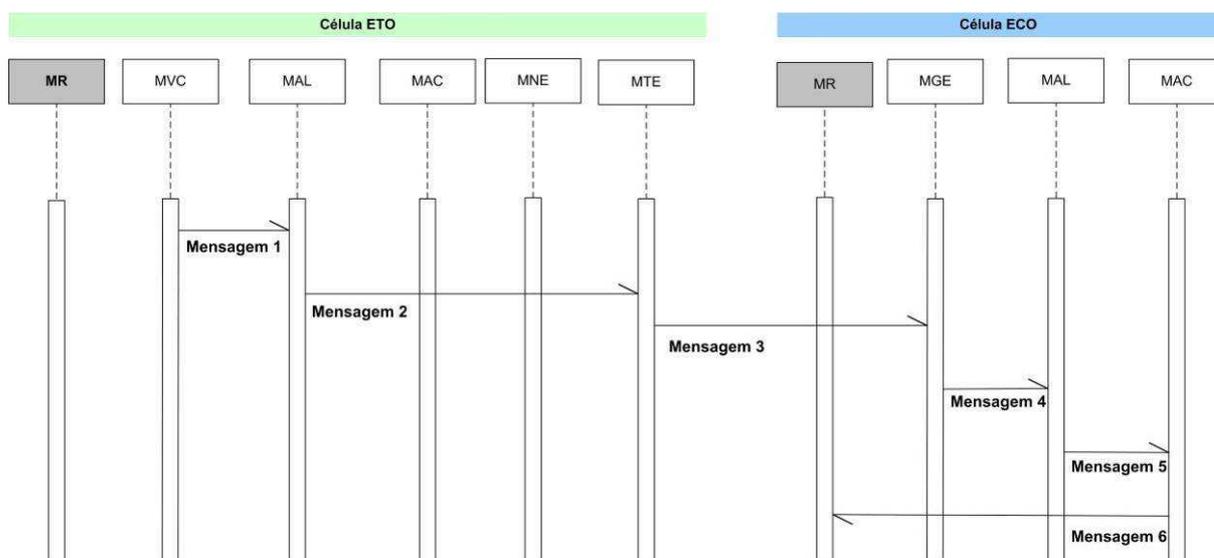


Figura 47 – Nível máximo dos tanques da ETO foi atingido

No instante de tempo 2000, ao obter o diagnóstico da ETO (através do Módulo Gerenciador de Eventos), a ECO identificou um novo diagnóstico “Interromper transferência para a ETO” e a correspondente ação “desligar bombas de transferência para a ETO” (mensagem 4). Como não havia impacto global, a ação foi enviada ao Módulo Reativo (MR). Assim, o MAL enviou as ações “desligar bomba 1” e “desligar bomba 2” para o MAC

(mensagem 5). Como a ação não apresentava impacto global, o ajuste foi submetido ao MR (mensagem 6), e a transferência de óleo para a ETO foi interrompida.

Após esta ação, o nível do tanque na ECO começou a subir, enquanto que na ETO teve uma pequena redução. Mas então foi inserida uma falha na bomba 3 da ETO, fazendo com que o nível de seu tanque estagnasse, já que as três bombas da ETO estavam em falha e a ECO havia cessado a transferência de óleo para a ETO.

c) Cenário 03: Negociação com resposta desfavorável

Em contrapartida, no terceiro cenário, como o Poço até então mantinha o envio de fluido para a ECO, o nível de tanques da ECO continuaram a aumentar para além de MAX_{CTR} , atingindo o MAX_{OP} no instante 3400 (Figura 45).

Este evento disparou uma análise local (mensagem 1 da Figura 48), sendo identificada a ação “ligar bomba 1”.

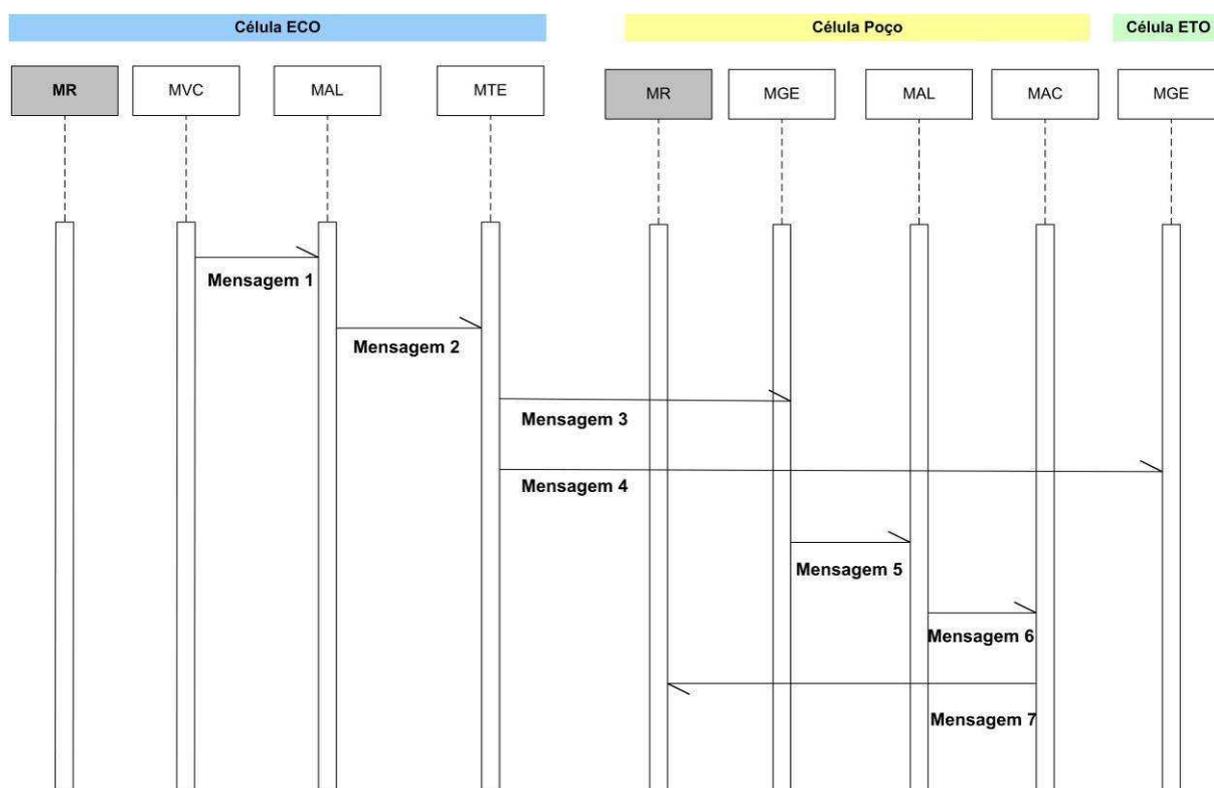


Figura 48 – Nível máximo dos tanques da ECO foi atingido

Entretanto, o Módulo de Atualização identificou impacto na ETO, sendo requerida uma negociação entre as células para a efetiva atualização local. A ETO, estando

com o nível do tanque já acima do limite, negou o ajuste. Ou seja, a integridade da célula relacionada foi preservada, evitando assim um comportamento distribuído caótico.

Como não havia uma ação alternativa disponível, já que a ETO não dispunha de capacidade adicional de armazenamento ou transferência, a ECO enviou o diagnóstico “nível máximo atingido” para as células relacionadas, neste caso, o Poço (mensagem 3) e a ETO (mensagem 4).

Ao obter o diagnóstico da ECO, as análises locais do Poço apontaram para a ação “Reduzir CPM”, a qual foi enviada ao MAC e executada (neste caso, até o limite mínimo de operação da velocidade de bombeio da UB) de modo a reduzir o fluxo de óleo (instante 2900 da Figura 49).

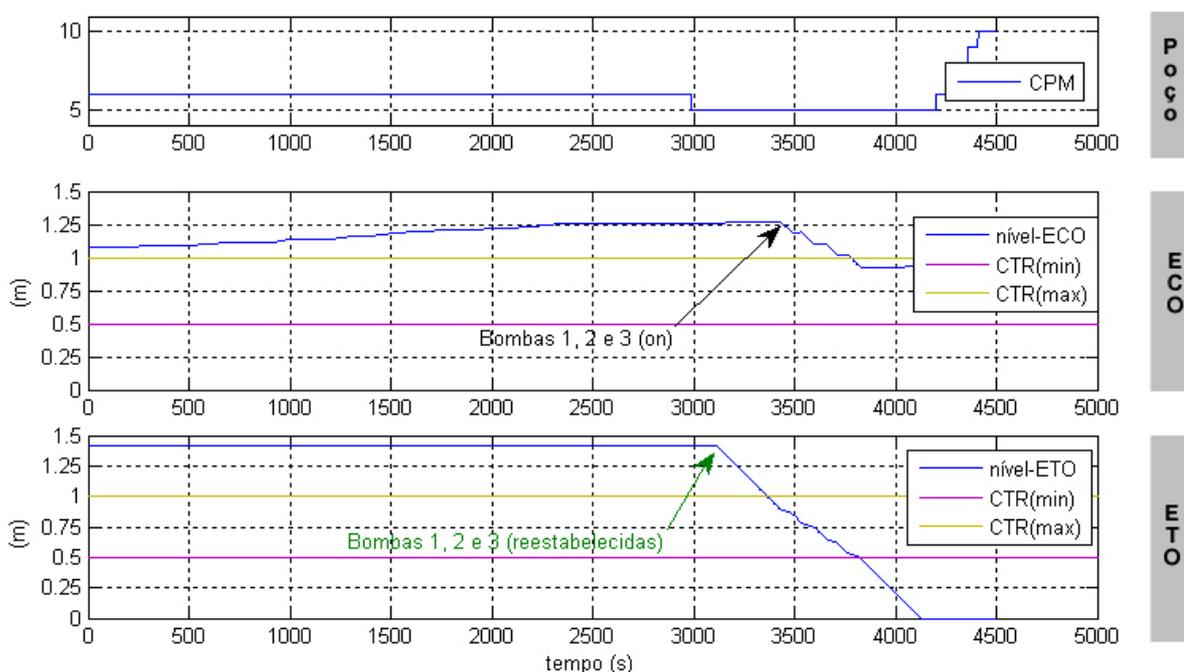


Figura 49 – Comportamento após o restabelecimento das bombas de transferência

d) Cenário 04: Negociação com resposta favorável após manutenção

No instante 3200 da Figura 49, as bombas da ETO que estavam em falha foram restabelecidas. Assim, o nível dos tanques da ETO começou a retornar à normalidade (nível de tanque abaixo de MAX_{CTR}). Nesse ínterim (antes da estabilização da ETO), as tentativas de negociação originadas pela ECO estavam sendo negadas. Depois da estabilização, após novas tentativas de aumento na transferência de fluido para a ETO, a ECO obteve êxito na requisição, sendo acionadas as bombas de transferência da ECO e estabilizando também os níveis de seus tanques.

A partir deste experimento, observa-se o comportamento cooperativo entre células relacionadas, uma vez que as células Poço e ECO ajustaram sua operação local para evitar o agravamento dos problemas enfrentados pela ETO. A capacidade de comunicação em nível de conhecimento, representada pela propagação dos diagnósticos, minimizou a necessidade de troca de outros dados por parte das células.

Adicionalmente, logo após a estabilização do nível dos tanques da ETO, as células relacionadas automaticamente tiveram suas condições operacionais reajustadas. Em um modelo convencional, após a intervenção para a troca das bombas, os operadores precisariam restaurar a capacidade de produção do Poço, reajustando a velocidade de bombeio da UB.

4.6.3 Considerações acerca dos experimentos

Fazendo uma avaliação geral sobre o GCAD após os experimentos, observa-se que o Módulo Cognitivo (MC) das células reagiu a eventos de falha local, atuando de forma autônoma e cooperativa:

- Autônoma, quando as ações não apresentavam impacto global;
- Cooperativa, quando impactos globais foram identificados, evitando assim a configuração de um cenário caótico.

A atuação ocorreu com um tempo de resposta que evitou a interrupção desnecessária do funcionamento local, demonstrando a robustez do MC, em ambiente experimental e para as condições estabelecidas.

Houve uma menor dependência da supervisão e controle através de IHC, já que as verificações e ajustes ocorreram em nível local, de forma automática e sem interferência humana, a não ser para a manutenção das bombas de transferência.

Os experimentos descritos visaram a sintetizar a proposta do GCAD, ilustrando a interação entre os módulos locais durante:

- Atividades locais de monitoração (através do MVC), análise corretiva (através do bloco corretivo do MAL) e ajuste (através do MAC);
- Interações com células relacionadas (através dos MNE das células impactadas) para negociação de ajustes locais que apresentam impacto global;
- Interações com células relacionadas (através do MTE local e do MGE das CRs) em caso de falhas não tratadas localmente, seja em virtude de uma

negociação negada ou por insuficiência local em identificar ou proceder com ações corretivas;

- Sincronização periódica de dados de uma célula com as células relacionadas, através do MSI. Embora este módulo não tenha sido explicitado nos experimentos, para evitar a incidência de eventos repetitivos nos diagramas de sequência (o que poderia causar uma quebra de fluidez no entendimento dos diagramas), é através dele que as interfaces entre as células são atualizadas.

Com relação ao MAL, apenas as funções corretivas foram implementadas e embarcadas em um dispositivo de hardware externo e acoplado aos CLPs. Os blocos preventivo e gerador de ações, que envolvem estudo e aprofundamento na utilização de técnicas de IA para inferência de novas regras de conhecimento, são propostos para implementação em trabalhos subsequentes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho permitiu um estudo multidisciplinar – discutindo aspectos relacionados a diferentes temas, como sistemas supervisão e controle, tratamento de falhas, sistemas distribuídos, sistemas de produção de petróleo, sistemas multiagentes, sistemas complexos e adaptativos, dentre outros – e visa a trazer contribuições para o ambiente industrial e acadêmico, dada a aplicabilidade prática da solução.

5.1 CONTRIBUIÇÕES DA PROPOSTA

O GCAD trata algumas necessidades apresentadas pelos SIAs, através de uma proposta de controle inteligente em nível local e remoto, definindo estruturas modulares, integráveis entre si e implementadas na forma de agentes, a exemplo dos principais submódulos que compõem o MC.

A solução proposta tende a beneficiar empresas produtoras de petróleo, já que trata de forma mais eficaz alguns problemas de operação frequentes e que são muitas vezes tratados tardiamente, quando prejuízos financeiros e ambientais já ocorreram. Observa-se ainda que a proposta, devido ao seu caráter generalista, não se limita ao objeto de estudo analisado, podendo ser estendida e adaptada para outros campos de controle e gerenciamento, e podendo ser melhorada e ajustada no decorrer de sua utilização prática, seja em ambiente experimental ou em ambiente de produção.

A divisão do modelo em camadas permite que um SIA seja analisado e manipulado em diferentes níveis de abstração, o que é flexibilizado pela distribuição do controle em uma camada remota (MGR) e duas camadas locais (MR e MC), com mecanismos de redundância e manutenção da disponibilidade, em caso de falhas.

A distribuição do controle em camadas distintas e com interfaces bem definidas facilita sua manutenção corretiva. Através da configuração do modo de funcionamento local para diferentes cenários (operação manual, operação autônoma, operação remota, manutenção, configuração, dentre outros), ajustes no MC podem ser realizados sem necessariamente requerer a interrupção das atividades da célula, bem como as alterações do modo de funcionamento de uma célula são conhecidas com rapidez por CRs. Ajustes no

MGR, em geral, devem ser inócuos ao funcionamento das células, graças à predominância de decisões sobre atuações em nível local.

Espera-se, com a aplicação do GCAD, melhorar o estado da arte em controle de SIAs, em especial, sistemas com células distribuídas e com restrições críticas de tempo de resposta entre elas. Para isso, é proposta uma estratégia de controle que visa tratar de forma eficiente os aspectos de continuidade e tempo de resposta, dentre outros inerentes a esses sistemas.

O GCAD facilita manutenções evolutivas do MC e do MGR mantendo a continuidade operacional, já que, de acordo com a estrutura definida, a célula pode ser configurada para o Modo de Operação Manual e ter sua atividade mantida em funcionamento. Adicionalmente, a estrutura de módulos definida para o MC e para o MGR apresentam funcionalidades específicas e interfaces bem definidas. Sendo assim, cada submódulo pode ser ajustado posteriormente e de forma independente, quanto às estratégias e técnicas utilizadas, com impacto mínimo no funcionamento dos demais.

Um importante resultado alcançado foi a validação dos itens principais da proposta em um campo de experimento para produção de petróleo, no qual o GCAD se mostrou eficaz.

A partir dos experimentos realizados, observou-se que o MC reagiu a eventos de falha local, atuando de forma autônoma na solução de falhas cujas ações não apresentavam impacto global. Já em situações onde impactos globais foram identificados, as falhas foram corrigidas em cooperação com células relacionadas, sem perder de vista os objetivos globais do SIA, para evitar a configuração de um cenário caótico. Dessa forma, requisitos como confiabilidade, disponibilidade, continuidade e integridade de funcionamento puderam ser atendidos. Adicionalmente, a atuação ocorreu com um tempo de resposta que evitou a interrupção de funcionamento local, demonstrando a robustez, em ambiente experimental e para as condições estabelecidas, do MC proposto.

A estruturação do SBM-LEA em células autônomas, sob a ótica dos SCAs, permitiu que seu controle fosse realizado de forma flexível, com um grau de complexidade reduzido e evitando a tendência caótica do sistema. A modularização do MC permitiu a implementação de seus principais submódulos na forma de agentes autônomos. Já a estruturação de interfaces entre módulos e submódulos garantiu seu acoplamento.

Dentre os benefícios promovidos pelo GCAD, conforme observados nos experimentos, foram identificados:

- a) Menor tempo de atuação, frente a uma situação de instabilidade ou falha, ajustando, corrigindo ou conduzindo as ações da célula a um modo de funcionamento seguro, tanto de forma local como conjunta com demais CRs;
- b) Minimização das discontinuidades operacionais, através da negociação automática e em tempo real entre CRs, com base em variáveis decisórias em comum. Assim, mesmo em caso de perda de conexão do MGR com os sistemas locais, estes devem ser capazes de buscar soluções locais de forma autônoma.
- c) Menor dependência da supervisão e controle através de SSCs, já que as verificações e ajustes passam a ocorrer predominantemente em nível local e, sempre que possível, de forma automática;

Observa-se ainda uma diminuição da sobrecarga geral na rede em instantes de tempo concentrados, minimizando os acessos remotos a eventos de sincronização, negociação ou a situações que ultrapassem a fronteira local de decisão. Embora os eventos de negociação promovam grande atividade na rede, estes eventos tendem a ocorrer em instantes de tempo distintos e somente entre as células diretamente envolvidas em uma decisão distribuída. Com o uso do MC, os dados passam a ser trafegados entre grupos de células e em instantes de tempo configuráveis ou em que a troca de informações é de fato necessária.

A critério dos especialistas do processo, variáveis decisórias podem ser configuradas de forma que ajustes sejam realizados somente após validação por operadores, especialistas ou gestores, através de IHCs, SSCs ou gerenciadores remotos.

O GCAD tende a promover menor custo com manutenções corretivas. As intervenções no processo para manutenções corretivas tendem a ficar menos frequentes já que muitos ajustes locais tendem a ser realizados em estágios iniciais de falha e pelo próprio sistema, com base em dados locais e em cooperação com sistemas relacionados.

Já as manutenções evolutivas do GCAD tendem a ser realizadas com menor impacto tanto nas células distribuídas como no SIA como um todo. A configuração do controle em camadas independentes e com interfaces bem definidas permite que cada nível seja ajustado com impacto mínimo nos demais. Por exemplo, durante a configuração ou manutenção do MC, o MR pode ser configurado para o Modo de Operação Manual (sem autonomia local). Neste caso, eventuais ocorrências deverão ser monitoradas através de SSC tradicionais. Alternativamente, o MC poderá ser mantido em Modo Vigilante e, através do

MTE, direcionar ocorrências para o MGR e CRs. Neste caso, eventuais necessidades de ajustes deverão ser realizadas por engenheiros do processo *in loco*. Uma terceira alternativa é transferir a atividade de controle inteligente para o nível remoto. Neste caso, eventuais ajustes poderão ser realizados remotamente por engenheiros especialistas através de IHCs do MGR.

Já durante configuração ou manutenção do MGR, eventual interrupção de funcionamento do gerenciador remoto deve ser inócua às células distribuídas, já que o controle inteligente tende a ser realizado predominantemente em nível local. Em caso de impasses ou necessidade de ajustes que não puderem ser realizados em nível local ou através de cooperação com CRs, o MC deve configurar o MR para o Modo de Falha.

Contribuições acadêmicas poderão ser refletidas em pesquisas subseqüentes, com o aprofundamento e a adaptação dos aspectos relacionados ao modelo proposto. A investigação de estratégias de comunicação, aspectos relativos à segurança, estratégias de escalonamento dinâmico, garantia de entrega de mensagens em tempo real, aspectos relacionados à tolerância a falhas, infraestrutura de automação e rede, dentre outros, podem ser explorados em trabalhos à parte.

5.2 LIMITAÇÕES DA PROPOSTA

Embora o GCAD promova benefícios, algumas dificuldades e limitações são identificadas. O GCAD tende a apresentar custo elevado em implantações iniciais, já que algumas etapas que são premissas para sua utilização tendem a ser demoradas em alguns casos. Entretanto, o elevado custo mencionado está relacionado ao conhecimento e estruturação das regras do SIA, e não à aplicação da proposta em si. Algumas etapas identificadas são:

- Levantamento dos SIAs e respectivas células a serem controladas;
- Levantamento das interrelações entre as células selecionadas;
- Levantamento de variáveis de interesse e limites operacionais;
- Mapeamento das regras de controle e configuração do MC;
- Configuração de regras de conhecimento e do comportamento em Modo de Falha nas BCs de cada célula;
- Configuração da comunicação em nível de célula e com o nível remoto;
- Configuração do MGR e integração com historiadores de dados de processo e demais sistemas pre-existentes.

Dispositivos de controle industrial que possibilitem funções mais complexas, como maior capacidade de processamento e de armazenamento em nível local, de forma a comportar o GCAD, em geral, apresentam altos custos financeiros, sendo mais atrativa a utilização de um hardware externo dedicado e acoplado ao controlador.

Espera-se que o GCAD seja utilizado em nível de célula mesmo em se tratando de equipamentos com capacidade restrita de armazenamento e processamento local em curto prazo. Conseqüentemente, cada MC local dispõe de uma visão limitada dos dados de CRs, sendo consideradas apenas as relações diretas. Isso pode dificultar otimizações em nível local, já que a identificação do impacto de uma ação em células com relação indireta só é possibilitada por meio do envolvimento entre múltiplas células. E quando o número de células envolvidas em uma cooperação é muito grande, a possibilidade de respostas desfavoráveis aos ajustes propostos tende a aumentar, já que a aceitação a um pedido de negociação pode estar condicionada à concordância por diversas células em cadeia e que podem estar executando tarefas que impeçam a resposta imediata. Sendo assim, é necessário que o tempo de espera de resposta a uma solicitação de cooperação entre células tenha um limite máximo configurável, de forma a evitar que o sistema entre em *deadlock**.

Outra limitação identificada na atual proposta do GCAD é o conhecimento da origem de um tempo de espera expirado em uma cooperação entre CRs. Atualmente, a demora de resposta de uma célula a uma solicitação não é diferenciada de uma falha na entrega da solicitação. Sendo assim, é necessária a investigação de mecanismos de comunicação em rede que garantam tempo de espera aceitável e confiabilidade de entrega de mensagens.

A implementação do conceito de células autônomas, mesmo quando faz uso de mecanismos eficientes de redundância e tolerância a falhas, não garante a completa ausência de anomalias do processo. O objetivo é promover alternativas que as minimizem. Seja por eventos externos não tratáveis, por falhas internas não identificáveis ou de difícil previsão em curto prazo, situações de anomalia podem ocorrer. Neste contexto, o gerenciamento de células em nível remoto representa uma contribuição importante e, em alguns casos, indispensável à continuidade operacional e disponibilidade de informações, especialmente nas situações em que não é possível o ajuste automático e autônomo de células distribuídas.

Embora tenha sido proposta uma estrutura para gerenciamento remoto, a forma de integração do MGR com funcionalidades pre-existentes (SSC, PIMS, simuladores, dentre outros) e o detalhamento e implementação dos submódulos descritos não foram abordados no escopo deste trabalho. Entende-se que a integração de regras e conhecimentos de células

distribuídas em nível remoto, para fins de gerenciamento remoto, e o desenvolvimento de uma IHC que concentre as atividades mais relevantes envolvem uma investigação que se configura em um trabalho por si só complexo. Assim, alguns itens definidos no GCAD requerem maior investigação e detalhamento.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A Lógica Fuzzy e as RNA têm ensejado grande desenvolvimento das técnicas de controle de sistemas. No controle de SIA, simplifica a automação de tarefas complexas. A Lógica Fuzzy permite habilitar o software a tomar decisões similares ao processo humano de tomada de decisão. Através de mecanismos de inferência, pode reunir em um software o conhecimento de mais de uma pessoa e lidar com conceitos de imprecisão, como “frequentemente” e “longe”, criando termos entre “verdadeiro” e “falso”, ou “perto de verdadeiro” e “parcialmente falso”. Assim, para trabalhos futuros, espera-se embutir no GCAD, tanto no MC como no MGR, mecanismos de análise aplicando estruturas *fuzzy*, de forma a identificar diagnósticos de falhas e ações corretivas correspondentes mesmo em situações de imprecisão dos diagnósticos, e conceitos de Redes Neurais Artificiais, de modo a prover a cada MC e ao MGR a capacidade de aprendizagem e proposição de novas regras de conhecimento e novas ações corretivas.

Sugere-se ainda a investigação de mecanismos de escalonamento dinâmico de tarefas do MC, de forma a evitar que tarefas menos prioritárias nunca sejam executadas ou permaneçam por tempo inadequado em fila de espera.

Outra possibilidade de trabalho futuro é a incorporação de recursos do MAICE no modelo do GCAD. O MAICE (Oliveira et al., 2007) é uma ferramenta computacional em estágio avançado de amadurecimento que visa a ser integrada a sistemas especializados com o intuito de realizar análises dos dados disponíveis através de uma base de conhecimento especialista modelada e codificada a partir de técnicas de inteligência artificial.

Outra investigação a ser direcionada para trabalhos futuros é o tratamento das séries históricas das variáveis de processos, que alimentam a BC. Oscilações de rede, defeitos nos sensores, dentre outras anomalias, são responsáveis por criarem lacunas nas séries históricas que, por sua vez, podem invalidá-las para a utilização nas funções cognitivas do MC e do MGR. Sendo assim, é de grande utilidade ao GCAD o desenvolvimento de métodos que, dentre outras funções, dimensionem o tamanho representativo das amostras de dados a serem analisadas pelo MC e pelo MGR, façam análise e extração dos dados espúrios das

séries amostradas e, por fim, qualifiquem a série histórica quanto ao atendimento aos requisitos para os quais foi adquirida.

Aspectos relacionados à infraestrutura de rede e automação também merecem uma investigação em trabalhos subsequentes.

5.4 PUBLICAÇÕES GERADAS E PREMIAÇÃO

A construção do presente trabalho ensejou a oportunidade para publicações que, por sua vez, foram utilizadas como parte do referencial teórico aqui utilizado. Adicionalmente, algumas publicações renderam premiação e seleção para publicação em periódico e revista. As principais publicações produzidas e resultados decorrentes foram:

PACHECO, L. A.; LEPIKSON, H. A. An Autonomous Control Strategy Alternative for Critical Industrial Automated Systems. In: INCOM 2009 – Information Control Problems in Manufacturing, 2009, Moscow.

- Artigo premiado na categoria "*Winners Of The Special Prize Of International Jury*", julgado o melhor trabalho na área de conhecimento *Information Systems, Control and Interoperability*.
- Selecionado para publicação no Periódico IFAC-PapersOnline, provido pela *International Federation of Automatic Control (IFAC)*. Identificador: 10.3182/20090603-3-RU-2001.00054.

PACHECO, L. A.; LEPIKSON, H. A. Autonomous local control and remote management: alternative for critical industrial automated systems. In: COBEM, International Congress of Mechanical Engineering, 2009, Gramado.

- Selecionado para inclusão na *ABCM Symposium Series in Mechatronics – Vol. 4* (disponível em <http://www.abcm.org.br/symposiumSeries/index.shtml>)

PACHECO, L. A.; LEPIKSON, H. A.; COSTA, E. M. Uma estratégia de controle autônomo para sistemas industriais. In: V SNCA – Seminário Nacional de Controle e Automação, 2007, Salvador.

PACHECO, L. A.; LEPIKSON, H. A.; COSTA, E. M. Controle de Sistemas Híbridos com Restrições de Confiabilidade e Tempo de Resposta. In: V SNCA – Seminário Nacional de Controle e Automação, 2007, Salvador.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, L. A. (ed). **Enciclopédia de Automática Controle & Automação**, v.1, Edgard Blücher, 2007a.
- AGUIRRE, L. A. (ed). **Enciclopédia de Automática Controle & Automação**, v.2, Edgard Blücher, 2007b.
- AGUIRRE, L. A. (ed). **Enciclopédia de Automática Controle & Automação**, v.3, Edgard Blücher, 2007c.
- AL-KHAMIS, M. N.; ZORBALAS, K. I.; AL-MATOUQ, H. M.; *et al.* *Revitalization of Old Asset Oil Fields into I-Fields*. SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium, AlKhobar, Saudi Arábia, 2009.
- ANTSAKLIS, P. J.; PASSINO, K. M. e WANG, S. J. *Towards intelligent autonomous control systems: Architecture and fundamental issues*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Volume 1, Issue 4, pp 315 – 342, 1989.
- ANTSAKLIS, P. J.; PASSINO, K. M.; WANG, S. J. *An Introduction to Autonomous Control Systems*, IEEE International Symposium on Intelligent Control, 1990.
- ANTSAKLIS, P. J. & NERODE, A. *Hybrid Control Systems: An Introductory Discussion to the Special Issue*, IEEE Transactions on Automatic Control, vol 43, n.4, pp 457-459, 1998.
- ARAKAKI, J. **Técnicas de Degeneração no Projeto do Controle de Sistemas Produtivos**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ARAÚJO, F. A. **Cálculo Hidráulico de uma Malha de Escoamento de Petróleo Utilizando Redes Neurais**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2007.
- ARAÚJO, A. C. **SCAE: Uma Abordagem Baseada em Agentes Inteligentes para Gerenciamento e Controle de Campos de Petróleo**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Bahia, 2011.
- BAFFO, I.; CONFESSORE, G.; STECCA, G., *Development of a Multi-Agent Model for Production Scheduling in Innovative Flexible Manufacturing System*, Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier, The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems, Page(s):279-283, 2008.
- BARRETO FILHO, M. A. *et al.* **Proposta de um Sistema de Bombeio Mecânico em modelo reduzido para validação de modelos teóricos**. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, Bahia, 2008.
- BARRETTO, S. T. **Produção, Coleta e Tratamento de Óleo: Curso Introdotório**. Petrobras. 8 a 12 de setembro. Notas de Aula. Salvador, Bahia, 2008.

BEZERRA, M. V. **Avaliação de Métodos de Elevação Artificial de Petróleo Utilizando Conjuntos Nebulosos**. Dissertação (Mestrado). Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

BONASTRE, A.; CAPELLA, J.V.; ORS, R. *A new generic architecture for the implementation of intelligent and distributed control systems*, IECON 02 [IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society], Volume 3, Page(s):1790 – 1795, 2002.

BONGAERTS, L.; MONOSTORI, L.; MCFARLANE, D.; KÁDÁR, B. *Hierarchy in distributed shop floor control*, Computers in Industry **43**: 123-137, 2000.

BOOCH, G. *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*, 2nd edition, Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1994.

BORGES FILHO, A. M. *Loop tuning of offshore oil and gas production plants*. ISA – Sociedade de Instrumentação, Sistemas e Automação, São Paulo – SP, 2003.

CAVALCANTI, J. H. F.; ALSINA, P. J.; FERNEDA, E. **Posicionamento de um Pêndulo Invertido usando Algoritmos Genéticos**, SBA Controle & Automação, v.10, n.1, 1999.

CHAVES, C. R. **Curso de formação de operadores de refinaria: instrumentação básica** (Apostila) – Petrobras. Curitiba, Brasil, 2002.

CHEN, M. Y.; LINKENS, D. A. *A systematic neuro-fuzzy modeling framework with application to material property prediction*, IEEE Transactions on System. Man and Cybernetics. Fuzzy Syst., v31, pp. 781-790, 2001.

CHOI, K. H., KIM, S. C. E TOOK, S. H. *Multi-agent hybrid for shop floor control system*, International Journal of Production Research **38**(17): 4193-4203, 2000.

CORREA, J. F. S. **Sistema inteligente para aplicações de soluções ao bombeamento mecânico de petróleo**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas, SP, Brasil, 1995.

DEBRUN, M. **Auto-organização e Ciências Cognitivas**. In: Encontro Brasileiro Internacional de Ciências Cognitivas. Anais. UNESP: 29-38, 1996.

DESHMUKH, A. V., BENJAAFAR, S., TALAVAGE, J. J., BARASH, M. M. *Comparison of centralized and distributed policies for manufacturing system*, Proceeding of the 4th Industrial Engineering Research Conference, Nashville, p. 744-748, 1995.

DUTRA, F. A. F.; ERDMANN, R. H. **Análise do planejamento e controle da produção sob a ótica da Teoria da Complexidade**. Revista Produção, São Paulo, v. 17, n.2, p. 407-419, mai./ago, 2007.

FERNANDES JUNIOR, F. G.; LOPES, J. B.; MAITELLI, A. L.; ARAÚJO, F. M.; OLIVEIRA, L. G. **Implementação de Controladores PID Utilizando Lógica Fuzzy e**

Instrumentação Industrial. VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – SBAI, São Luís – MA, 2005.

FRANCO, G. N. **Aplicação de Sistemas Holônicos à Manufatura Inteligente.** Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 177 pp., 2003.

GOMES, H. P. **Desenvolvimento de um Sistema Inteligente para Análise de Cartas Dinamométricas no Método de Elevação por Bombeio Mecânico.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo da UFRN, Natal, RN, 2009.

GUERRA, P. A. C. **Uma abordagem arquitetural para tolerância a falhas em sistemas de software baseados em componentes.** Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2004.

GUO, Q.; ZHANG, M. *A novel approach for Multi-Agent-Based Intelligent Manufacturing System.* Information Sciences, doi: 10.1016/j.ins.2009.05.009, 2009.

HEINEN, F. J. **Sistema de Controle Híbrido para Robôs Móveis Autônomos.** Dissertação (Mestrado). Mestrado em Computação Aplicada. Unisinos, São Leopoldo – RS, 2002.

HSIEH, F. S. *Developing cooperation mechanism for multi-agent systems with Petri nets.* Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 22, Issues 4-5, June, Pages 616-627, doi:10.1016/j.engappai.2009.02.006, 2009.

ILARRI, S.; MENA, E.; ILLARRAMENDI, A. *Using cooperative mobile agents to monitor distributed and dynamic environments,* Information Sciences 178: 2105–2127, 2008.

IYODA, E. M. **Inteligência computacional no projeto automático de redes neurais híbridas e redes neurofuzzy heterogêneas.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2000.

LEPIKSON, H. A. **SOMA - Sistema Orgânico de Manufatura Autônoma: uma nova abordagem distribuída para o gerenciamento do chão de fábrica.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 1998.

LIMA JÚNIOR, M. L.; MELO, J. D.; DÓRIA NETO, A. D. **Utilização de Sistemas Inteligentes baseados em aprendizagem por reforço para a otimização do problema do gerenciamento de sondas de produção terrestre,** 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador, Bahia, 2004.

MARTINS, R. W. C. **Uma arquitetura modular para controle de FMS.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, 2005.

MEYER, G. G.; FRÄMLING, K.; HOLMSTRÖM, J. *Intelligent Products: A survey.* Computers in Industry, Vol. 60, No. 3, pp. 137-148. DOI: 10.1016/j.compind.2008.12.005, 2009.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de Automação Industrial**. 1.ed. Rio de Janeiro: LCT Editora, 2001.

MOORE, M.L.; GAZI, V.; PASSINO, K.M.; SHACKLEFORD, W.P.; PROCTOR, F.M. *Complex control system design and implementation using the NIST-RCS software library*. IEEE Control Systems Magazine, vol.19, no. 6, pp. 12-28, 1999.

MUNNÉ, F. **Las teorías de la complejidad y sus implicaciones en las ciencias del comportamiento**. Revista Interamericana de Psicología/Interamerican Journal of Psychology. Vol. 29, n. 1, p. 1-12, 1995.

NAKAJIMA, L. **Otimização de Desempenho de Poços Horizontais no Desenvolvimento de Campos de Petróleo**. Dissertação (Mestrado). Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo. Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, 2003.

NIKRAVESH, M.; KOVSCEK, A. R.; PATZEK, T. W. *Dividing Oil Fields into Regions with Similar Characteristic Behavior Using Neural Network and Fuzzy Logic Approaches*. Fuzzy Information Processing Society. Biennial Conference of the North American, pp.164-169, 1996.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Pearson Brasil, 4ª ed., Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, F. M.; CORRÊA, J. F. S.; LEPIKSON, H. A.; SCHNITMAN, L. **MAICE – uma ferramenta para modelagem de conhecimento especialista aplicada a automação de poços de petróleo**. In: CITARE – Congresso Ibero-Americano de Inovação Tecnológica e Áreas Estratégicas, Rio de Janeiro – RJ, 2007.

ORDOÑEZ, B. **Proposta de controle de operação de poços com Bombeio Mecânico através da pressão de fundo**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

O'SHIMA, E. *Computer aided plant operation*. Computers & Chemical Engineering, v.7, n.4, pp.311-329, 1983.

PACHECO, L. A.; LEPIKSON, H. A. *An Autonomous Control Strategy Alternative for Critical Industrial Automated Systems*. In: INCOM 2009 – Information Control Problems in Manufacturing, Moscow. DOI: 10.3182/20090603-3-RU-2001.00054, IFAC – International Federation of Automatic Control, 2009.

PACHECO, L. A.; LEPIKSON, H. A. *Autonomous local control and remote management: alternative for critical industrial automated systems*. In: ABCM Symposium Series in Mechatronics, vol. 4, pp. 538-545, ISBN 978-85-85769-47-5. ABCM – Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2010.

PASCON, P. E. **Segurança Intrínseca**. Disponível em: http://www.processos.eng.br/Portugues/PDFs/seguranca_intrinseca.pdf. Último acesso em 14/11/2010, 2005.

PATRÍCIO, A. R. **Estudo de um Sistema Inteligente para Elevação de Poços e Controle de Processos Petrolíferos**. Tese (Doutorado). Unicamp, SP, 1996.

PORTER, B. *Issues in the Design of Intelligent Control Systems*, IEEE Control Systems Magazine, January pp. 97-99, 1989.

RAMALHO, J. B. **Ensaio para avaliação dos principais parâmetros necessários ao dimensionamento de separadores gravitacionais trifásicos**. Boletim técnico. Petrobras, Rio de Janeiro, 43 (1): pp.28-33, 2000.

RANDELL, B., Xu, J. *The Evolution of the Recovery Block Concept*. In: Software Fault Tolerance. pp.1-22, John Wiley & Sons Ltda, 1995.

SANS, R.; ARZEN, K. E. *Trends in Software and Control*. IEEE Control Systems Magazine. Vol. 23, Nº 3, p. 61-73, 2003.

SHAW, M.; GARLAN, D. *Software Architecture, Perspectives on an Emerging Discipline*, Prentice Hall, 1996.

SILVA FILHO, O. S. **Estratégias seqüenciais subótimas para planejamento agregado da produção sob incertezas**. Gest. Prod. [online]. v. 7, n. 3, pp. 247-268. ISSN 0104-530X, 2000.

SREENIVASACHAR, K.; JAYARAM, S.; SALAMA, M. A. *Intelligent Autonomous Control of a Unified Power Flow Controller*, University of Waterloo, Waterloo, Canada, IEEE, 1997.

STEPHANOPOULOS, G. & HAN, C. *Intelligent systems in process engineering: a review*. Computers & Chemical Engineering, v.20, n. 6-7, pp.743-791, 1996.

TANI T., MURAKOSHI S. and UMANO M. *Neuro-fuzzy hybrid control system of tank level in petroleum plant*, IEEE transactions on Fuzzy Systems, Vol. 4, No. 3, pp. 360 – 368, 1996.

THOMAS, J. E. (org.) **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, RJ: Ed. Interciência, ISBN 85-7193-099-6, 2004.

TORRES, M. J. J. **Teoria da complexidade: uma nova visão de mundo para a estratégia**. I EBEC – PUC/PR – Curitiba, PR, Brasil, 2005.

TORRES, B. S.; Hori, E. S. **Análise de Desempenho de Malhas de Controle em Indústria Petroquímica**. 4º Seminário Nacional de Controle e Automação, Salvador/BA, 2005.

WADA, H.; OKADA, S. *An autonomous agent approach for manufacturing execution control systems*, Integrated Computer-Aided Engineering, p. 251-262, 2002.

WATANABE, E. H. **Aplicação de Software Aberto em Redes Industriais**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2006.

GLOSSÁRIO

Optou-se pela utilização de um glossário para uma melhor definição de termos utilizados segundo a abordagem utilizada nesse trabalho, e que podem ser interpretados de forma ambígua na literatura, de forma a contextualizar estes termos.

Adicionalmente, este glossário apresenta um conjunto de definições de termos técnicos específicos que auxiliarão na leitura e interpretação do trabalho, estabelecendo e uniformizando alguns conceitos importantes e recorrentes ao longo do texto.

Os termos definidos no glossário são identificados no decorrer do texto, em sua primeira utilização, com a marca * e contextualizados a partir do capítulo 2.

Abstração	Generalização através da simplificação do conteúdo da informação de um conceito de forma a reter apenas a informação relevante para um determinado propósito.
Arquitetura	Entende-se aqui por arquitetura de um sistema a definição dos principais componentes de um modelo, especificando suas propriedades, funções, requisitos, restrições individuais, regras e estilo de interação, e como estes componentes se relacionam entre si (Shaw & Garlan, 1996).
Atuador	Atuadores são mecanismos que interferem diretamente no funcionamento do processo, podendo ser ativados automaticamente pelo sistema ou por um operador, sempre que ocorrer um determinado evento.
<i>Basic Sediments and Water</i>	O <i>Basic Sediments and Water</i> (BSW) é o quociente entre a vazão de água mais os sedimentos que estão sendo produzidos e a vazão total de líquidos e sedimentos.
Carta Dinamométrica	Registro de cargas na coluna de hastes. A carta de fundo é obtida na profundidade de assentamento da bomba de fundo. A carta de superfície representa os efeitos gerados pela carga atuante na bomba de fundo, após terem se propagado através da coluna de hastes.

Célula	Uma célula Industrial, ou simplesmente célula, pode ser definida como um subsistema de um Sistema Industrial Automatizado, que apresenta atividades específicas visando a um objetivo particular, porém integrando um sistema global.
Chaveamento	Operação de ligar e desligar um dispositivo ou equipamento
Ciclo de operação	Conjunto de tarefas* básicas do sistema, agrupadas em uma macroatividade, com precedências e dependências definidas para cumprir um objetivo específico.
Controle	Capacidade de manter processos dentro dos limites planejados através de supervisão (monitoramento, coleta e tratamento de informações) e realimentação (correção para ajuste aos objetivos determinados) (LEPIKSON, 1998).
“Deadlock”	Também conhecidos com “bloqueios mortais”, são caracterizados por uma situação de espera circular por recursos compartilhados entre diversos processos em execução, o que gera uma situação de bloqueio.
Defeito	Desvio entre o comportamento esperado de um sistema e o seu comportamento real, fazendo com que o sistema, em determinadas situações, funcione em desacordo com suas especificações (GUERRA, 2004).
Desempenho ótimo	A palavra “ótimo” é uma terminologia típica de sistemas de controle. É um conceito relativo, devendo ser considerado como “o melhor”, dadas as variáveis de entrada (assumidas como verdadeiras e precisas). No mundo real, não existe “desempenho ótimo”, mas o algoritmo de controle que matematicamente sugere um “resultado ótimo” para um cenário específico ou para uma determinada função.
Determinístico	Que não é regido por fenômenos aleatórios.
Elevação artificial	Técnica de extração de fluidos (petróleo e derivados) utilizada

	quando a pressão de fluxo no fundo dos poços é baixa e os fluidos não alcançam a superfície de forma natural (como seria o caso dos chamados poços surgentes). Visa fornecer a energia complementar necessária para que o fluido atinja a superfície, resultando assim em um aumento de vazão.
Encapsulamento	Princípio relacionado a sistemas que propõe ocultar determinados elementos de um objeto dos demais objetos, criando métodos para o acesso a estes elementos, de forma a prevenir contra os efeitos colaterais da interrelações entre os objetos.
Erro	Determinado estado interno do sistema que, sob determinadas entradas, pode provocar a ocorrência de um defeito*.
Estabilidade	Associada à ideia de permanência em um determinado estado esperado.
Estocástico	Ocorre de forma não determinística*, porém previsível estatisticamente, podendo ou não ocorrer de forma aleatória.
Falha	Definido como o agente causador de um erro no sistema.
Failover	Esquema de redundância em que quando o servidor original falha, outro idêntico assume a função, mantendo a disponibilidade de informações.
Gerenciamento	Processo de integração de recursos visando tentar atingir os objetivos de uma organização. As principais funções gerenciais são o planejamento e o controle (LEPIKSON, 1998).
Global	Definido no escopo deste trabalho como relativo a uma visão de “todo”, ou seja, algo que é considerado na totalidade ou como o universo de conjuntos especificados (partes).
Herança	Mecanismo para modelar similaridades entre objetos, representando as abstrações de generalização e especialização. Através da herança, é possível explicitar os atributos, características e serviços comuns

	em uma hierarquia de objetos, possibilitando sua reutilização e definição incremental, e facilitando a modificação de modelos. A herança permite a concepção de um novo objeto como o refinamento de outros (BOOCH, 1994).
Híbrido	Sistemas híbridos podem ser definidos como aqueles que contêm, pelo menos, dois tipos distintos de componentes interagindo entre si, sejam eles distintos quanto ao tipo de variáveis manipuladas (contínuas ou discretas), bancos de dados utilizados, estratégias de comunicação adotadas, e assim por diante.
Interface Humano-Computador	Interfaces Humano-Computador (IHC) são interfaces que possibilitam a operadores monitorar e interagir com o processo industrial, exibindo o status de sinais de sensores e atuadores, alarmes, valores de variáveis de processo e indicações de falhas. Possibilitam o acionamento de atuadores, alterações de <i>setpoints</i> , mudança de manual para automático, definição de limites de funcionamento e a realização de comandos, tudo isso de forma interativa.
Incerteza	No contexto deste trabalho, define-se incerteza como um evento não previsto no modelo ou ambigüidades oriundas de sua formulação ou da disponibilidade de informações. Esta imprevisibilidade pode ser originada por variações no cenário operacional do processo, pela ocorrência de erros internos inesperados ou variações ambientais, podendo causar resultados indesejáveis no processo. Esses eventos, inevitavelmente, estarão presentes em situações práticas, podendo ser aleatórios ou previsíveis, de origem interna ou externa, e o controlador deve considerar todos os eventos que possam afetar as variáveis de saída do sistema ou processo (OGATA, 2003).
Instrumento	Conjunto composto por sensores*, transdutores e unidades de condicionamento (tratamento) de sinal capaz de perceber os fenômenos físicos de interesse e convertê-los em sinais capazes de

	serem comunicados para o operador ou controlador do processo.
Latente (falha)	Diz de uma falha presente no sistema, porém que sem erros perceptíveis ao usuário.
Malha de controle (ou simplesmente Malha)	Estrutura de controle interligada a um processo para exercer funções de controle, tendo como objetivo ajustar determinada variável medida a um valor esperado (<i>setpoint</i>), conforme determinação do sinal de erro.
Malha lenta	Uma malha lenta possui tempo de resposta de mais de 30 segundos, a exemplo de algumas malhas de temperatura e de nível.
Malha rápida	Uma malha rápida possui tempo de resposta variando de menos de um segundo até cerca de 10 segundos, a exemplo de uma malha de vazão.
Modularidade	A modularidade é uma propriedade de sistemas decompostos em um conjunto de módulos coesos e fracamente acoplados, com interface bem definida e que permitem adição e remoção de um módulo sem interferir em outros.
Objeto	Do ponto de vista da modelagem de sistemas, um objeto é uma entidade que incorpora uma abstração [*] relevante no contexto de uma aplicação. Possui um estado (informação), exibe um comportamento bem definido, expresso por um número de operações para examinar ou alterar seu estado, e tem identidade única (BOOCH, 1994).
Organização	Além das definições convencionais relacionadas ao ato de organizar, é também aqui entendida como qualquer entidade formalmente criada reunindo sistemas com o propósito de atender a desígnios específicos de uma comunidade (LEPIKSON, 1998).
Otimização	Refere-se a ações para aumentar o desempenho de um processo, melhorando-o até um ponto considerado de “desempenho [*] ótimo”, particularmente por algoritmos matemáticos.

<i>Overshoot</i>	Valores de picos de erros que geram desvio positivo (de um valor menor para um maior) em relação ao valor estacionário máximo final de uma variável (ver também “ <i>undershoot</i> ”).
Pancada de fluido	Também conhecida como batida de fluido ou <i>fluid pound</i> , a pancada de fluido é um evento que ocorre quando o pistão se choca com o fluido no interior da camisa, decorrente do seu enchimento incompleto no curso ascendente. Isto provoca uma violenta compressão na coluna de hastes e esta tensão se propaga por todo o equipamento, de tubulações e hastes até a UB (GOMES, 2009).
Perturbação	Alteração das condições físicas normais (de densidade, de temperatura etc.) de um meio ou ambiente.
Planta	No contexto deste trabalho, o conceito de planta (ou planta industrial) está relacionado a uma unidade industrial, que congrega todos os recursos necessários à realização da produção.
Processo	Sucessão de estados ou de mudanças decorrentes da aplicação de métodos e técnicas definidas. Um processo pode conter uma ou mais tarefas (LEPIKSON, 1998).
Recurso	Material, energia, dinheiro, dispositivo ou informação necessária para execução de uma tarefa (LEPIKSON, 1998).
Reservatório	Os reservatórios são rochas porosas com espaços vazios interconectados, o que lhes conferem a característica de permeabilidade, importante para a produção de fluidos a partir desta rocha-reservatório.
Razão Água/Óleo	A Razão Água/Óleo (RAO) é a relação entre a vazão de água e a vazão de óleo, ambas medidas nas condições de superfície.
Razão Gás/Óleo	A Razão Gás/Óleo (RGO) é a relação entre a vazão de gás e a vazão de óleo, ambas medidas nas condições de superfície.

Risco	Probabilidade ou frequência de um evento perigoso e suas conseqüências.
Robustez	Definida como a capacidade de manter o desempenho esperado mesmo com variações (perturbações) do ambiente
Sensor	Dispositivo que muda seu comportamento sob a ação de fenômenos físicos tais como proximidade, posição, movimento, temperatura, vazão, pressão, corrente, tensão e nível. Pode fornecer direta ou indiretamente um sinal que indica esta grandeza.
Sinergia	Esforço simultâneo de vários elementos para a realização conjunta de uma ação, com resultados superiores aos que se alcançaria pela soma simples das partes.
Sistema	Conjunto de elementos interconectados com objetivo comum, que transformam um conjunto de entradas (materiais, energia e informações) em um conjunto de saídas definidas pelos objetivos do sistema.
Sistema complexo	Um sistema é dito complexo quando suas propriedades não são uma soma natural de seus elementos constituintes vistos isoladamente. As propriedades de um sistema complexo decorrem em grande parte da relação não-linear entre estes elementos.
Sistema crítico	Trata-se de um sistema em que uma falha pode causar graves conseqüências humanas, econômicas ou ambientais. Dentre as principais características a serem providas pelos sistemas considerados críticos estão a confiabilidade e a disponibilidade.
Supervisão	Supervisionar indica a ideia de dirigir, orientar ou inspecionar em um nível hierárquico superior (FERNANDES JUNIOR <i>et al.</i> , 2005).
Surgência	Período em que a pressão natural de fundo de um poço é suficiente para que os fluidos atinjam a superfície de forma espontânea, sem que seja necessária a utilização de métodos artificiais de elevação.

“Tag”	Rótulo que identifica uma variável de processo industrial medida ou monitorada (sinais de campo e controladores).
Tarefa	Cada etapa básica a ser cumprida por um processo. As tarefas mais complexas podem ser subdivididas em operações, que constituiriam, assim, as suas etapas elementares (LEPIKSON, 1998).
Tempo real (<i>real time</i>)	No contexto deste trabalho, compreende-se por tempo real (<i>real-time</i>) o tempo de resposta a um evento (externo ou interno) ocorrido em um sistema de controle, de forma a satisfazer às restrições de execução de suas tarefas* em um intervalo de tempo predefinido, independente de qual seja.
Teoria de controle clássica	A teoria de controle clássica trata apenas sistemas do tipo <i>Single Input/Single Output</i> (SISO), ou seja, “entrada simples e saída simples”, sendo ineficiente para lidar com sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (<i>Multiple Input/Multiple Output – MIMO</i>)
Timestamp	Timestamp é uma sequência de caracteres, que denotam a data ou hora em que determinado evento ocorreu. Em geral, essa informação é apresentada em um formato que permita a fácil comparação entre diferentes registros e rastreamento de progressos através do tempo.
Tolerância a falhas	Tolerância a falhas é uma abordagem complementar à prevenção de falhas em que se considera no projeto do sistema a possibilidade de ocorrências de determinados tipos de falhas. Dessa forma, são incluídos no próprio sistema mecanismos para reagir a essas ocorrências de forma previsível, sem apresentar defeito*. Os mecanismos de tolerância a falhas incorporados nestes sistemas impedem que defeitos no próprio sistema façam com que eles deixem de garantir a confiabilidade (GUERRA, 2004).
Transferência	O processo de transferência está associado ao uso de dispositivos (bombas de transferência) para conduzir fluido de uma unidade de

	armazenamento para outra.
Transmissor	Instrumentos* com habilidade de comunicar sinal à distância.
<i>Undershoot</i>	Valores de picos de erros que geram desvio negativo (de um valor maior para um menor) em relação ao valor estacionário mínimo final de uma variável (ver também “ <i>overshoot</i> ”).

APÊNDICE A – DESCRITIVO DO MÓDULO COGNITIVO

A lógica de funcionamento do MC é descrita conforme Figura 50.

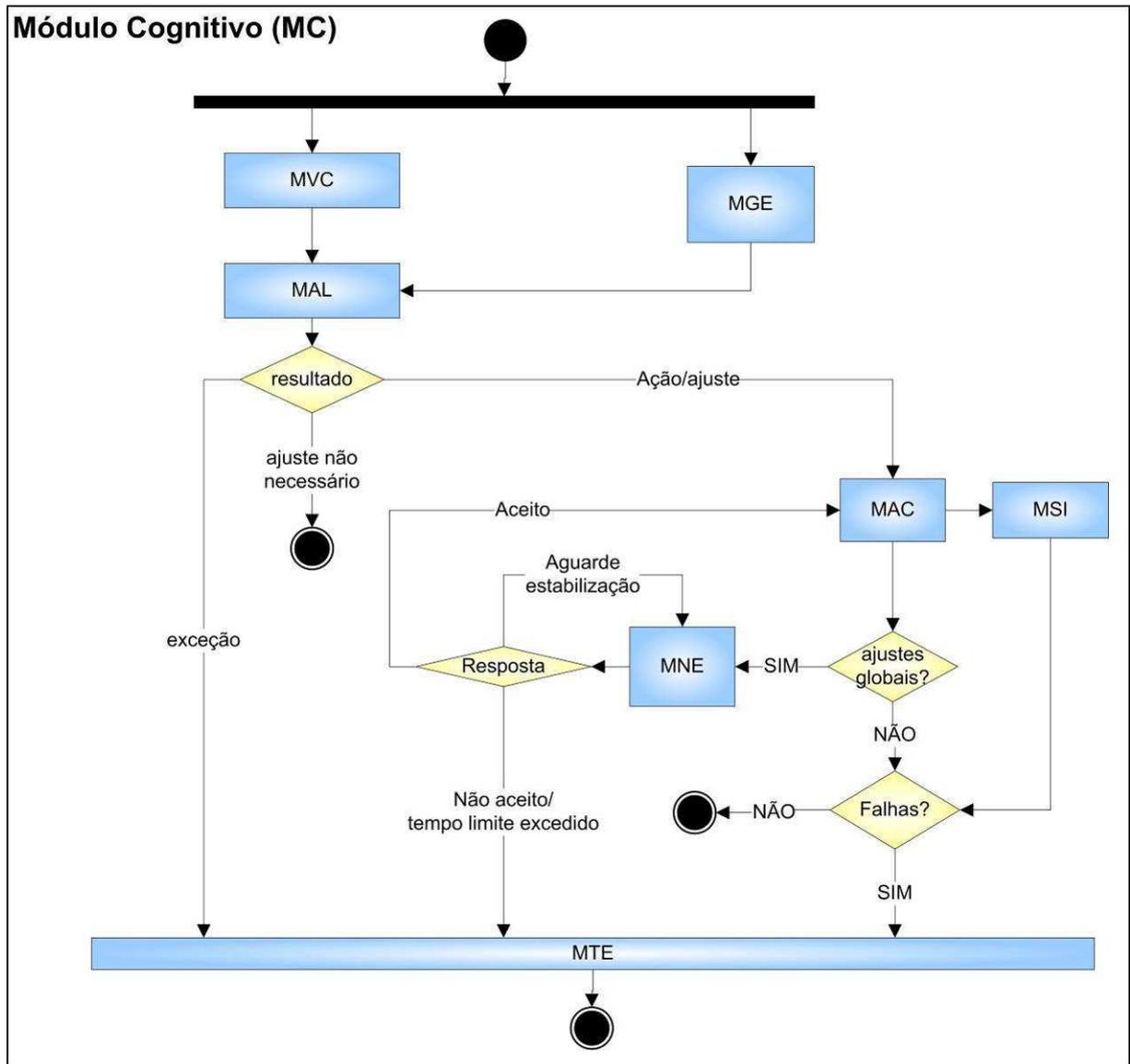


Figura 50 – Lógica de funcionamento do Módulo Cognitivo

Ao detectar variáveis cujos valores apresentam variações excedendo os limites de controle, o MVC aciona o MAL informando possível instabilidade. Em seguida, o MAL analisa os dados locais visando a identificar diagnósticos de falha ou ações corretivas.

Caso sejam identificadas ações corretivas, estas são enviadas ao MAC, que então atualiza o MR (ajustes com impacto local) ou submete ao MNE (ajustes com impacto global). Caso sejam identificados diagnósticos de falha, mas não sejam identificadas ações correspondentes, é acionado o MTE. Periodicamente e após ajustes locais, o MSI é acionado.

Os módulos principais do MC são descritos nas sessões a seguir.

1) Módulo de Verificação Continuada

O Módulo de Verificação Continuada (MVC), ilustrado na Figura 51, analisa continuamente os valores das variáveis obtidas do MR, visando a identificar se alguma variável excedeu o limite máximo ou mínimo definido, sinalizando possíveis instabilidades não tratadas por ela. A condição para o acionamento do MVC é que o MR se encontre em Modo de Operação.

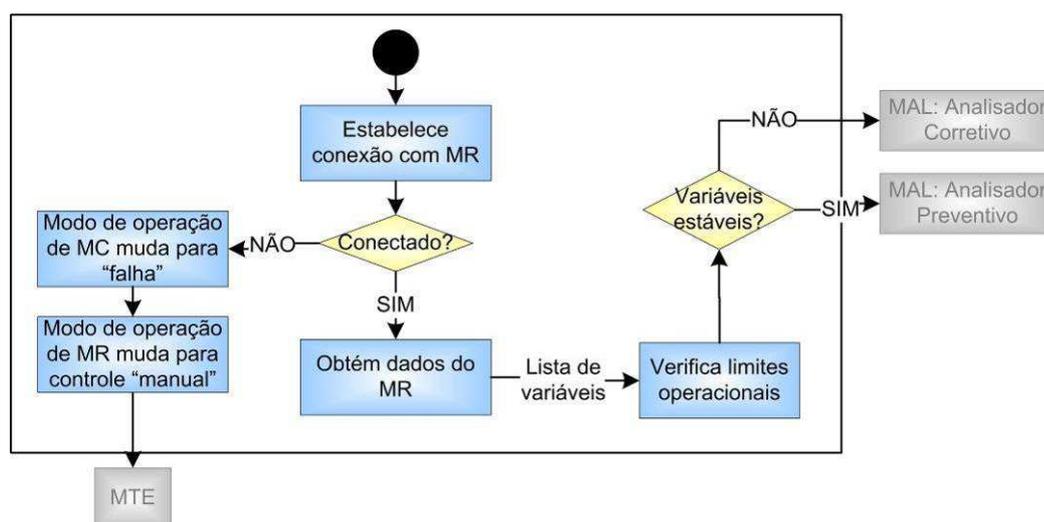


Figura 51 – Módulo de Verificação Continuada

Caso as variáveis observadas apresentem valores superiores ou inferiores ao SP, porém ainda permaneçam na faixa de controle (maior que MIN_{CTR} e menor que MAX_{CTR}), assume-se que não há falha a ser tratada pelo MC, mas sim pelo próprio MR sem que haja necessidade de ajuste pelo MC. Entretanto, caso as variáveis observadas não apresentem sinal ou assumam valores superiores a MAX_{CTR} ou inferiores a MIN_{CTR} , estes desvios são interpretados como uma possível falha de controle do MR, ou de situações que de fato não são tratáveis por ela (eventos não previstos, dados insuficientes, etc.), podendo ocasionar em

estados de erro. Neste caso, o MC assume uma condição de alerta, que indica uma possível falha (Tabela 8).

Tabela 8 – Regras para identificação de possível falha.

Regra	Diagnóstico
Valor = <i>shutdown</i>	Alerta
Valor > MAX _{CTR}	Alerta
Valor ≥ MIN _{CTR} e valor ≤ MAX _{CTR}	Normal
Valor < MIN _{CTR}	Alerta

Sendo assim, o motivo da variação deverá ser identificado para que eventuais falhas possam ser corrigidas ou sinalizadas. Para isso, o MVC envia as variáveis impactadas ao MAL, para que este identifique se de fato há uma falha no sistema.

2) Módulo de Análise Local

O Módulo de Análise Local (MAL), representado pela Figura 52, funciona de forma a identificar e tratar inconsistências não identificadas ou não tratáveis pelo MR ou ainda prevenindo erros.

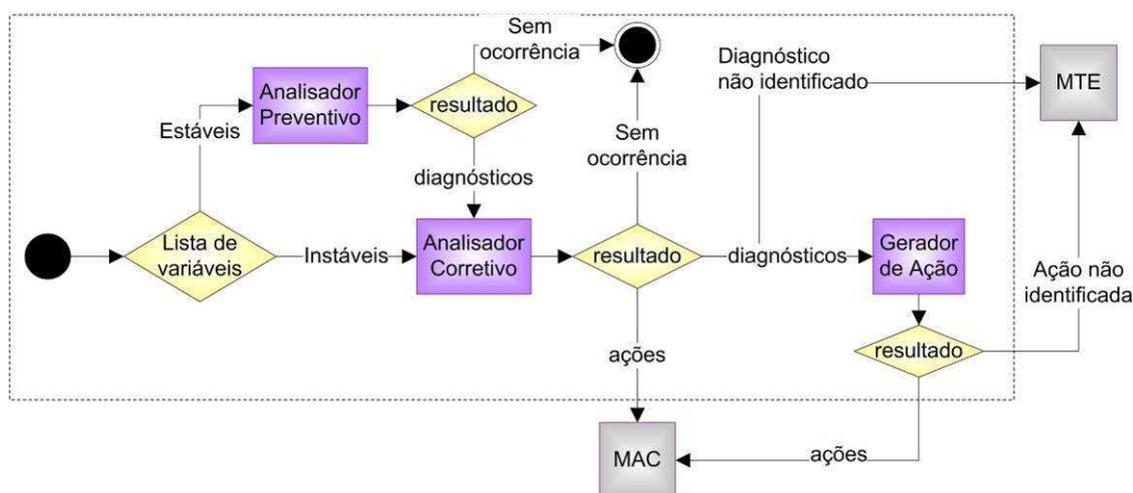


Figura 52 – Módulo de Análise Local

O MAL deve agir inicialmente em duas condições possíveis:

- Preventiva: analisando possíveis tendências de falha, ainda que as variáveis se encontrem na faixa de controle, identificando os eventuais diagnósticos.

- b) Corretiva: identificando se de fato existe uma falha ou a variação observada foi oriunda de um *overshoot** ou *undershoot**.

Em ambas as etapas, são investigadas as condições que provocaram comportamento indesejável do sistema ou de seus dispositivos, visando a identificar uma possível ação ou, ao menos, um conjunto de diagnósticos, criando contingências e evitando assim falhas recorrentes.

Caso o Analisador Preventivo não identifique diagnósticos de falha, assume-se que o sistema se encontra em condições normais de operação. Caso o Analisador Corretivo não identifique diagnóstico nem ação, o MTE é acionado.

Caso o Analisador Corretivo identifique ações a serem aplicadas à célula, as ações são submetidas ao MAC, para que os ajustes sejam realizados no MR.

Caso não sejam identificadas ações na BC, mas sejam identificados possíveis diagnósticos, estes são direcionados ao Gerador de Ação, para que uma nova regra de atuação seja gerada pelo sistema.

a) Bloco Analisador Preventivo

O “Analisador Preventivo” (Figura 53) analisa as variáveis que apresentam valores dentro da faixa de controle, de forma a antecipar a identificação de possíveis tendências de erro e reverter o quadro antes que se configure em uma condição de falha.

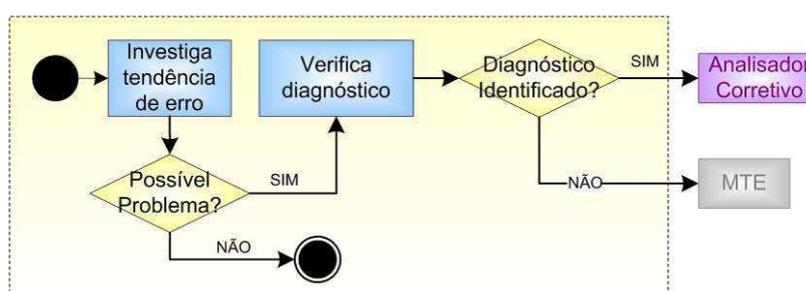


Figura 53 – Analisador preventivo do MAL

O Analisador Preventivo pode gerar como resultados:

- Diagnósticos de possíveis falhas, as quais são direcionadas para o Analisador corretivo;
- Diagnóstico de normalidade;

- Possível evento de falha desconhecida, sendo acionado o MTE para que exceções sejam sinalizadas e rastreadas por especialistas.

b) Bloco Analisador Corretivo

O “Analisador Corretivo” (Figura 54) visa a tratar o efeito de uma falha percebida de forma a contê-la imediatamente, reduzindo o tempo de indisponibilidade dos serviços ou evitando que a falha assuma maiores proporções. Visa a estabilizar variáveis de controle, reconfigurando parâmetros ou, caso a estabilização não seja viável, acionando o MTE.

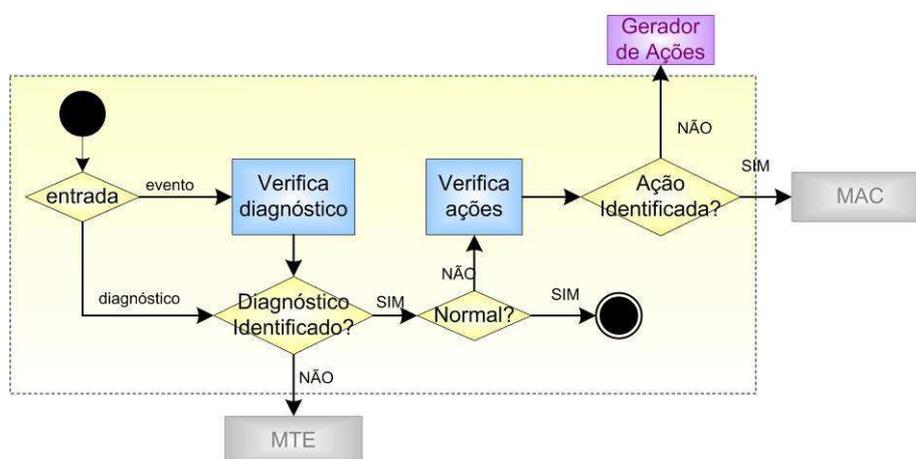


Figura 54 – Analisador corretivo do MAL

Em caso de falha, o MC deve identificar os diagnósticos ou as ações pertinentes para estabilizar os valores do processo para os limites adequados e evitando que a célula passe a produzir resultados indesejáveis ou gere impactos prejudiciais em toda a planta. Caso o MR não seja suficiente pra manter ou tornar o processo estável em tempo hábil, ou seja, caso os valores de variáveis controladas excedam os limites operacionais definidos, o MAL deve acionar o MTE, de forma que as exceções sejam sinalizadas e a célula seja configurada para o Modo de Falha.

Caso não seja possível estabilizar variáveis do processo em tempo hábil, através do ajuste de dispositivos e contenção de falhas, o MC deve configurar a célula para um Modo de Falha. Em seguida, deve notificar ao MGR e às eventuais CRs quanto aos ajustes realizados, para que estes executem eventuais medidas preventivas locais, e para que o MGR execute ações globais de gerenciamento ou simplesmente atualize a BC Global.

Caso sejam identificadas ações envolvendo ajustes de variáveis ou parâmetros, é verificado se o ajuste impacta CRs. Caso o impacto seja local, o ajuste é realizado no MR e,

em seguida, sincronizado com MGRs e CRs. Caso o impacto seja global, o MC negocia com CRs e só efetiva o ajuste após as respectivas aprovações.

Os dados de entrada são: lista de variáveis cujos valores estão além dos limites de controle, limites operacionais, parâmetros de controle e a BC local. Os possíveis estados gerados por este bloco são:

- Conjunto de possíveis ações ou ajustes que são direcionados para o MAC, para evitar ou reverter uma tendência de erro. As ações identificadas podem ser:
 - i. Sequenciais: as ações devem ser escalonadas, para execução seqüencial;
 - ii. Alternativas: as ações devem ser executadas como alternativas. Caso a primeira ação não seja bem-sucedida, as demais ações são executadas;
- Conjunto de possíveis diagnósticos que estejam provocando a tendência de erro, e respectivos graus de confiança, os quais são direcionados para o bloco “Gerador de Ação”. O “Gerador de ação” somente é executado caso não sejam identificadas ações corretivas pelo bloco “Analisador corretivo”;
- Mensagem de “diagnóstico desconhecido”, direcionada para o MTE.

c) Bloco Gerador de Ação

O bloco “Gerador de Ação” (Figura 55) visa a gerar possíveis ações de ajuste com base nos diagnósticos de falha obtidos. É ativado pelo bloco “Analisador Corretivo”, quando não é identificada na BC uma ação correspondente a um diagnóstico encontrado, tendo como dados de entrada uma lista de diagnósticos possíveis. As ações geradas são enviadas ao MAC. Caso não seja identificada uma ação de ajuste, é acionado o MTE. A execução do “Gerador de Ações” é condicionada à não identificação de ações na BC em resposta a um diagnóstico.

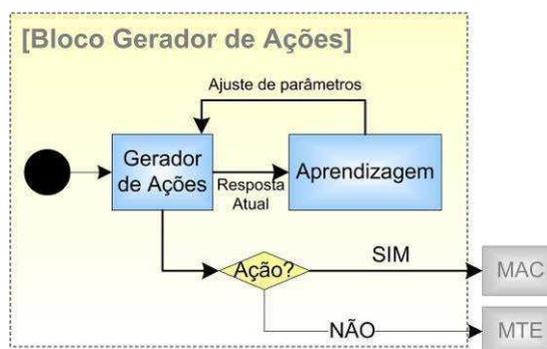


Figura 55 – Gerador de Ações do MAL

O “Gerador de Ação” deve dispor de algoritmos de treinamento e aprendizagem que possam conferir ao sistema uma habilidade de criar novas regras para a BC local para então lidar com ocorrências antes não previstas. Visa a inferir uma ação, com um grau de precisão aceitável para uma atuação automática, a ser aplicada no processo. As ações geradas devem preservar as restrições de segurança do sistema bem como interfaces com sistemas externos ou células relacionadas. Caso não sejam identificadas ações, o MTE é acionado.

Caso a falha tenha sido tratada e o sistema tenha sido estabilizado, o “Gerador de Ação” atualiza as regras da BC, de forma a sistematizar a solução para próximas análises. Entretanto, caso o ajuste demonstre resultados indesejáveis, deve ser criada uma regra restritiva na BC, de forma a evitar que a ação seja mantida ou repetida, nos ciclos de operação subseqüentes.

Este Bloco dispõe de dois momentos distintos de processamento:

- Aprendizado, onde são ajustados os pesos das conexões em resposta à informação (estímulo) recebida;
- Aplicação do conhecimento, onde conhecimento é aplicado ao processo em resposta ao estímulo de entrada (ajustes).

Para cada diagnóstico conclusivo, envolvendo situações não previstas e a geração de novas ações, depois de validadas, o Bloco deve gerar atualização automática da BC conforme o padrão de comportamento esperado para o sistema.

O Bloco deve dispor de habilidade de aprender sobre o ambiente (em razão de interface com CRs): ajustando os parâmetros e procedimentos realizados pelo sistema com base em análise do ambiente externo e dos resultados decorrentes de tarefas locais. Esta previsão deve assegurar que um estado indesejado não seja alcançado, além de garantir satisfatoriamente a integridade do sistema.

O Bloco deve dispor de uma capacidade de generalização, que lhe permita prever a saída mais adequada, com uma precisão aceitável, a uma determinada combinação inédita de situações. Isto significa fornecer saídas válidas mesmo para entradas que não possuem referência de saída na BC.

O bloco gerador de ações não foi implementado no escopo deste trabalho, sendo proposto para trabalhos futuros. Na versão atualmente desenvolvida para validação do GCAD, na ausência de ações identificadas, é acionado o MTE.

3) Módulo de Negociação

O Módulo de Negociação (MNE), representado pela Figura 56, tem como objetivo realizar ajustes envolvendo diferentes células através de um procedimento de cooperação, já que o ajuste de dados locais de uma célula pode não ser suficiente para solucionar ou evitar problemas.

Pode ser necessário ajustar variáveis que apresentam impacto global, ou seja, que exercem influência sobre células relacionadas (CR). Mas para isso, a célula requisitante deve negociar os ajustes com as CRs, de forma a manter a integridade de todo o sistema. Apenas células em Modo de Operação participam de negociações.

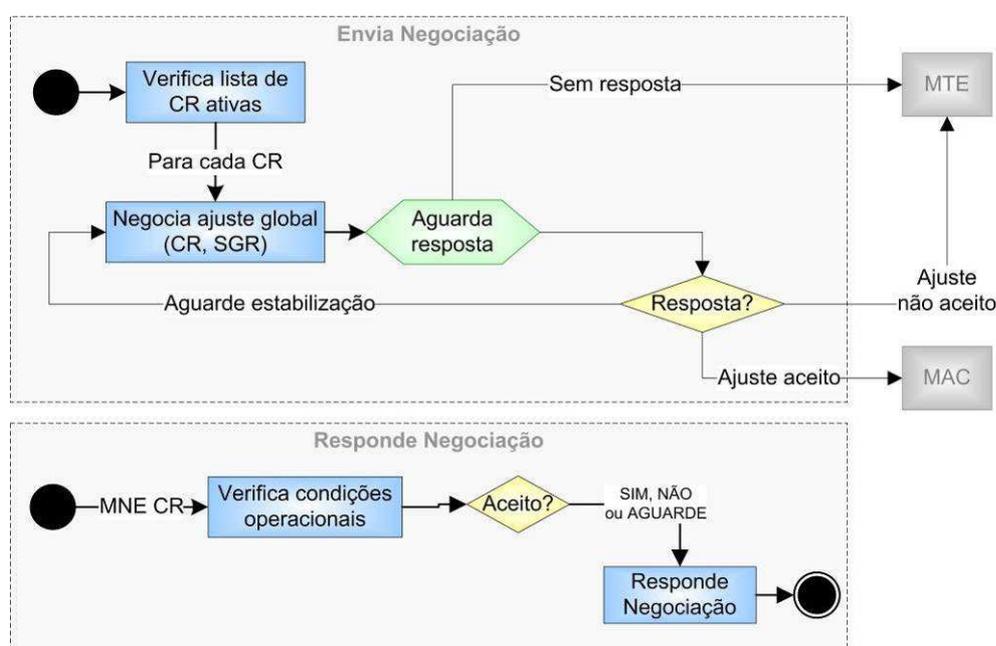


Figura 56 – Módulo de Negociação

O MC requisitante inicia a negociação determinando o ajuste (saída) que melhor atende a solução de um problema (entrada). Em seguida, as CRs informam se o ajuste pode ou não ser realizado. Caso não se obtenha resposta ou um resultado convergente em tempo hábil, a ação não é realizada, devendo-se acionar o MTE. Caso a negociação retorne como resposta um pedido de “aguarde estabilização”, o ajuste retorna para a lista de ajustes pendentes, e a negociação é novamente realizada no próximo ciclo de atividades do MC. Caso a negociação seja bem sucedida, o ajuste é enviado ao MAC, para que seja aplicado no sistema. Caso a negociação seja negada, o ajuste é descartado e uma nova sequência de verificação local é realizada.

O MNE visa também a obter requisições de CRs com impacto em variáveis locais, de modo a participar dos procedimentos de negociação de ajustes globais, para ajustar parâmetros locais com base em novo cenário de operação da planta como um todo ou ainda para restringir ou até impedir ajustes que interfiram negativamente em sua operação local.

4) Módulo de Sincronização

A troca de informações entre células e com o MGR é coordenada pelo Módulo de Sincronização (MSI), representado pela Figura 57, e mesmo estando uma célula em Modo de Inatividade, suas funções devem ser mantidas, de forma a manter atualizada a BC, para assim antecipar o processo de retomada de operação da célula, quando ela estiver apta.

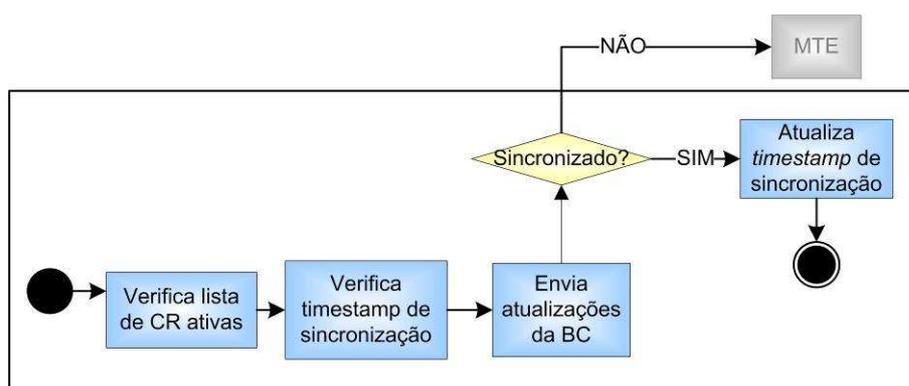


Figura 57 – Módulo de Sincronização

O MSI visa a compartilhar dados entre CR, para que estas aperfeiçoem o desempenho geral do sistema e se tornem aptas a lidar com as falhas não tratadas eficientemente com os dados de uma única célula.

5) Módulo de Ajuste do Controlador

O Módulo de Ajuste do Controlador (MAC), ilustrado pela Figura 58, escalona ajustes obtidos e verifica na BC se as variáveis envolvidas apresentam impacto global, ou seja, se geram impacto em CRs. Caso não haja impactos, os ajustes são submetidos ao MR. Caso contrário, as ações são submetidas ao MNE para que seja iniciada uma negociação com CRs. Se a negociação for bem sucedida, o MAC procede com os ajustes. Caso o ajuste seja negado, é acionado o MTE.

Caso o MNE retorne como resposta uma mensagem “aguarde estabilização”, o ajuste permanece na lista de escalonamento, para ser executado no próximo ciclo atividades, e o ciclo atual é concluído.

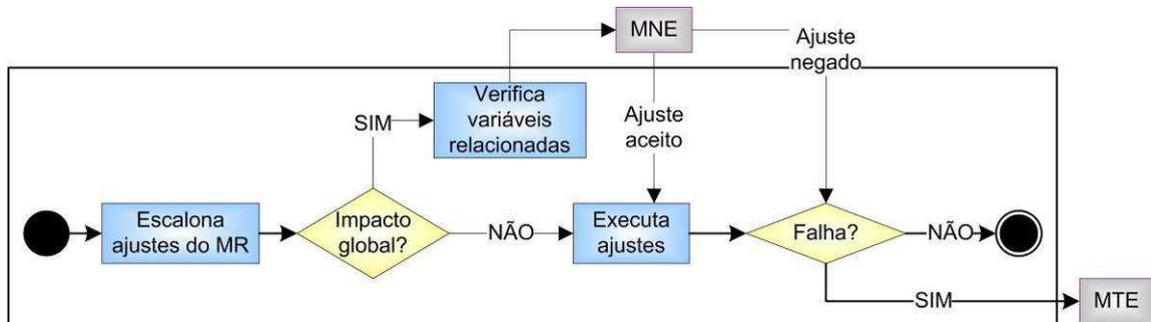


Figura 58 – Módulo de Ajuste do Controlador

Os ajustes devem ser feitos de forma gradual, de forma a evitar variações bruscas no controle da célula, o que poderia resultar em resultados indesejáveis. Esse ajuste é feito pelo MR, com base nos novos parâmetros e ações obtidas.

6) Módulo Gerenciador de Eventos

Paralelamente às tarefas de um MC, as CRs também podem produzir cenários operacionais, requerendo ajustes de variáveis que impactam seu funcionamento, seja por uma proposta de ajuste em valores globais ou em variáveis relacionadas ao MC. Assim, estes ajustes devem ser gerenciados, de forma a manter atualizada a BC e para evitar conflitos.

O Módulo Gerenciador de Eventos (MGE), ilustrado pela Figura 59, gerencia os eventos obtidos do MGR e de CRs, de modo a incorporar atualizações da BC local realizadas pelo MGR ou por especialistas e operadores, a partir de uma IHC.

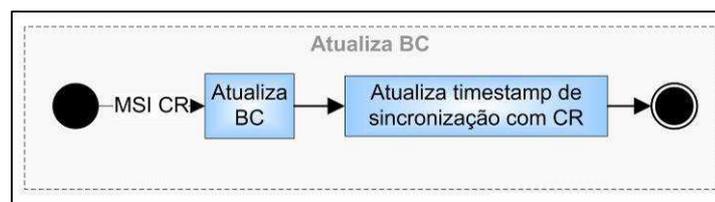


Figura 59 – Módulo Gerenciador de Eventos

7) Módulo de Tratamento de Exceção

O Módulo de Tratamento de Exceção (MTE) realiza o lançamento de exceções ocorridas, em situações de falha em que não foi identificado tratamento ou em caso de necessidade de sinalizar uma manutenção que exceda a capacidade local de atuação, tais como:

- Modo de Operação do MR ajustado para Manual;
- Falha de comunicação do MC com CRs ou com o MR;
- Caso seja detectado um comportamento de falha, mas não sejam identificados diagnósticos;
- Não se obtenha uma decisão em tempo hábil sobre ação a realizar;
- Não exista uma ação automática para solucionar um problema (por exemplo, em caso de necessidade de substituição imediata de algum equipamento).

Nos casos de ativação do Modo de Falha, alarmes são disparados, informações sincronizadas com o MGR e CRs, e o MC é configurado para o Modo Vigilante, de forma que o problema seja analisado e tratado por especialistas remotos ou operadores *in loco*. Em caso de detecção de desgaste severo de algum equipamento, notifica da necessidade de uma manutenção.

Obtêm como dados de entrada a instabilidade identificada ou condições de falha e produz como saída um relatório erros a ser enviado ao MGR e CRs ou ainda a ativação do “Modo de Falha”.

APÊNDICE B – SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PETRÓLEO

Uma bacia petrolífera é composta por uma série de campos de produção contendo um número variável de poços. Estes poços, depois que saem do período de surgência*, passam a depender de métodos artificiais que utilizam equipamentos para a recuperação de fluidos contidos no fundo dos reservatórios para a superfície. A utilização permanente destes equipamentos demanda que, ao longo do tempo, intervenções sejam feitas para realizar serviços de manutenção (LIMA JÚNIOR *et al.*, 2004).

A produção de petróleo pode ser coordenada nas seguintes atividades: Elevação, Coleta, Tratamento, Transferência*, Movimentação, Compressão, Injeção e Armazenamento (Figura 60).

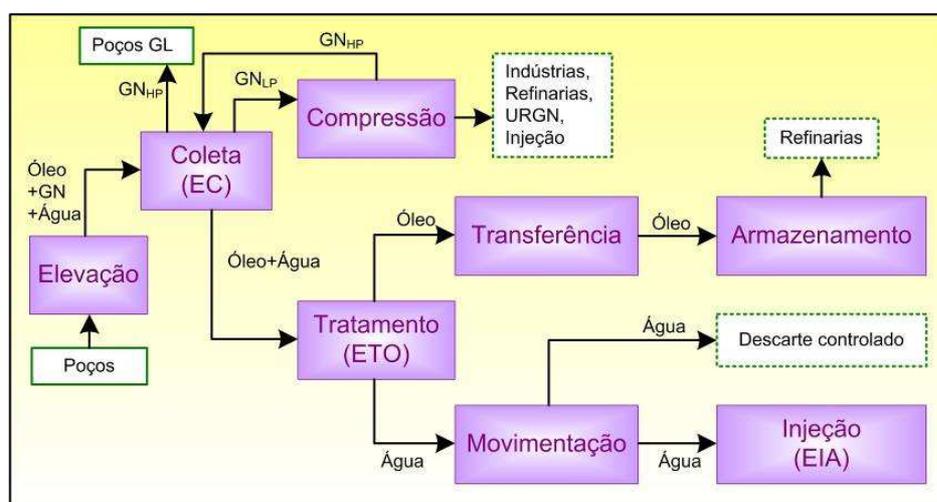


Figura 60 – Visão geral de um sistema de produção de petróleo

Na etapa de elevação, o petróleo é extraído das rochas sedimentares dos reservatórios pela coluna de produção até a superfície. Em seguida, o petróleo produzido é conduzido através de dutos às estações de coleta (ECO), onde é separado segundo suas fases líquida (mistura de água e óleo) e gasosa (GN). A fase líquida é bombeada para as estações de tratamento (ETO), enquanto a fase gasosa, o GN em baixa pressão (GN_{LP}), em geral a 0.83 MPa, escoar para as estações de compressores (BARRETTO, 2008).

Na estação de compressores, o GN é comprimido para envio às Indústrias, Refinarias, Unidades Regeneradoras de Gás Natural (URGN), ou para as ECOs, em alta pressão (GN_{HP}), em torno de 6.9 MPa, para posterior distribuição para Injeção em poços ou elevação em poços pelo método *Gás-Lift* (GL) (BARRETTO, 2008).

Nas ETOs (etapa de tratamento), a fase líquida é tratada e separada em tanques de óleo e em tanques de água produzida. Em seguida (etapa de transferência), o óleo tratado é bombeado para os Parques de armazenamento da Produção (etapa de armazenamento), de onde é distribuído para as Unidades de Refino (BARRETTO, 2008).

A água produzida (etapa de movimentação) é bombeada às Estações de Injeção de Água (EIA), a partir das quais pode ser direcionada para poços injetores de água, de forma a aumentar a pressão de fundo nos reservatórios, ou para o descarte controlado (etapa de injeção) (BARRETTO, 2008).

Um campo de produção de petróleo pode ser descrito como uma planta industrial composta por inúmeras malhas de controle que controlam sistemas envolvidos em diferentes etapas da produção de óleo. Cada uma destas células trabalha isoladamente e ao mesmo tempo cooperativamente com as demais (compartilhando informações ou recursos). Assim, o resultado produzido por uma célula pode se constituir em entrada para as demais.

Sob o ponto de vista do controle do processo produtivo, um campo de produção de petróleo pode ser caracterizado como um sistema híbrido que, além de envolver grande quantidade de dados contínuos (vazão, pressão, nível, temperatura, tempo, velocidade, corrente elétrica, dentre outros) e discretos (condição de funcionamento de bombas e motores – ligado ou desligado; limites de quaisquer variáveis – alto ou baixo), apresenta diferentes tratamentos em função das características de cada poço, tais como viscosidade, pressão de reservatório, profundidade do poço, dentre outras que influenciam as soluções de produção em cada poço de um mesmo campo.

Óleos de diferentes reservatórios possuem características diferentes. E estas diferenças promovem implicações no processo, inclusive no valor do produto entregue. Estas características definem, por exemplo, o método de elevação a ser utilizado para a produção do petróleo, e cada método demanda estratégias de controle distintas.

Na Figura 61 é ilustrada uma visão mais detalhada de um sistema típico de produção de petróleo, onde se podem observar inúmeros poços ligados a uma mesma ECO, diversas ECOs ligadas a uma mesma ETO e ECO englobando funções de ETO.

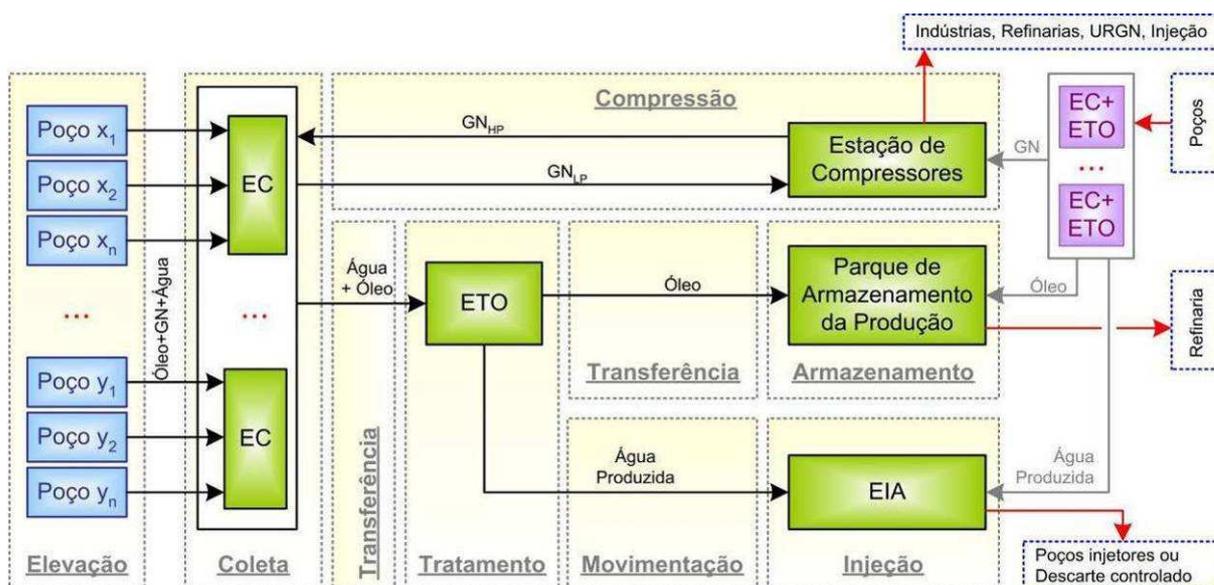


Figura 61 – Visão detalhada do sistema de produção

Algumas formas de aumentar a produtividade deste processo são: maximizar a produção, observando as restrições relacionadas aos reservatórios e à infra-estrutura de produção, minimizar os custos da energia consumida pelas bombas, inclusive as que promovem a transferência do fluido entre as estações, ou maximizar o volume transportado. A programação adequada desses recursos também deve considerar os limites operacionais de projeto e atender a outros objetivos das unidades operacionais, tais como escolher melhor horário para maior transferência de fluidos, controlar a temperatura do óleo no tanque de coleta ou minimizar as operações de liga/desliga das bombas (BARRETTO, 2008; ARAUJO, 2007).

1) Elevação Artificial por Bombeio Mecânico

O petróleo é extraído dos reservatórios através da coluna de produção do poço graças ao diferencial de pressão que provoca o deslocamento do fluido para áreas de menor pressão. A pressão dos reservatórios pode ser naturalmente maior que o peso da coluna hidrostática de óleo na coluna de produção, o que promove, neste caso, a surgência do fluido à superfície (poços surgentes). Caso contrário, técnicas artificiais de elevação devem ser utilizadas para se conseguir extrair o fluido do fundo do poço (BARRETTO, 2008).

A seleção do melhor método de elevação artificial para um determinado poço ou campo depende de vários fatores, dentre eles: o número de poços, diâmetro do revestimento, produção de areia, razão gás-líquido, vazão, profundidade do reservatório, viscosidade dos

fluidos, mecanismo de produção do reservatório, disponibilidade de energia, acesso aos poços, distância dos poços às estações ou plataformas de produção, equipamento disponível, pessoal treinado, investimento, custo operacional, segurança, entre outros (THOMAS, 2004).

Dentre as técnicas de elevação artificial, mais utilizadas no Brasil, destacam-se: bombeio mecânico com hastes (SBM), *Gás-Lift* (GL), bombeio por cavidades progressivas (BCP) e bombeio centrífugo submerso (BCS), sendo que a mais usada continua sendo o SBM, devido à sua versatilidade e confiabilidade, principalmente em se tratando de poços maduros e com baixa produtividade (PATRÍCIO, 1996; THOMAS, 2004).

O SBM se caracteriza ainda pelo baixo custo com investimentos e manutenção, flexibilidade na vazão e profundidade, boa eficiência energética e possibilidade de operar com fluidos com diferentes composições e viscosidades em uma larga faixa de temperatura (ORDONEZ, 2008). Dadas estas características e sua representatividade, usou-se neste trabalho, um campo produtor baseado em SBM como estudo de caso.

O SBM é um sistema de elevação artificial composto de três partes: (i) a Unidade de Bombeio de Bombeio (UB) ou equipamento de superfície; (ii) a coluna de hastes; (iii) o conjunto de bomba de fundo (Figura 62).

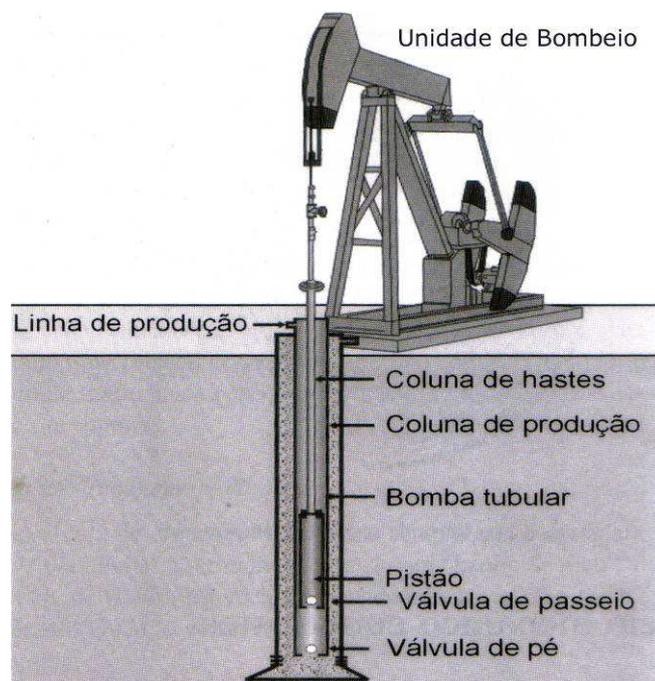


Figura 62 – Sistema de Bombeio Mecânico
Fonte: THOMAS (2004)

A operação do SBM requer o monitoramento ininterrupto do comportamento da bomba de fundo, já que grande parte dos problemas relacionados ao desempenho da UB ocorre sobre os elementos que constituem a bomba de fundo. Para este monitoramento, as cartas dinamométricas de fundo* (CDF) constituem uma ferramenta bastante conhecida na indústria e representam o comportamento da carga atuante na bomba de fundo *versus* deslocamento do pistão, refletidos na superfície através da coluna de hastes (ORDONEZ, 2008).

Uma UB (Figura 63) é responsável pelo fornecimento e transmissão de energia no SBM. Os componentes de uma UB típica são: motor, redutor de velocidade (polia ou caixa de engrenagens), a unidade de bombeio, a haste polida e a cabeça de poço (que inclui o sistema de vedação ou caixa de gaxetas e tubulações de óleo e gás).

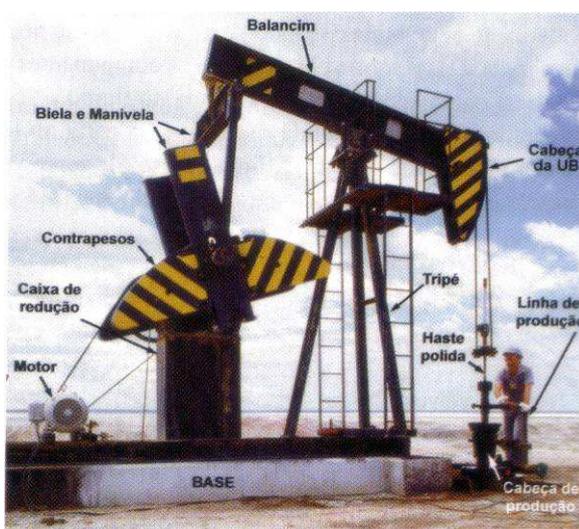


Figura 63 – Unidade de Bombeio
Fonte: THOMAS (2004)

O funcionamento básico de uma UB ocorre conforme descrito a seguir (BEZERRA, 2002):

- a) O acionamento do SBM é feito normalmente por um **motor elétrico** operando com uma velocidade que pode variar entre 500 e 1500 RPM. Na ausência de energia elétrica, pode-se utilizar um motor de combustão interna. Em sistemas automatizados, variadores de frequência permitem a regulação dinâmica da rotação do motor.
- b) O motor se conecta ao **redutor**, que reduz a velocidade e suporta o torque de bombeio.

- c) A **UB** possui um sistema de biela-manivela que converte movimento de rotação em movimento alternativo, que é transmitido até as **hastes** através do balancim (viga oscilante). Um contrapeso ajustável regula a carga imposta ao motor.
- d) A **haste polida** é ligada ao balancim e a selagem do equipamento é garantida através do sistema de vedação localizado acima do “T” de bombeio na **cabeça do poço**, mantendo os fluidos dentro do poço.
- e) A **coluna de hastes** conecta-se à **haste polida** e, dentro do poço, transmite o movimento alternado à **bomba de fundo**.

As cargas aplicadas sobre o motor e demais componentes da UB são especificadas pressupondo-se que a UB esteja adequadamente montada sobre uma base perfeitamente horizontal e estável. A perda de integridade da base tem implicações sobre todos os componentes da UB, que estarão sujeitos a vibrações não previstas em seu dimensionamento e que poderão levá-los a falhas. Devido à grande quantidade de partes móveis e de mancais, é fundamental garantir que sua lubrificação ocorra de maneira adequada (THOMAS, 2004).

A haste polida está em contato direto com a caixa de gaxetas e conecta a cabeça de poço à coluna de hastes. As hastes operam em ambientes que podem ser abrasivos ou corrosivos, além de estarem sujeitas a cargas cíclicas (Tabela 9). Deste modo, constituem-se em um ponto crítico do sistema, pois podem se danificar por corrosão por fadiga.

Tabela 9 – Cargas típicas atuantes no SBM (adaptado de BEZERRA, 2002).

Estáticas	Dinâmicas	De Atrito	De Choque
Peso da coluna de fluidos	Força de aceleração do sistema	No pistão: parafina e areia	Batida de fluido
Peso da coluna de hastes		Nas hastes: tubulação, parafina e fluido viscoso	Batida de hastes
Pressão do tubing		Na haste polida: gaxetas	Desalinhamento de liners
Efeito de Empuxo			

Na atualidade, o uso de sistemas de monitoração remota já trouxe bastante progresso para os sistemas de produção de petróleo utilizando SBM, através da leitura das cartas dinamométricas de superfície* (CDS) e do registro do nível dinâmico (principais ferramentas disponíveis para avaliar as condições de funcionamento do SBM). As cargas na haste polida são registradas durante um ciclo completo (durante o “*upstroke*” e “*downstroke*”). Com base nestas leituras, pode-se inferir a CDF (BEZERRA, 2002).

Os dados das cartas dinamométricas de cada poço, após serem coletados por um CLP Mestre, se tornam visíveis a partir de um SSC central. Estas cartas podem ser analisadas

visualmente por um especialista ou por algoritmos baseados no reconhecimento de padrões, que indicam os possíveis diagnósticos e ações mais adequadas.

Entretanto, esta análise puramente remota nem sempre é suficiente para identificar um problema, já que os dados obtidos representam as informações de um conjunto (nó) de poços analisados, e não de cada poço individualmente. Desta forma, para identificar qual poço está operando fora das condições normais, muitas vezes ainda se faz necessário o teste local. Em contrapartida, caso um ou mais poços não operem nas condições normais e ainda assim o nó consiga manter a média de produção, dificilmente o problema será detectado, ou poderá ser detectado com um atraso muito grande.

Além disso, este controle nem sempre ocorre de forma precisa e eficiente já que esta arquitetura, quando automatizada, é tipicamente mestre-escravo, e os controladores locais não dispõem de autonomia suficiente para tomar uma decisão crítica de controle.

A automatização de poços está caracterizada pela utilização de instrumentos e sensores que têm o objetivo de monitorar algumas variáveis de interesse referentes ao processo. Na elevação por bombeio mecânico, pelo menos duas medições estão disponíveis, mediante o uso de sensores: posição e carga referidas à haste polida. Estas são medidas na superfície e correspondem aos dados fornecidos para a geração da CDS. A carta de fundo é calculada a partir desses dados fornecidos na superfície utilizando modelos para o movimento dinâmico da coluna de hastes (ORDONEZ, 2008).

Para o controle do sistema de bombeio é importante contar com sensores de fundo, principalmente sobre a pressão no fundo do poço, já que a propagação de efeitos até a superfície pela coluna de hastes pode sofrer alterações significativas. Vários esforços foram realizados com intuito de obter dados consistentes sobre a pressão de fundo, dentre eles, usando a medição direta com sensores e transdutores de pressão, ou através de métodos indiretos, usando modelos e equacionamentos matemáticos (ORDONEZ, 2008). No entanto, problemas de custo e disponibilidade ainda inibem o uso desses sensores.

Em poços que operam com o SBM, as CDS e CDF, que efetivamente auxiliam no controle, são utilizadas como principais ferramentas de controle e monitoramento. Dado seu histórico de uso, admite-se que elas representam um correto diagnóstico sobre o funcionamento dos componentes da bomba de fundo e, portanto, acerca do desempenho de bombeio (ORDONEZ, 2008).

Um dos principais problemas de eficiência é o enchimento incompleto da bomba. Isto é causado quando a capacidade da bomba excede a produção do reservatório, ou também existe uma pobre separação de gás na entrada da bomba, e assim, perde-se um pouco de

deslocamento útil do pistão devido à interferência do gás, além de problemas como a pancada de fluido e os desgastes nos componentes da bomba. O primeiro passo é minimizar qualquer interferência de gás na bomba, e livrar a bomba de problemas mecânicos. O passo seguinte consiste em otimizar o deslocamento da bomba para remover todo fluido disponível no poço apto para elevação (ORDONEZ, 2008).

Já o monitoramento da pressão de fundo em tempo real permite maximizar a produção de óleo, minimizar os custos operacionais e estender a vida útil dos equipamentos envolvidos diretamente no SBM, já que existe uma correlação entre o comportamento da pressão de fundo e a condição de operação da bomba de fundo. Conseqüentemente, o comportamento dinâmico da pressão de fundo rapidamente é afetado por qualquer discrepância na operação da UB (ORDONEZ, 2008).

A velocidade da UB é medida em CPM e, com a instalação de um variador de frequência na superfície junto a UB, pode ser ajustada continuamente, variando a vazão de produção de forma suave, através de um controle VSD (*Variable Speed Drive*), e não de forma discreta, como ocorre utilizando-se o controle *pump-off* (bombeamento total ou nulo). O controle VSD permite uma maior flexibilidade ao projeto, uma vez que, para manter o nível desejado no anular do poço de produção, pode-se ajustar a velocidade de bombeio, e conseqüentemente a vazão de óleo, conforme a necessidade de controle. Esta estratégia é bem empregada quando existe informação sobre a pressão de fundo e permite configurar a capacidade de bombeamento conforme a dinâmica do nível do anular (ORDONEZ, 2008)

Alguns trabalhos com o controle VSD indicam os benefícios que os variadores de frequência propiciam ao controle da unidade, destacando a estabilidade que o controle proporciona à vazão de saída, mesmo com alguma presença de gás no fluido. O intuito é melhorar o comportamento do sistema em aspectos tais como otimização da produção, diminuição dos custos de manutenção e utilização racional de energia elétrica. A partir deste controle, também é possível inferir resultados sobre outras características importantes do sistema como problemas nas válvulas de pé e passeio, parâmetros elétricos do motor e o comportamento da bomba (ORDONEZ, 2008).

2) Estações de Coleta (ECO)

As ECOs são responsáveis pela coleta do petróleo de um ou mais campos produtores, e pela separação e distribuição do fluido nas fases gasosa (GN) e líquida (óleo e água produzidos). Compostas por *manifolds* de entrada de óleo, vasos separadores (separador

gás/óleo e gás *scrubber* – separador bifásico utilizado para separação fina de gás), tanques de armazenamento local, dutos por onde o óleo é escoado, *manifolds* de saída de GN, para poços GL, e um conjunto relevante de bombas de transferência, que são utilizadas para realizar o transporte do fluido pelos dutos para outras estações (Figura 64). Além disso, contém dispositivos auxiliares e de monitoramento, como medidores de vazão, pressão e nível (ARAUJO, 2007; BARRETTO, 2008).

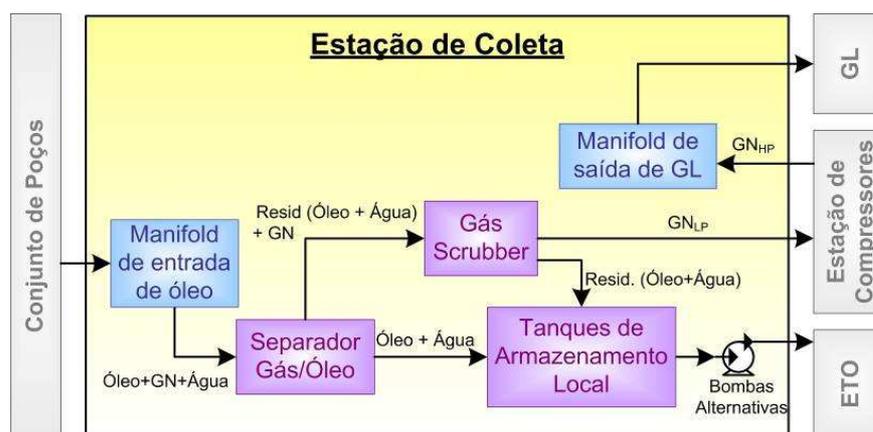


Figura 64 – Visão geral de uma estação de coleta simples

É composta por *manifolds* de entrada de óleo, vasos separadores (separador gás/óleo e gás *scrubber* – separador bifásico utilizado para separação fina de gás), tanques de armazenamento local, dutos por onde o óleo é escoado, *manifolds* de saída de GN, para poços GL, e um conjunto relevante de bombas de transferência, que são utilizadas para realizar o transporte do fluido pelos dutos para outras estações. Além disso, contém dispositivos auxiliares e de monitoramento, como medidores de vazão, pressão e nível (ARAUJO, 2007; BARRETTO, 2008).

Algumas ECOs possuem também equipamentos para realizar tratamento do óleo antes de bombeá-lo para a estação seguinte, de forma a minimizar o percentual de água presente no óleo, de acordo com os padrões de qualidade definidos pelas refinarias (ARAUJO, 2007; BARRETTO, 2008).

3) Estações de Tratamento de Óleo (ETO)

Uma ETO realiza o tratamento do fluido coletado separando óleo e água, e armazena localmente as duas fases do fluido, em tanques de óleo e de água produzida, respectivamente. É composta pelos seguintes elementos principais (Figura 65): tanques de

chegada da mistura óleo+água, tratadores de óleo, tanques de óleo, tanques de água produzida e bombas alternativas, para transferência às EIAs e aos Parques de Armazenamento. Nos tratadores de óleo, podem ser injetados tensoativos para auxiliar na separação da mistura óleo+água, através do aumento da tensão superficial da mistura.



Figura 65 – Visão geral de uma estação de tratamento

4) Elementos principais da produção

Os elementos principais envolvidos na produção de óleo a serem considerados são: o fluido escoado, bombas, dutos, tanques e vasos (separadores e tratadores).

a) Fluido

Embora o fluido não represente um elemento fixo da malha, constitui um componente de grande relevância para o modelo, pois suas características determinam o comportamento do escoamento e a interação com cada elemento da malha (ARAUJO, 2007).

Em se tratando de produção de óleos de base parafínica (a exemplo dos óleos produzidos na Bahia), é importante controlar a temperatura do fluido em unidades de armazenamento, para evitar que o óleo parafine e a produção seja comprometida. Nestes casos, se o processo de aquecimento das unidades de armazenamento for interrompido, o óleo tem que ser transferido, quer seja para outro tanque (da ECO, ETO, ou Parque de Armazenamento) ou para outra unidade, de forma a não haver perda de produção por parafinação. Em se tratando de campos de produção cujo óleo é de base asfáltica ou de base naftênica, o controle de temperatura dos tanques não é tão crítico (BARRETTO, 2008).

b) Bombas

Uma bomba pode assumir a condição ligada ou desligada e, em muitos casos, permitem fluxo controlável (por exemplo, com acionamento por variadores de frequência). O

número de intervenções e chaveamentos* deve ser em menor número possível, evitando desgaste do motor que impulsiona os equipamentos. Caso a bomba se encontre desligada, considera-se que não há vazão de fluido pela bomba (ARAÚJO, 2007).

Araújo (2007) classifica as bombas utilizadas neste sistema em dois grupos:

- Centrífugas: fornecem energia cinética ao fluido, através da rotação de um impelidor, e pelo aumento progressivo na área de escoamento, provoca a queda de velocidade e o aumento de pressão do fluido.
- Volumétricas: podem ser de princípio alternativo ou rotativo, e trabalham injetando um volume praticamente constante de fluido, permitindo uma variação da pressão na malha mais acentuada do que as centrífugas.

c) Dutos

Os dutos são elementos de conexão entre bombas e tanques. A pressão nos dutos deve ser controlada para evitar rompimentos, que causariam vazamento do fluido bombeado, devendo-se obter as vazões e pressões da malha em cada ponto de interesse (ARAÚJO, 2007).

d) Tanques

Os tanques são os elementos que armazenam o fluido nas estações, podendo ser utilizados de forma independente ou em grupos, sendo conectados por vasos comunicantes, quando necessário. Quando se trata de fluido monofásico, a transferência de fluido entre tanques e dutos ocorre em geral na parte inferior do tanque (ARAÚJO, 2007).

Dentre as principais variáveis a serem controladas em um tanque estão:

- Temperatura: nível máximo e mínimo;
- Pressão interna: nível máximo e mínimo;
- Nível de óleo: máximo e mínimo.

Em malhas de produção, normalmente são utilizados os tanques do tipo cilíndrico com teto fixo e selados com GN para controle da pressão interna. À medida que o nível de óleo baixa, o sistema de selo preenche o tanque com GN, evitando que ele sofra um colapso, devido à diminuição da pressão interna⁴ e à formação de vácuo. Da mesma forma, quando o

⁴ A pressão interna deve ser levemente superior à pressão atmosférica, para evitar que, em caso de falha de integridade no costado (parede cilíndrica lateral do tanque), o ar atmosférico entre no tanque formando uma mistura explosiva.

nível de óleo do tanque aumenta e a pressão interna aumenta, o sistema de selo retira GN, evitando que o tanque estoure (BARRETTO, 2008).

O nível superior dos tanques, obtido através de sensores de nível, não deve ser ultrapassado, para que não haja transbordo. Já o nível mínimo nos tanques da ETO deve ser controlado, de forma a não faltar fluido a ser tratado, o que poderia ocasionar em danos aos equipamentos à operação em si (ARAUJO, 2007).

O controle da temperatura é importante, em especial em se tratando de uma produção de óleo de base parafínica, pois se a temperatura baixar demais, o óleo parafina e a produção é perdida. Já se a temperatura aumentar demais, o óleo pode alcançar o ponto de fulgor, passando a haver o risco de incêndio⁵ (BARRETTO, 2008).

e) Vasos (separadores e tratadores)

Os vasos separadores são equipamentos de grande importância em uma estação de produção, podendo se apresentar como: separador gravitacional e tratador de óleo.

Os separadores gravitacionais são projetados para trabalharem a temperaturas e pressões razoavelmente elevadas, além de promoverem, em seu interior, o padrão de fluxo desejado para a segregação gravitacional. Apresentam formato cilíndrico e removem grande parte da água e do gás presentes no óleo (RAMALHO, 2000).

Apesar da relativa simplicidade dos processos de separação, as plantas operam com grande variação de vazão, devido às características dos métodos de elevação e escoamento dos poços produtores. Possuem também uma forte interferência entre as malhas de controle de pressão de gás e nível do óleo devido ao escoamento entre vasos separadores ser feito pela pressão do gás e não por bombeamento (BORGES FILHO, 2003).

Os tratadores de óleo eletrostáticos (mais comumente utilizados) são vasos cilíndricos horizontais que trabalham completamente cheios de líquido e com o escoamento feito pela pressão do separador. Utilizam placas paralelas com tensão elétrica alternada para separar a água do óleo. Possuem uma única malha de controle de interface óleo/água atuando na saída de água. O nível deve ser controlado em faixa estreita, pois com nível alto a água atinge as placas elétricas e com nível baixo o óleo contaminaria a água a ser descartada. Na saída de óleo, está instalada a válvula de controle de nível do separador. Estas duas malhas interagem entre si. Para que esta interação seja mínima, a vazão de líquido na entrada do tratador já deve estar estabilizada (BORGES FILHO, 2003).

⁵ O risco de incêndio existe se além da alta temperatura, houver uma falha de integridade no costado do tanque que permita a entrada de ar e problemas no sistema de selo de GN.