

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
PROGRAMA DE ESPECIALIZAÇÃO
III CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

RONALD PIOLI FREITAS

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS DA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL
APLICADAS AO FUNCIONAMENTO DE UM COMPRESSOR
ALTERNATIVO ACIONADO POR MOTOR ELÉTRICO SÍNCRONO
*BRUSHLESS***

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2012

RONALD PIOLI FREITAS

**MAPEAMENTO DAS ÁREAS DA AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL
APLICADAS AO FUNCIONAMENTO DE UM COMPRESSOR
ALTERNATIVO ACIONADO POR MOTOR ELÉTRICO SÍNCRONO
*BRUSHLESS***

Monografia apresentada ao Programa de Especialização como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof^o Dr. Joaquim Eloir Rocha

CURITIBA
2012

Dedicatória

Aos meus familiares que estão sempre ao meu lado e àqueles que
já não se encontram mais nesta vida há certo tempo.
Aos professores, mestres e amigos que estiveram e ainda continuam ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradecer a Deus.

Aos meus familiares e amigos, pelo apoio, paciência e entendimento nos momentos mais difíceis e inusitados.

Ao meu orientador, Prof^o Dr. Joaquim, pela tranquilidade, paciência e suporte nos momentos decisivos do desenvolvimento desta monografia.

Ao corpo docente do curso de Especialização em Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Aos professores que compõe a banca examinadora pela compreensão e oportunidade.

Aos diversos profissionais com atuação de campo pelos ensinamentos práticos e técnicos nas diversas áreas do conhecimento.

A Primeira Partida

A partida de uma máquina nova requer mais cuidados que
uma máquina mais antiga. De qualquer maneira a partida
é uma etapa de risco.

(NÓBREGA, Paulo Roberto Leite, 2011)

RESUMO

FREITAS, Ronald Pioli. Mapeamento das áreas da automação industrial aplicadas ao funcionamento de um compressor alternativo acionado por motor elétrico síncrono *brushless*. 2012. 174 f. Monografia apresentada ao Programa de Especialização – Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Esta monografia apresenta o mapeamento da automação industrial integrada a um equipamento de compressão de gases utilizados no processo petroquímico de beneficiamento de derivados de petróleo. A pesquisa realizada é de natureza científica aplicada, descritiva e explicativa, pois consiste em mapear as tecnologias utilizadas no controle e monitoração do funcionamento do compressor, assim como, identificar as relações existentes entre este equipamento e a unidade de processo produtivo para que a operação conjunta resulte em um sistema confiável e seguro operacionalmente. Nas conclusões serão apresentadas as particularidades das etapas realizadas para conseguir operacionalizar o equipamento e quais as relações estabelecidas entre as fundamentações teóricas da automação e a realidade aplicada na prática.

Palavras-chave: Motor elétrico síncrono *brushless*. Excitatriz *brushless*. Automação industrial de equipamentos. Compressores.

ABSTRACT

FREITAS, Ronald Pioli. Mapping areas of industrial automation applicable on a reciprocating compressor pushed by an electrical synchronous brushless motor. 2012. 174 f. Monografia apresentada ao Programa de Especialização – Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

This monograph show the mapping of industrial automation integrated on an equipment that compress gas to apply on petrochemical process of quality improvement of petroleum products. The research have a scientific applied nature, descriptive and elucidative, because consist on map technologies used on control and monitoring the compressor operation, as well as identify the relations that exists between this equipment and the process unit with the objective of both, process unit and compressor, operates together on a safety and reliable meaner. On the conclusions will be show the details of each step made to reach the objective of operates the equipment and which are the relations establish between automation fundamental theories and the conditions of field appliance.

Keywords: Electrical Synchronous Brushless Motor. Excitation Brushless. Industrial automation of equipment. Compressors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Camadas e hierarquias do CIM.....	25
Figura 2 – Enrolamento amortecedor de um rotor com pólos salientes.....	33
Figura 3 – Esquema de composição de um motor síncrono com excitação estática.....	34
Figura 4 – Exemplo de escovas de contato de campo.....	35
Figura 5 - Esquema de composição do motor síncrono com excitação <i>brushless</i>	36
Figura 6 – Roda de diodos da excitatriz de um motor do tipo <i>brushless</i>	36
Figura 7 – Modelo de máquina elétrica síncrona ideal.	39
Figura 8 – Fluxos do entreferro ao longo do eixo direto de uma máquina síncrona de pólos salientes.....	40
Figura 9 – Fluxo de entreferro ao longo do eixo em quadratura de uma máquina elétrica síncrona de pólos salientes.	41
Figura 10 – Representações (a) simbologia do SCR (b) representação das junções complementares (c) representação do dispositivo no arranjo de duplo transistor.	47
Figura 11 – Esquemático do arranjo de barra dupla com <i>by pass</i>	55
Figura 12 – Esquemático do arranjo de barra.	56
Figura 13 – Esquemático de arranjo secundário distribuído.....	57
Figura 14 – Esquemático do arranjo de secundário seletivo concentrado.....	57
Figura 15 – Detalhes em corte de cabo unipolar.....	59
Figura 16 – Arranjo de proteção diferencial (a) falha interna ao trecho protegido (b) falha externa ao trecho protegido.....	61
Figura 17 – Diagrama de blocos típico de um sistema de controle.	63
Figura 18 – Representação de contatos por diferentes fabricantes.....	67
Figura 19 – Programa em Linguagem LADDER.	68
Figura 20 – SDCD Honeywell modelo TDC.	70
Figura 21 – Esquemático da arquitetura SDCD.	72
Figura 22 – Exemplo de matriz de causa e efeito para unidade de processo.....	74
Figura 23 – Exemplo de parte de P&ID de processo.....	76
Figura 24 – Representação das camadas do modelo OSI.	80
Figura 25 – Modo de funcionamento do compressor de diafragma.....	87
Figura 26 – Compressor de pistão representado em corte (virabrequim, cruzeta, pistão e câmara).....	87
Figura 27 – Disposição das palhetas em um rotor de compressor de palhetas deslizantes.	88
Figura 28 – Representação do ciclo de compressão do compressor de palhetas.....	88
Figura 29 – Elementos de compressão (macho e fêmea) e forma de circulação do fluido em compressor parafuso.....	89
Figura 30 – Representação em corte dos internos do compressor de engrenagens e sentido de fluxo interno do fluido.	90
Figura 31 – Representação em corte do compressor <i>root</i> e maneira de funcionamento interno.	90
Figura 32 – Representação em corte do compressor de anel líquido e componentes internos.	91
Figura 33 – Exemplo de rotor utilizado em compressor axial.	92
Figura 34 – Esquemático em corte do compressor axial.....	92
Figura 35 - Rotor e carcaça, em corte, do compressor centrífugo.....	93
Figura 36 – Esquemático em corte dos internos do compressor centrífugo.	93
Figura 37 – Processo de destilação atmosférica – início dos processos modernos	102

Figura 38 – Esquema complementado com a destilação à vácuo e FCC.....	103
Figura 39 – Complementação do processo com a unidade de coqueamento.	104
Figura 40 – Complemento de processamento de coque e hidrotreatamento de instáveis....	104
Figura 41 – Esquemático para eletrólise da água	106
Figura 42 – Exemplo de forno reformador real aplicado ao setor petroquímico.....	109
Figura 43 – Esquema com as etapas de operação de uma PSA típica	112
Figura 44 – PSA aplicada ao setor petroquímico na purificação de hidrogênio.....	113
Figura 45 – Fluxograma básico de uma unidade de HDT	115
Figura 46 – Diversas fases durante o funcionamento do motor Diesel (admissão, compressão, potência e descarga).....	115
Figura 47 – Localização do compressor alternativo (vermelho) e centrífugo (azul).	121
Figura 48 – Representação da divisão em níveis hierárquicos do sistema de automação.	123
Figura 49 – Exemplo de I/Os em grande quantidade conectados aos cartões.	125
Figura 50 - Exemplo de Telas SDCD Real.....	125
Figura 51 – Equipamento aplicável em um SIS.....	127
Figura 52 – Exemplo de compressor instalado em campo.	128
Figura 53 – Compressor apresentando, exclusivamente, a região mecânica destinada a compressão e acessórios (instrumentos, válvulas de controle etc.).....	129
Figura 54 – Representação em corte de um cilindro com pistão de dupla ação.....	130
Figura 55 – Compressor alternativo com corte apresentando componentes mecânicos internos.	131
Figura 56 – Software de programação para CLP compilando um programa em LADDER.	133
Figura 57 – Esquemático demonstrando o sistema de controle de capacidade integrado ao processo (SDCD ou DCS).....	138
Figura 58 – Exemplos de válvulas e constituintes aplicadas em compressores.	139
Figura 59 – Exemplo de um sistema de controle de capacidade.	140
Figura 60 – Exemplos reais de aplicação do sistema de controle de capacidade por diferentes fabricantes.	140
Figura 61 – Fluxograma de um sistema de purga aplicado a um motor – em vermelho sinais disponíveis para intertravamento.....	144
Figura 62 – Disposição do sistema de purga (azul) em relação a um motor elétrico e sinais disponíveis para intertravamento (vermelho).....	145
Figura 63 – Exemplo de CCM com gavetas extraíveis.....	148
Figura 64 – Unifilar Básico de interligação dos elementos do motor síncrono <i>brushless</i>	151
Figura 65 – Esquemático do circuito girante (excitatriz) para um motor elétrico.....	153
Figura 66 – Exemplo de esquemático funcional para um controlador de tensão de campo da excitatriz.	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funções de proteção padronizadas.	60
Tabela 2 – Limites operacionais para tipos de compressores.	86
Tabela 3 – Frações típicas na destilação do petróleo.	100
Tabela 4 – Composição básica do petróleo cru.	101
Tabela 5 – Composição do gás natural (% em mol).....	108

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva característica de conjugado versus ângulo de carga	31
Gráfico 2 – Curva característica de um dispositivo SCR.	47
Gráfico 3 – Representação da curva ideal para o SCR.....	48
Gráfico 4 – Sinal HART e analógico 4 a 20 mA transmitido conjunta.	83
Gráfico 5 – Plano de Clapeyron (volume versus pressão), fases de funcionamento de um compressor alternativo.	95
Gráfico 6 – Diagrama pressão versus volume (PxV) representando sistema real e com perdas.	96
Gráfico 7 – Distribuição da produção de derivados de petróleo para fins energéticos – dados do ano de 2011.	116

LISTA DE BREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
CCC	Casa Central de Controle
CCL	Casa de Controle Local
CCM	Centro de Controle de Motores
CIC	Centro Integrado de Controle
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CLP	Controlado Lógico Programável
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
CPU	<i>Central Process Unit</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
DCS	<i>Distributed Control System</i>
DDC	<i>Direct Digital Control</i>
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DOU	Diário Oficial da União
ECL	Estação de Controle Local
ESD	<i>Emergency Shutdown</i>
FCC	Craqueamento Catalítico Fluido
GIS	<i>Gas Insulated Substation</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GOOSE	<i>Generic Object Oriented Substation Event</i>
GTO	<i>Gate-Turnoff Thyristor</i>
HART	<i>Highway Addressable Remote Transducer</i>
HDR	Processos de Hidrorefino
HDT	Hidrotratamento
HDTI	Hidrotratamento de Instáveis
I/O	<i>Input and Output</i>
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>

IHM	<i>Interface Homem Máquina</i>
IP	<i>Ingress Protection, International Protection ou Index of Protection</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
MCT	<i>MOS-Controlled Thyristor</i>
MESG	Máximo Intrínseco Experimental Seguro
MMS	<i>Manufacturing Message Specification</i>
NC	Número de Cetano
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i>
PES	Sistema Eletrônico Programável
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>
PPM	Partes por milhão
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROFIBUS DP	<i>Decentralized Peripherals</i>
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
PSV	<i>Pressure Safety Valve</i>
PVC	Cloreto de Polivinila
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
SAS	Sistema de Automação da Subestação ou <i>Substation Automation System</i>
SCMD	Sistema de Comando e Monitoração Distribuído
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
SCS	<i>Silicon Controlled Switch</i>
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIS	Sistema Instrumentado de Segurança
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SMR	<i>Steam Methane Reforming</i>
TC	Transformador de Corrente
UCP	Unidade Central de Processamento
UGH	Unidade de Geração de Hidrogênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	TEMA	16
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	18
1.3	PROBLEMAS E PREMISSAS	18
1.4	OBJETIVO	21
1.4.1	Objetivo Específico	21
1.5	JUSTIFICATIVA	21
1.6	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	23
1.7	EMBASAMENTO TEÓRICO	24
1.8	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	28
2	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	30
2.1	MÁQUINAS SÍNCRONAS	30
2.1.1	Partida e Conjugado de Partida.....	32
2.1.2	Tipos de Excitatriz.....	34
2.1.3	Fator de Potência	36
2.2	TEORIA DAS DUAS REATÂNCIAS.....	38
2.3	TIRISTOR	46
2.3.1	O Retificador Controlado de Silício – SCR	46
2.4	CLASSIFICAÇÃO DE ÁREA.....	48
2.4.1	Equipamento com Invólucro Pressurizado – Ex-p.....	51
2.4.2	Grau de Proteção – Código IP	51
2.5	ARRANJOS DO SISTEMA DE POTÊNCIA.....	53
2.5.1	Barra Dupla com <i>By Pass</i>	55
2.5.2	Barra Dupla.....	55
2.5.3	Secundário Seletivo Distribuído	56
2.5.4	Secundário Seletivo Concentrado	57
2.6	CABOS E MUFLAS	58
2.7	SISTEMA DE PROTEÇÃO	59
2.7.1	Proteção Diferencial	61
2.8	AUTOMAÇÃO.....	62
2.8.1	Sistemas de Controle.....	63
2.8.2	Controlador Lógico Programável – CLP.....	65
2.8.2.1	Breve Histórico	65
2.8.2.2	Constituição Básica.....	66
2.8.2.3	Linguagem de Programação – LADDER	67
2.8.3	Arquitetura dos Sistemas de Controle	68
2.8.3.1	Breve Histórico do SDCD	69
2.8.3.2	Sistema Digital de Controle Distribuído – SDCD	70
2.8.3.3	Sistemas de Segurança e Intertravamento	72
2.8.4	Instrumentação	74
2.9	REDES DE COMUNICAÇÃO	76
2.9.1	Topologias de Rede	77
2.9.2	Protocolos	78
2.9.3	Modelo OSI Conforme Norma ISO	78

2.9.4	Ethernet.....	80
2.9.5	Protocolo IEC 61850.....	81
2.9.6	HART.....	82
2.9.7	MODBUS.....	83
2.9.8	Profibus.....	84
2.9.8.1	Profibus DP.....	84
2.10	COMPRESSORES.....	85
2.10.1	Compressores Volumétricos.....	86
2.10.1.1	Alternativo de Diafragma.....	86
2.10.1.2	Alternativo de Pistão.....	87
2.10.1.3	Palhetas Deslizantes.....	88
2.10.1.4	Parafuso.....	88
2.10.1.5	Lóbulos ou Engrenagens.....	89
2.10.1.6	Anel Líquido.....	90
2.10.2	Compressor Dinâmico.....	91
2.10.2.1	Axial.....	91
2.10.2.2	Centrífugo.....	92
2.10.3	Diagrama Teórico.....	94
2.10.4	Diagrama Real.....	95
3	O CONTEXTO DE PRODUÇÃO – PETRÓLEO.....	97
3.1	HISTÓRICO NO MUNDO.....	97
3.2	HISTÓRICO NO BRASIL.....	98
3.3	O PETRÓLEO, REFINO E DERIVADOS.....	99
3.3.1	O Petróleo e o Refino.....	99
3.3.2	O Hidrogênio.....	105
3.3.3	Forno Reformador.....	107
3.3.4	<i>Pressure Swing Adsorption – PSA</i>	110
3.3.5	HDTI de Diesel.....	113
3.3.5.1	Motor Diesel.....	115
3.3.5.2	Legislação e Qualidade do Óleo Diesel.....	116
3.3.5.3	Número de Cetano (NC).....	118
4	CASO DE ESTUDO.....	119
4.1	UNIDADE DE PROCESSO.....	119
4.1.1	Contexto do Processo.....	120
4.1.2	Empregabilidade Direta do HDTI.....	122
4.1.3	Arquitetura de Automação do Processo.....	122
4.1.3.1	SDCD.....	123
4.1.3.2	Intertravamento e SIS.....	126
4.2	O COMPRESSOR.....	127
4.2.1	Descritivo Mecânico do Compressor.....	128
4.2.2	Acionamento do Conjunto Mecânico.....	131
4.2.3	O Controle – CLP.....	132
4.2.3.1	Painel Local.....	134
4.2.3.2	Intertravamento e Procedimento de Partida.....	134
4.2.3.3	Sistema de Controle de Capacidade.....	137

4.2.4	Interfaces de Comissionamento.....	140
4.3	MOTOR ELÉTRICO.....	141
4.3.1	Motor elétrico e Classificação de Áreas.....	143
4.3.2	Cargas Auxiliares	146
4.3.3	Manobras Pré-partida do Motor Principal.....	148
4.3.4	Acionamento do Motor Principal.....	150
4.3.5	Proteções para o Motor Principal	154
5	CONCLUSÕES	158
5.1	considerações finais e reflexões.....	160
5.1.1	Instrumentação	160
5.1.2	SDCD.....	161
5.1.3	Sistemas Sequenciais com CLPs	161
5.1.4	Acionamentos Elétricos.....	162
5.1.5	Fundamentos de Controle.....	162
5.1.6	<i>Foundation Fieldbus</i>	163
5.1.7	Sintonia de Controladores.....	163
5.1.8	Redes.....	163
5.1.9	Metodologia de Pesquisa	164
5.1.10	Tópicos Especiais.....	164
5.1.11	Considerações Finais	165
	REFERÊNCIAS.....	166

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as principais delimitações do desenvolvimento desta monografia, ou seja, são apresentados o tema com as respectivas delimitações e premissas, o objetivo macro e o específico, a justificativa para o desenvolvimento do tema proposto e a forma de desenvolvimento, representado pelo embasamento teórico e a estrutura geral do trabalho.

1.1 TEMA

Esta monografia apresenta o mapeamento da automação empregada no controle operacional de um compressor alternativo acionado por motor elétrico síncrono *brushless* empregado na compressão de hidrogênio aplicado ao processamento, beneficiamento, de derivados de petróleo.

Atualmente a automação está presente praticamente em todos os lugares e faz parte do cotidiano das pessoas, mesmo que de modo despercebido, pois em bancos, supermercados, hospitais, bibliotecas, restaurantes e entre muitos outros lugares, a automação está presente e é caracterizada pela presença e utilização de computadores que facilitam a vida de todos. No tocante à indústria, com o desenvolvimento da tecnologia dos computadores, em especial os controladores lógico programável (CLP) foi possível a produção e o controle de processos que seriam impossíveis se não fossem realizados de modo automático (ALBUQUERQUE E ALEXANDRIA, 2009).

Em paralelo com a revolução ocorrida com os computadores, o modo como são aplicados e o advento da Internet e das redes, é crescente a demanda por integração dos sistemas para que possam trabalhar integrados – em rede. Atualmente os diversos dispositivos industriais, como por exemplo, CLPs, inversores de frequência, interface homem máquina (IHM), sistemas supervisórios etc., formam complexas e grandes redes industriais nas quais a informação circula entre as diversas camadas da arquitetura de automação industrial (ALBUQUERQUE E ALEXANDRIA, 2009).

Mundialmente os governos estão realizando esforços para reduzir a emissão de gases poluentes e incentivar ações e produtos que sejam ambientalmente corretos, ou seja, gerem quantidade menor de poluentes nocivos (CRUZ, 2010). No

Brasil, legislações, como por exemplo, a Resolução nº 315 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), modificaram as exigências de qualidade de combustíveis e estabeleceram metas para redução na emissão de poluentes por veículos automotores (BRASIL, 2002). Em especial para a redução de enxofre do óleo Diesel, o processo mais empregado é o hidrotreatamento que consiste na injeção de hidrogênio em conjunto com o combustível para remoção do enxofre (CRUZ, 2010).

O motor síncrono começou a ficar mais evidente a partir do começo do século XX, quando o sistema de transmissão começou a mudar para a condição de corrente alternada (GOMES, 2010). Conforme as diversas aplicações foram surgindo, os diferentes conjuntos auxiliares e de controle foram surgindo para complementar e aprimorar o funcionamento básico deste tipo de motor. No início eram apenas geradores montados no eixo girante da máquina. Este sistema acoplado ao eixo trazia algumas dificuldades devido à necessidade de escovas para realizar o contato físico do sistema (GOMES, 2010).

Este tipo de acoplamento físico possui inconvenientes diversos, como número elevado de escovas, dependendo da corrente aplicada; desgaste natural dos materiais; dificuldades tecnológicas para máquinas que operam em altas rotações; ocorrência de centelhamento nos contatos e consequente necessidade frequente de manutenção (GOMES, 2010). Para solucionar estas dificuldades foram desenvolvidos sistemas de excitação utilizando corrente alternada e retificadores, sendo os principais modos: excitação estática com utilização de tiristores e excitatriz rotativa (sistema *brushless*) (GOMES, 2010).

Conforme descrito anteriormente, é possível perceber que a automação industrial aliada aos processos produtivos pode ser aplicada nos mais diversos ramos industriais, incluindo controle de processos complexos e que necessitam operar de modo contínuo, trazendo uma série de vantagens. Todas estas vantagens de controle e integração com o processo potencializaram a complexidade de sistemas que já eram de grande porte devido à própria natureza e a necessidade de compatibilidade entre os diversos sistemas para o funcionamento conjunto. Neste contexto, surge a oportunidade de propor nesta monografia o mapeamento das áreas da automação industrial aplicada ao compressor alternativo empregado no setor petroquímico para compressão de hidrogênio utilizado no refino de derivados de petróleo.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O mapeamento das áreas da automação industrial utilizadas para operacionalização do compressor consistirá no levantamento dos elementos utilizados para medição das grandezas de interesse, formas de comunicação utilizadas entre dispositivos instalados em campo e o CLP e formas de programação utilizadas no dispositivo de controle (CLP). Além do levantamento referente ao próprio compressor, serão identificadas as relações existentes e necessárias entre o equipamento e a unidade de processo produtivo para que estas duas partes operem em conjunto e de maneira segura.

De modo complementar, será realizada a explicação do contexto mecânico do conjunto de compressão que é controlado justamente pela automação do equipamento a qual permite funcionamento de maneira estável e segura uma vez que o equipamento comprime gás a pressões elevadas e necessita estar intrertravado internamente e também em conjunto com a unidade de processo.

O conjunto de compressão (mecânico), o motor elétrico (acionador) e a unidade de processo em análise fazem parte das instalações de uma planta industrial petroquímica maior e o compressor do tipo alternativo é utilizado na compressão de hidrogênio para hidrotreatamento de óleo Diesel. Todo o conjunto eletro-mecânico está instalado, em funcionamento e locado em uma casa exclusiva para compressores na planta industrial instalada no município de Araucária, sendo a alimentação elétrica e controle do equipamento e da unidade de processo providos por uma subestação e casa de controle local (CCL) na área exclusiva para unidade operacional.

As características particulares do processo industrial implicam na necessidade de existirem configurações redundantes, desde dispositivos simples até mesmo para este equipamento complexo e de grande porte, por isso existem dois conjuntos eletromecânicos instalados na planta.

1.3 PROBLEMAS E PREMISSAS

Atualmente os sistemas de controle distribuídos (SDCD) reúnem inúmeras malhas de controle agregadas em grupos com configurações e controles particulares, sendo que a comunicação entre o campo e o controlador e entre controlador e as camadas hierárquicas mais superiores, ocorre por meio a utilização

de barramentos de comunicação que integram os múltiplos sistemas do processo sob controle e gerenciamento de camadas mais superiores (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

O petróleo bruto diretamente extraído do poço não possui aproveitamento prático para outro fim além da combustão, sendo formado por grande diversidade de tipos de hidrocarbonetos, com o emprego de técnicas de processamento é possível aplicação nas mais diversas áreas industriais e produtivas (BRASIL *et al*, 2012). Os diversos processos e complexos processos de refino empregam diferentes formas de transformação, como por exemplo, processos físicos de separação, elevação de temperatura, emprego de altas pressões, reações químicas com outros produtos e utilização de catalisadores de processo, para obter produtos mais elaborados e com maior gama de aplicações diretas e indiretas, ou seja, aplicação direta em outras áreas industriais (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2012). Todos estes processos envolvem controle de uma quantidade imensa de variáveis, utilização de instrumentação coerente com cada fase produtiva e controles modernos que permitam integração dos diversos sistemas das várias tecnologias disponíveis.

Os compressores alternativos possuem algumas características peculiares de desempenho, sendo uma delas a operação em uma grande faixa de pressão, mantendo-se a rotação provida pelo acionador em velocidade constante, a vazão do equipamento para o processo é praticamente constante (NÓBREGA, 2011). No entanto, em grande parte das aplicações, os processos ao qual o compressor é interligado necessitam de um cenário inverso, ou seja, a pressão da descarga do compressor deve permanecer constante enquanto a vazão do consumo varia, com este panorama é fundamental que o equipamento possua mecanismos de controle, o chamado controle de capacidade, a fim de variar a vazão e conseguir manter outras variáveis preservadas (NÓBREGA, 2011).

O conjunto mecânico do compressor alternativo é acionado por um motor elétrico de 5,8 megawatts de potência nominal, alimentado com tensão em 13,8 kilovolts, com sistema de partida direta, sistema independente de excitação de campo do tipo *brushless* e fator de potência unitário (podendo existir algumas adaptações durante a fase de projeto até implementação em campo) (ELETROMOTORES WEG², 19--).

Devido às particularidades, riscos e peculiaridades inerentes ao processo produtivo e a presença de hidrogênio na compressão, surge uma particularidade no

local de instalação da máquina, a condição da classificação de área, a qual exige cuidados especiais com todos os tipos de componentes eletro-eletrônicos instalados na região. Cuidados estes que iniciam na especificação dos dispositivos, passando pelo processo de instalação em campo de maneira correta e por fim culminando na forma de operação e manuseio dos dispositivos durante a possível presença de atmosfera explosiva.

A planta industrial de processo onde os equipamentos estão instalados é nova (recém construída) e está em fase inicial de operação com produto final já especificado. Devido às novas condições de legislação brasileira e pressões comerciais para garantir o abastecimento do mercado consumidor, surge um cenário que destaca a importância desta planta de processo de maneira que seja garantida a operação contínua e integrada desta unidade com as demais unidades.

Na planta de processo estão instalados dois compressores idênticos, visando garantir redundância e continuidade do processo produtivo, o evento de troca de carga entre os dois equipamentos representa risco operacional de parada da produção no caso de falha durante a execução da manobra, diretamente implicando na parada do processo produtivo da unidade e indiretamente em outras unidades.

Com um cenário envolvendo tantas variáveis e responsabilidades produtivas, riscos operacionais diretos, implicações e reflexos em outras unidades (intertravamento) e compromissos comerciais, é possível levantar alguns questionamentos: de que forma é realizado o controle das variáveis de determinado equipamento? Qual a arquitetura utilizada na automação e como realizar as comunicações entre os diversos sistemas?

Para mapear as formas de utilização da automação industrial necessárias à integração da automação, equipamento e unidade de processo, surge a proposição desta monografia. Será possível estabelecer relações entre as formas de controle do equipamento de compressão individualmente e em conjunto com a unidade (intertravamento), explicar e esclarecer o contexto de produção onde é aplicado o equipamento e particularidades sobre o motor elétrico responsável pelo acionamento do compressor.

1.4 OBJETIVO

Mapear as diversas áreas da automação industrial são necessárias ao funcionamento do compressor alternativo aplicado na compressão de hidrogênio no setor petroquímico, estabelecendo as relações existentes e necessárias ao funcionamento integrado do equipamento com a unidade de processo e quais as maneiras utilizadas na automação para realizar esta função. Também será apresentado o contexto do processo produtivo em que o equipamento está inserido para destacar a importância, criticidade e a empregabilidade do equipamento.

No contexto do funcionamento eletro-mecânico do compressor, descrever a forma funcional do conjunto mecânico de compressão e quanto ao acionador, o motor elétrico, relatar as características e particularidades elétricas da máquina.

1.4.1 Objetivo Específico

- Levantar elementos de automação industrial empregados no controle e monitoração do compressor, tanto com a pesquisa no projeto do equipamento quanto em campo diretamente envolvido com o procedimento para operacionalizar o equipamento;
- Identificar as relações existentes entre o funcionamento da máquina alternativa e a operação da unidade de modo confiável e seguro;
- Descrever o funcionamento do conjunto mecânico de compressão e do processo industrial de refino de derivados de petróleo o qual o compressor é utilizado para compressão de hidrogênio e
- Estabelecer as etapas desenvolvidas durante a fase de comissionamento do equipamento e quais as principais dificuldades encontradas durante esta fase.

1.5 JUSTIFICATIVA

Com os avanços da legislação ambiental e novas exigências para emissões de poluente por veículos automotores, surge a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias de motores a combustão interna (ciclo Otto), da mesma maneira como novos combustíveis com qualidade aprimorada são requisitados.

À medida que as exigências ficam mais rígidas, para o setor produtivo de derivados de petróleo, surgem novos desafios produtivos para produção de combustíveis com maior qualidade. Para alcançar este objetivo unidades de

processo já existentes necessitam ser modificadas (*revamps*) e novas unidades, que incorporam novas tecnologias de processo e de equipamentos, necessitam ser construídas e operacionalizadas atendendo os prazos estipulados pela legislação para comercialização destes produtos seguindo as novas especificações.

Em conjunto com este cenário, estão os novos avanços da tecnologia de equipamentos e dispositivos aplicáveis a indústria, disponibilizando uma gama enorme de opções de aplicação. Em plantas produtivas de grande porte é inevitável que aplicações de diferentes fabricantes operem em conjunto e de modo integrado, pois as exigências das novas arquiteturas de automação de processo operam segmentadas em camadas, porém com necessidades de franca comunicação entre as diversas hierarquias.

Considerando o aspecto produtivo de derivados de petróleo que aumentam a complexidade dos processos; o aumento da complexidade dos sistemas e arquiteturas de monitoramento e controle; utilização de equipamentos de grande porte necessários para atender as novas exigências e a necessidade crescente de integração entre todos estes sistemas de modo confiável, redundante e seguro, surge a necessidade do entendimento global do sistema de automação e de produção, da mesma forma que o profissional atuante na área de automação industrial necessita conhecer os fundamentos e as teorias de funcionamento dos dispositivos industriais.

Seguindo as considerações operacionais da planta industrial, outro desafio encontrado em processos produtivos contínuos está em que a complexidade dos processos e o tamanho das plantas industriais não permitem mais o controle de processo plenamente manual, tal tarefa é quase impraticável e de alto risco atualmente, tornando imprescindível o controle automático do processo. Além disso, controles utilizando CLP proporcionam melhor e mais confiável gerenciamento técnico e administrativo da planta de processo.

Sendo o controle computadorizado imprescindível, surge a enorme necessidade de continuidade e disponibilidade destes sistemas, com isso as arquiteturas da automação devem ser projetadas para atender critérios de confiabilidade e de redundância.

Outra consideração importante é que no setor petroquímico (refino de derivados de petróleo) do estado do Paraná este dois conjuntos eletromecânicos-motor e compressor – estão entre os maiores já instalados, isto apenas

considerando a potência elétrica do motor, o tipo do equipamento (compressor alternativo para hidrogênio) – e as consequências comerciais devido a uma parada produtiva são elementos que permitem fornecer uma referência da importância do equipamento na cadeia produtiva de derivados de petróleo (MARQUES *et al*, 2012).

Considerando o local de instalação e o tipo de gás comprimido para o processo produtivo (hidrogênio), a utilização de excitação do tipo *brushless* no motor elétrico é imprescindível em uma área classificada, pois a ausência de escovas e anéis coletores evita o surgimento de centelhamentos perigosos, os quais são inadmissíveis em um local de produção industrial com possibilidade de formação de atmosfera explosiva.

Além da condição do não centelhamento, a aplicação do motor do tipo Ex-p (pressurizado) torna-se fundamental, pois este sistema utiliza a purga com ar seco e puro no interior do motor para retirada de qualquer vestígio de gases perigosos e mantém a pressão após a purga, evitando a entrada de atmosferas potencialmente explosivas para o interior do motor, uma vez que a pressão no interior da carcaça é superior a pressão ambiente.

Outro ponto importante é referente a manutenção, que implica diretamente na parada e indisponibilidade operacional do equipamento, sem o sistema de escovas e anéis coletores não existe a necessidade de verificações periódicas ou preocupações com o sistema de contato. O sistema *brushless*, como na tradução literal do inglês para o português, ‘sem escovas’, ou seja, o próprio sistema de excitação fica na parte girante do motor – rotor – e à medida que rotor gira ocorre o acionamento da excitatriz e com a geração de tensão alternada (indução – sem contatos físicos) e subsequente retificação desta tensão para aplicação direta nos enrolamentos do rotor.

1.6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Conforme GIL (2010), seguindo a classificação elaborada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) esta monografia é classificada como sendo da área das Engenharias, em especial a Engenharia Elétrica – Automação Industrial. Apresenta pesquisa de natureza científica aplicada, inicialmente sendo realizada a pesquisa bibliográfica e documental sobre o tema – processamento de derivados de petróleo e derivados, em especial o processo de

hidrotratamento de diesel, funcionalidades de compressores alternativos, automação industrial e redes industriais e motores elétricos de indução e *brushless* – ou seja, busca documental e em livros, catálogos técnicos, especificações técnicas de projeto, fluxogramas e diagramas funcionais, visando identificar, principalmente, as áreas da automação envolvidas e a funcionalidade de equipamentos.

Em um segundo momento, a pesquisa será de campo com observação participativa, pois durante as fases de montagem, comissionamento e partida do equipamento de interesse – compressor alternativo – o autor estará diretamente ligado e vivenciando cada um dos eventos necessários a serem cumpridos para se conseguir obter êxito na partida, além do convívio com outros profissionais, incluindo outras áreas de atuação diferentes da automação e elétrica.

Quanto ao propósito da pesquisa, será explicativa e majoritariamente qualitativa, pois conforme GIL (2010), este tipo de pesquisa é o que mais se aprofunda no conhecimento das condições reais e sendo assim, conforme descrito nos objetivos, o mapeamento das áreas da automação industrial aplicadas ao equipamento dependerá muito da participação em campo das diversas atividades de montagem, comissionamento e partida do equipamento em si e da unidade de processo.

Com as atividade de campo será mais fácil identificar as relações entre as diversas tecnologias e topologias da arquitetura da automação, realizar o levantamento das tecnologias e equipamentos utilizados e estabelecer as relações globais entre a unidade de processo e o equipamento.

1.7 EMBASAMENTO TEÓRICO

A automação consiste em sistemas que possam substituir a função humana para potencializar a execução da tarefa com a mesma quantidade de pessoas, de maneira que, na área industrial, a automação contribui nos aspectos de redução de custos, flexibilidade da linha de produção, redução no volume dos equipamentos e consequente redução no espaço ocupado pela área produtiva e integração do sistema produtivo (MORAES e CASTRUCCI, 2007).

Sistemas produtivos ou industriais que são caracterizados pelo gerenciamento integrado dos processos dividido em diversas camadas as quais necessitam de diferentes protocolos para comunicação são conhecidos pelo nome

de manufatura integrada por computador (CIM – sigla do inglês *computer integrated manufacturing*) (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009). Para camadas mais baixas deste modelo, no nível de campo, existe pequena quantidade de dados a serem transmitidos, porém com grande quantidade de nós que interligam dispositivos, enquanto que nas camadas mais altas da hierarquia a quantidade de nós é muito menor, mas a quantidade de informação é muito elevada (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009). A Figura 1 demonstra a disposição das diversas camadas, os protocolos que podem realizar a interligação entre camadas e o volume proporcional de informação circulante conforme o nível hierárquico.

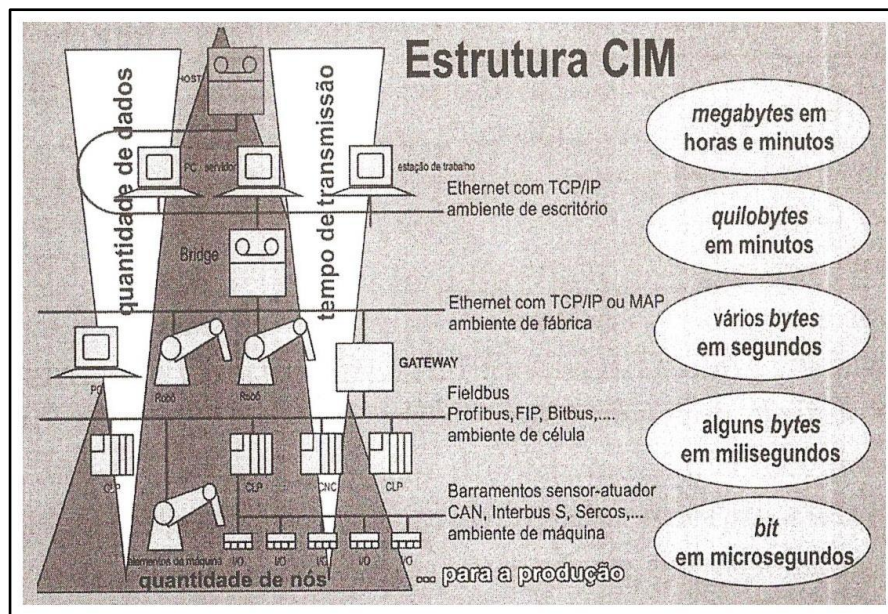


Figura 1 – Camadas e hierarquias do CIM.
FONTE: ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009, p. 27.

Com a implementação do CIM foi possível implementação realizar a distribuição do controle e centralização de macro-decisões possibilitando e facilitando o gerenciamento técnico e administrativo do processo produtivo (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

O processo conhecido como processos de hidrorefino (HDR) ou hidroprocessamento consiste na utilização de hidrogênio para tratar frações do petróleo, com o emprego de catalisadores, em condições determinadas pelo objetivo final, produto, a ser obtido após o processo de beneficiamento (BRASIL *et al*, 2012). Ainda conforme BRASIL *et al*, as unidades de hidrorefino são divididas em:

- Hidrotratamento (HDT) – possui como objetivo final melhorar as propriedades de determinado produto, porém sem alterar fortemente a faixa de destilação deste, e
- Hidroconversão (HCC) – com objetivo de obter frações mais leves e com melhor qualidade do que a carga utilizada neste tipo de unidade.

Unidades de hidrotratamento podem ser, convencionalmente, divididas em três seções principais, sendo, seção de reação de alta pressão, seção de separação de gases e fracionamento de baixa pressão (BRASIL *et al*, 2012). Para a unidade de HDT diversos são os equipamentos empregados no processo, como por exemplo, tanques, filtros, trocadores de calor, fornos e reatores, mas para garantir o fluxo de produto através das diversas seções de transformação dois equipamentos recebem destaque, a bomba de carga da unidade e os compressores de reciclo e de reposição de hidrogênio (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2012). Conforme explicado anteriormente o hidrogênio possui função fundamental no processo de hidrotratamento, e para a aplicação no processo, um tipo de equipamento específico é necessário, o compressor do tipo alternativo.

Hidrogênio de reposição (*make-up*) – [...] adicionado para repor o hidrogênio consumido nas reações, além das perdas no sistema. Compressores alternativos são utilizados para essa finalidade (BRASIL, ARAÚJO e SOUSA, 2012, p. 157).

Compressores alternativos possuem como finalidade básica a elevação de pressão de determinado volume de gás, para as mais diversas aplicações industriais, de modo que a energia mecânica fornecida por um acionador seja convertida em energia de pressão (NÓBREGA, 2011). Considerando que a compressão de um gás gera aumento de temperatura, quanto maior for o diferencial entre as pressões de sucção e de descarga maior será a temperatura final alcançada e por consequência maior será trabalho de compressão (NÓBREGA, 2011).

O motor elétrico síncrono é uma máquina elétrica capaz de converter formas de energia e cuja velocidade durante a operação em regime permanente é múltipla da frequência da corrente elétrica de alimentação do estator (FITZGERALD *et al*, 1975). Quando está sendo desenvolvida a velocidade síncrona – regime permanente – o campo magnético girante criado no estator está a mesma velocidade do campo magnético criado no rotor por meio da corrente de campo, sendo que esta interação resulta em conjugado constante (FITZGERALD *et al*, 1975). Esta é a maneira

fundamental de funcionamento de um motor síncrono quando em operação em regime permanente.

Outro momento durante a operação do motor elétrico que é tão crítica ou importante quanto o período em regime permanente, a partida. É neste instante, provavelmente durante a operação normal do motor, que o motor é submetido a uma condição mais severa de operação, conforme ELETROMOTORES WEG¹ (19--).

[...] para motores síncronos *brushless* o principal método empregado na partida é através da partida assíncrona, ou seja, o rotor é colocado na chamada condição de gaiola de esquilo (enrolamento do rotor curto-circuitado ou conectado a uma resistência) e o motor inicia a partida como um motor de indução [...] (ELETROMOTORES WEG¹, 19--).

Com a partida no modo assíncrono o motor atinge a velocidade próxima ao sincronismo e o valor de escorregamento reduz em relação ao campo girante do estator. No caso do motor *brushless*, é neste momento em que um circuito eletrônico de disparo, instalado no próprio eixo girante da máquina, aciona os dispositivos de potência que comutam a aplicação da corrente contínua do resistor de partida para os enrolamentos do rotor, atingindo a velocidade final e entrando em sincronismo (ELETROMOTORES WEG¹, 19--).

Os motores síncronos são máquinas elétricas que necessitam de uma fonte externa de corrente contínua para alimentar o enrolamento do rotor, sendo que esta alimentação poderá ser suprida através do conjunto de anéis coletores e escovas ou de um sistema girante sem escovas – *brushless* – sistema este que é abordado nesta pesquisa.

Em geral a excitatriz fica localizada na parte posterior do motor (oposta ao acoplamento mecânico), sendo que a excitatriz funciona como um gerador de corrente alternada em um sistema trifásico acoplado ao eixo do rotor. Este sistema trifásico possui um conjunto de elementos retificadores que retificam a corrente alternada e aplicam diretamente nos enrolamentos do rotor. A magnitude desta corrente de campo pode ser controlada através do sistema de retificação que aplica tensão nos enrolamentos de campo da excitatriz (ELETROMOTORES WEG¹, 19--).

A condição de não existir a necessidade de contatos diretos entre o controle de campo e o rotor – não existe necessidade de anéis coletores e escovas – implica na redução direta na manutenção da máquina, redução nos custos operacionais e condições muito propícias para aplicações em locais de risco, ou seja, aplicações

em indústrias de processo ou em no acionamento de equipamentos mecânicos que devido à finalidade de utilização podem apresentar o surgimento de atmosferas perigosas, o que implica na condição de classificação de área.

1.8 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta monografia está estruturada em cinco capítulos distribuídos em capítulo introdutório, embasamento teórico para os assuntos desenvolvidos na monografia, contexto produtivo e petróleo, caso de estudo e conclusões.

A Introdução contém de maneira detalhada o tema, problema abordado e as dificuldades do tema, objetivo da pesquisa realizada, justificativa para a escolha do tema desenvolvido, quais os procedimentos metodológicos empregados e a prévia do embasamento teórico utilizado.

O capítulo dois apresenta os conceitos fundamentais que embasam todas as análises durante o mapeamento e levantamento da automação aplicada ao equipamento de interesse desta monografia (compressor), conhecimentos necessários para identificar as relações entre as aplicações práticas e o conteúdo teórico e científico e conteúdos necessários a estabelecer correlação entre aplicação prática e conteúdos do curso de especialização – alvo desta monografia.

No capítulo três é apresentado o contexto no qual o compressor está inserido, ou seja, a aplicabilidade do equipamento no processo produtivo de refino de derivados de petróleo. Para descrever o contexto no qual o compressor está inserido serão realizados descritivos sobre: o início do processo produtivo do petróleo, composição básica e mais comum do petróleo, breve histórico das atividades petrolíferas no Brasil e no mundo, quais as formas e arranjos produtivos, legislações atuais para produção de combustíveis e alguns tipos de unidades de processo, em especial, a unidade geradora de hidrogênio (UGH) e a unidade de hidrotreatamento de instáveis (HDTI) que são unidades essenciais para realizar tratamento do óleo Diesel.

O capítulo quatro apresenta três divisões principais, das quais na primeira constam as informações sobre a automação relacionada ao processo produtivo e formas de controle utilizadas; na segunda parte estão reunidas informações sobre automação do compressor propriamente dito e explicações sobre o funcionamento mecânico do compressor; na terceira e última parte deste capítulo, constam explicações centradas no contexto do motor elétrico, envolvendo particularidades

construtivas, maneira de operacionalizar o equipamento e funcionamento da máquina elétrica.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões da monografia estabelecendo paralelo entre o mapeamento da automação empregada no equipamento com os conteúdos do curso de especialização do qual esta monografia é alvo.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os conhecimentos básicos utilizados no desenvolvimento desta monografia. Também estão inclusos os principais e fundamentais conhecimentos científicos necessários para o entendimento do caso em estudo.

2.1 MÁQUINAS SÍNCRONAS

Um motor elétrico síncrono é uma máquina de corrente alternada cuja velocidade na condição de regime permanente é proporcional à frequência da corrente da fonte de alimentação, no Brasil sendo o valor de 60 Hertz. Quando o sincronismo é atingido, a velocidade do campo girante gerado na armadura será a mesma do campo criado no rotor, originário da corrente de campo aplicada a máquina, sendo que nesta condição o conjugado da máquina é constante (FITZGERALD *et al*, 2006).

Na condição de regime de operação quando aplicadas correntes polifásicas no estator será produzido um campo girante que possui velocidade proporcional à frequência do sistema, conforme é possível analisar na equação (1), onde n representa a velocidade em rotação por minuto, f a frequência do sistema em Hertz, P o número de pólos s o escorregamento em porcentagem (FITZGERALD *et al*, 2006).

$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \cdot (1 - s) \quad (1)$$

No caso no rotor, a aplicação de corrente contínua também produzirá um campo magnético girante e para que o conjugado final seja estável os dois campos girantes devem estar a mesma velocidade. A implicação direta é no sistema mecânico da máquina, ou seja, o rotor do motor deverá girar a mesma velocidade do campo do estator o que implica em um conjugado constante independente das variações na carga do eixo (FITZGERALD *et al*, 2006).

Conforme apresentado em FITZGERALD *et al* (2006) a equação (2) apresenta a equação de conjugado de um motor síncrono, sendo:

$$T = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{P}{2}\right)^2 \cdot \phi_{er} \cdot F_r \cdot \sin \delta_r \quad (2)$$

onde T representa o torque, P o número de pólos, ϕ_{er} é o fluxo resultante produzido pelo efeito combinado das forças magnetomotrizes do rotor e estator, F_r é força magnetomotriz resultante e δ_r é o ângulo entre os eixos magnéticos.

Analisando os parâmetros da equação anterior é possível concluir que na condição da armadura conectado à alimentação com tensão e frequência constantes, o fluxo resultante no entreferro pode ser considerado constante, pois não depende de variáveis da carga, da mesma forma, a força magnetomotriz é determinada pela corrente de campo aplicada à máquina. Sendo assim, as variações no conjugado da carga dependem da resposta exclusiva do ângulo δ_r , como pode ser observado no Gráfico 1 (curva conjugado versus ângulo), na qual os valores positivos do torque representam o funcionamento da máquina elétrica como motor e no caso do ângulo δ_r , quando assumir valores positivos indica que a força magnetomotriz do rotor está atrasada em relação ao fluxo magnético do estator.

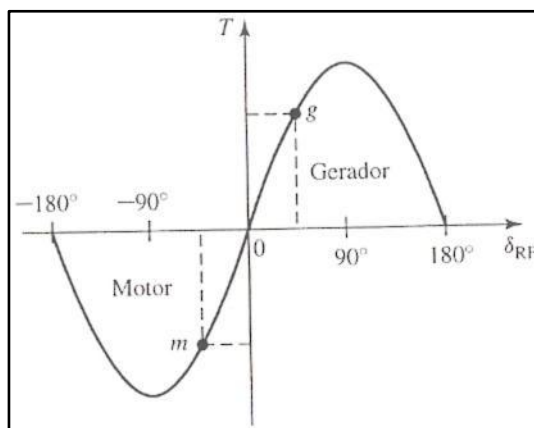


Gráfico 1 – Curva característica de conjugado versus ângulo de carga
Fonte: FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006, p.241.

Continuando a análise do gráfico anterior, para a partida de um motor com uma pequena carga acoplada ao eixo, um pequeno valor de ângulo (δ_r) será produzido, mas sendo suficiente para suprir o conjugado necessário para movimentação da carga. Porém este processo de ajuste de carga versus ângulo ocorre de maneira dinâmica, ou seja, conforme aumenta a carga no eixo é

necessário ocorrer um atraso no ângulo do campo para surgir um conjugado suficiente para suprir com torque adicional o eixo.

Esta oscilação dinâmica e instantânea que ocorre no rotor reflete uma condição mecânica no eixo ocorrendo a diminuição da velocidade por um breve instante até ocorrer a compensação do ângulo e aumento do conjugado, esta oscilação mecânica amortecida que ocorre é denominada em FITZGERALD *et al* (2006) como sendo chamada de oscilação pendular.

Para a condição do ângulo δ_r igual a 90° , ocorre a condição de máximo conjugado suprido pela máquina elétrica, o chamado conjugado máximo de em sincronismo, porém considerando a condição de tensão terminal e corrente de campo constantes. Na condição de exigência excessiva de torque no eixo do motor, ocorrerá a defasagem entre campos – entre os dois campos girantes que estão estacionários um relação ao outro (rotor e estator) – resultando na chamada perda de sincronismo, conforme definido em FITZGERALD *et al* (2006). Na ocorrência deste tipo de evento é que se demonstra necessária e fundamental a coordenação de proteção, pois o disjuntor principal que alimenta o motor deverá realizar o desligamento do motor preservando as condições eletrotécnicas do motor elétrico.

Estendo a análise do Gráfico 1 para a região negativa de torque e ângulo de carga (δ_r), a representação é característica do funcionamento de geradores, pois, na condição de operação, conectando o gerador em um sistema com frequência e tensão constantes e ainda sendo um sistema capaz de absorver ou suprir potência elétrica, no momento em que o rotor fosse movimentado mecanicamente por uma fonte externa a força magnetomotriz do rotor estaria a frente do campo resultante do estator. Neste caso em particular de operação como gerador, aplicando um conjugado superior ao conjugado de sincronismo da máquina, a velocidade do rotor aumenta rapidamente e um sistema de controle deve atuar rapidamente evitando danos mecânicos ao equipamento – velocidades perigosas ou disparo na velocidade causados devido à condições de instabilidade do sistema (OGATA,2000).

2.1.1 Partida e Conjugado de Partida

Considerando a equação (2), é possível perceber que um motor síncrono propriamente dito não possui conjugado de partida por si só, ou seja, para realizar a partida é necessário utilizar um artifício construtivo no qual são inseridas nas

sapatas polares do rotor o enrolamento em gaiola chamado de enrolamento amortecedor (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006).

Este enrolamento é constituído, geralmente, de barras instaladas na sapata polar e que são curto-circuitadas nas extremidades, sendo que no momento da partida do motor a excitação de campo está desabilitada e o motor, considerando que a carga e inércia não sejam demasiadas, inicia a partida como motor de indução até o momento em que a velocidade está próxima a de sincronismo, quando finalmente é aplicado o campo. O enrolamento amortecedor também garante condições de estabilidade à máquina no caso de ocorrerem oscilações abruptas na carga do eixo (ELETROMOTORES WEG¹, 19--).

A Figura 2 mostra a condição de instalação do enrolamento amortecedor na sapata polar do pólo e a interligação curto-circuitando o enrolamento.



Figura 2 – Enrolamento amortecedor de um rotor com pólos salientes.
Fonte: ELETROMOTORES WEG¹ (19--).

Continuando a análise do conjugado de partida versus a característica de partida como motor de indução com base em FITZGERALD *et al* (2006), considerando a equação 1 e observando que o fluxo resultante (ϕ_{er}) para a condição de tensão e frequência constantes aplicadas ao estator e que a força magnetomtriz é proporcional a corrente do rotor, possível reduzir a equação original a seguinte equação:

$$T = k \cdot I_r \cdot \sin \delta_r \quad (3)$$

Considerando o exposto até este ponto, é possível resumir que em uma máquina síncrona o conjugado eletromagnético gerado no rotor age de maneira a

buscar o alinhamento dos pólos com as ondas de fluxo do entreferro e de reação da armadura. Na condição dos pólos estarem adiantados em relação ao fluxo do entreferro, o conjugado eletromagnético agirá em oposição à rotação, então a máquina estará operando na função de gerador. Porém, na condição dos pólos estarem atrasados em relação a onda de fluxo, a máquina estará operando como motor (FITZGERALD, KINGSLEY, UMANS, 2006).

2.1.2 Tipos de Excitatriz

Para o funcionamento dos motores síncronos é necessária a utilização de uma fonte externa de corrente contínua para alimentar os enrolamentos do rotor, a chamada excitatriz. A potência da excitatriz de uma máquina síncrona é de apenas uma pequena porcentagem da potência total da máquina elétrica, sendo que esta potência pode ser suprida por meio de anéis coletores (escovas) ou de um gerador acoplado ao eixo girante (*brushless*), na qual o acoplamento é magnético (FITZGERALD, KINGSLEY, UMANS, 2006).

A chamada excitatriz estática ou com escovas é constituída por anéis coletores e escovas que permitem a conexão física entre o circuito do rotor (enrolamento de campo) e a fonte de alimentação (em geral conversor CA/CC) (ELETROMOTORES WEG¹, 19--). A Figura 3 mostra um esquemático de um motor com excitatriz do tipo estática, o regulador de fator de potência e a indicação de transformadores de corrente e de potencial para referenciar o regulador.

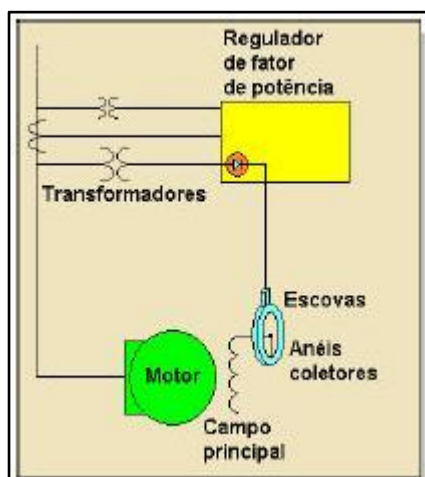


Figura 3 – Esquema de composição de um motor síncrono com excitação estática. Fonte: ELETROMOTORES WEG¹ (19--).

Na Figura 4 é possível observar as escovas que realizam o contato físico com os anéis coletores conectando a parte de controle da excitatriz aos enrolamentos do rotor (figura à esquerda) e o sistema *brushless* que não emprega contatos físicos (escovas) para realizar a conexão entre o controle e o campo do rotor (figura à direita).

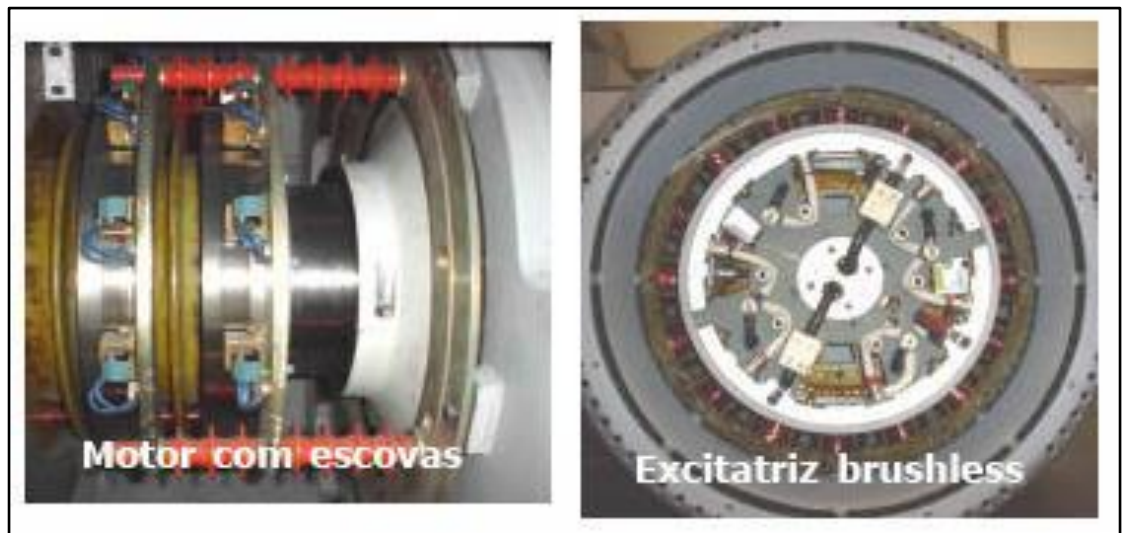


Figura 4 – Exemplo de escovas de contato de campo.
Fonte: ELETROMOTORES WEG¹ (19--).

No caso de motores síncronos com excitatriz do tipo *brushless* (sem escovas) a excitatriz fica acoplada ao eixo girante do rotor. Neste tipo de configuração de excitação de campo o regulador de fator de potência alimenta com corrente contínua a excitatriz que funciona como um gerador de corrente alternada trifásica. Conectado a este gerador está uma ponte de diodos que retifica a tensão antes da aplicação nos enrolamentos do rotor. O controle a aplicação da tensão no circuito de campo (rotor) é realizado por meio de dispositivos eletrônicos de potência, além disso, a amplitude de corrente pode ser controlada no circuito retificador (ELETROMOTORES WEG¹, 19--). Na Figura 5 é apresentado um diagrama esquemático de um motor síncrono com excitatriz do tipo *brushless*, sendo que de maneira similar ao diagrama da excitatriz estática, também estão representados os elementos de controle do sistema.

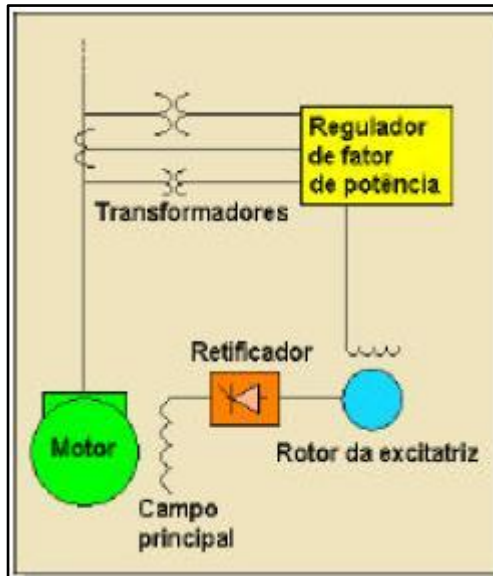


Figura 5 - Esquema de composição do motor síncrono com excitação *brushless*
 Fonte: ELETROMOTORES WEG¹ (19--).

A Figura 6 apresenta a roda de diodos de uma excitatriz do tipo *brushless* que possui os elementos retificadores fixados ao eixo do rotor girando de maneira solidária.



Figura 6 – Roda de diodos da excitatriz de um motor do tipo *brushless*.
 Fonte: ELETROMOTORES WEG⁴ (20--).

2.1.3 Fator de Potência

Em sistemas elétricos o fator de potência de operação das máquinas de corrente alternada – motores, transformadores, dispositivos do sistema potência, entre outros – é uma característica que deve ser considerada, principalmente devido ao aspecto econômico, pois existe o custo da energia reativa consumida por estes equipamentos e penalidades que podem ser aplicadas devido à carga estar abaixo de valores especificados. Estas condições exigem mais dos sistemas de geração e transmissão, pois estes sistemas não estão baseados apenas na potência ativa,

estão baseados na potência aparente a qual já considera o valor da energia reativa apresentada pela carga (consumo de corrente, principalmente, para magnetização de sistemas indutivos e perdas no cobre) (ELETROMOTORES WEG¹, 19--).

Continuando a análise agora com base em FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS (2006), o baixo fator de potência possui três principais impactos, sendo:

- As máquinas elétricas são especificadas em termos de potência aparente, pois as perdas magnéticas e por aquecimento são aproximadamente definidas pela tensão e corrente – impactando diretamente no tamanho e custo dos equipamentos;
- O baixo fator de potência indica maior consumo de corrente de maiores perdas no cobre ($I^2.R$) e
- Outra desvantagem está no impacto direto na regulação de tensão.

Para as máquinas elétricas a potência reativa pode ser visualizada em termos da relação entre esta potência reativa e o fluxo magnético. Para o funcionamento do equipamento é necessário ser estabelecida uma corrente magnetizante, não fazendo diferença se a aplicação no motor será no rotor ou no estator da mesma forma que não importa qual enrolamento (primário ou secundário) do transformador recebe a corrente de excitação, sendo que em suma, é a potência reativa atrasada que estabelece o fluxo no motor.

Considerando o motor de indução do tipo gaiola de esquilo a única maneira de aplicar a excitação é através do estator, sendo assim, o motor de indução precisa funcionar com fator de potência indutivo. Para a condição a vazio o fator de potência é muito baixo, porém a medida que é aplicada carga ao eixo este valor aumenta pois aumenta a solicitação de potência ativa. No caso do motor síncrono existem duas maneiras de suprir a excitação magnética, corrente alternada no estator ou corrente contínua aplicada ao rotor (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006).

Na condição da aplicação de corrente no rotor é exatamente suficiente para suprir a força magnetomotriz, então a corrente de magnetização (potência reativa) não é necessária e o motor estará funcionando com fator de potência unitário. No caso da corrente do rotor (campo) ser menor que o suficiente a força magnetomotriz precisará ser suprida pela armadura e o motor ficando com fator de potência atrasado (a máquina estará subexcitada). Na condição da corrente de campo ser superior aquela necessária o excedente da força magnetomotriz gerada deverá ser compensada pelo estator, surgindo uma componente adiantada no estator ficando o

fator de potência adiantado (máquina operando sobreexcitada) (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS (2006).

Considerando sistemas industriais que possuem grande quantidade de motores de indução e transformadores, os quais necessitam de corrente de magnetização, a condição dos motores síncrono sobreexcitados é altamente desejado, pois operam como fonte de reativo para o sistema aliviando a fonte primária do sistema de energia da concessionária e representam uma característica econômica desejável.

2.2 TEORIA DAS DUAS REATÂNCIAS

Considerando o motor síncrono e a complexa modelagem matemática desta máquina devido à condição de giro do rotor e forma construtiva das saliências do rotor, foram concebidas transformações matemáticas que permitissem a análises e operações matemáticas de maneira mais fácil. Conforme BARBI (1985) a transformação $\alpha\beta 0$ fisicamente representa a conversão de uma máquina eletromagnética simétrica trifásica em uma bifásica, porém, mantendo as mesmas características de potência (elétrica e mecânica), torque, velocidade e número de pólos. Matematicamente a transformação é definida como:

[...] transformação linear que diagonaliza as matrizes circulantes simétrica, que aparecem na formulação dos modelos de máquina trifásica simétrica [...] (BARBI, 1985, p. 41).

Considerando o descrito em FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS (2006) esta mesma transformação é chamada de dq0 ou decomposição em componente de eixo direto e componente em quadratura. A finalidade da divisão em duas componentes girantes, ambas referenciadas ao eixo do enrolamento de campo (rotor), no entanto uma delas alinhada ao eixo e outra em quadratura com o mesmo eixo, foi para facilitar a análise das máquinas com pólos salientes. A origem do conceito está na condição de que cada fase do estator “vê” uma indutância variável no tempo devido ao movimento do rotor, mas realizando a transformação as grandezas passam a estar estáticas umas em relação às outras, as indutâncias do rotor passam a representar caminhos magnéticos constantes.

A transformação destes parâmetros também é útil na análise da interação das ondas de fluxo e da força magnetomotriz entre rotor e estator, pois considerando

a condição de regime permanente, a interação existente fica separada por um ângulo espacial constante. Esta abordagem é relativamente antiga, originada nos trabalhos de André Blondel (França) – algumas citações referenciam como ‘método das duas reações de Blondel’ – porém, muito também foi desenvolvido nos Estados Unidos por R. E. Doherty, C. A. Nickle e R. H. Park (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006). A Figura 7 apresenta a representação ideal de uma máquina síncrona utilizada como referência na transformação de variáveis.

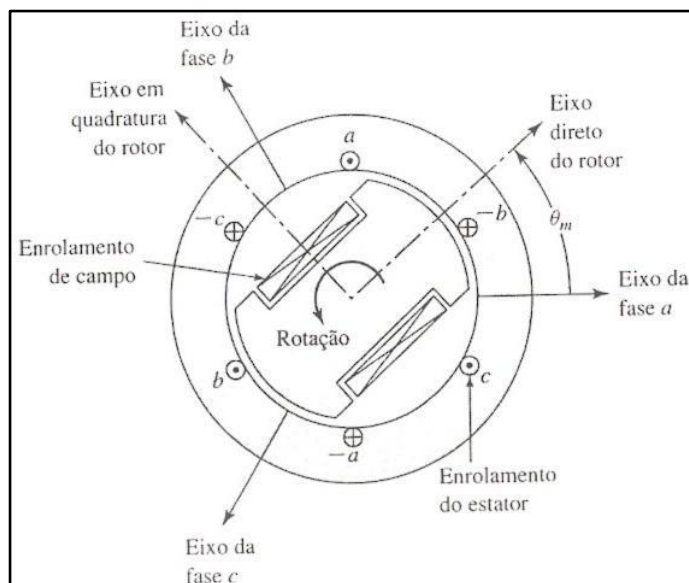


Figura 7 – Modelo de máquina elétrica síncrona ideal.
FONTE: FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS (2006, p. 621).

Considerando a máquina elétrica (motor ou gerador) de pólos salientes, ela possui uma direção preferencial na magnetização que é determinada pela saliência do pólo, sendo que a permeância magnética na superfície do pólo (eixo direto) é consideravelmente maior quando comparado ao da região entre os pólos (eixo em quadratura), condição esta que é possível ser verificada na Figura 7, pois existe maior facilidade de acoplamento do fluxo magnético na região da superfície do pólo do que na região lateral do pólo.

Continuando a análise da máquina elétrica síncrona com base em FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS (2006), a onda do fluxo de reação da armadura estará atrasado em relação ao fluxo do rotor a um ângulo correspondente a 90° adicionados de uma defasagem de mais ϕ_{atr} , totalizando $90^\circ + \phi_{atr}$, onde ϕ_{atr} representa o atraso da corrente de armadura em relação à força eletromotriz da excitação. Considerando a corrente de armadura I_a atrasada em relação à força eletromotriz de excitação E_f em um ângulo de 90° o fluxo de reação da armadura

estará na direção oposta ao fluxo de campo ϕ_f , conforme é possível perceber na Figura 8a. Considerando as ondas de indução magnética devido à corrente de campo e a reação da armadura produzidas na superfície da armadura são representadas na Figura 8b – nesta figura os efeitos das ranhuras foram desconsiderados; as ondas são a composição da fundamental mais um conjunto de harmônicas ímpares (com efeitos desprezíveis).

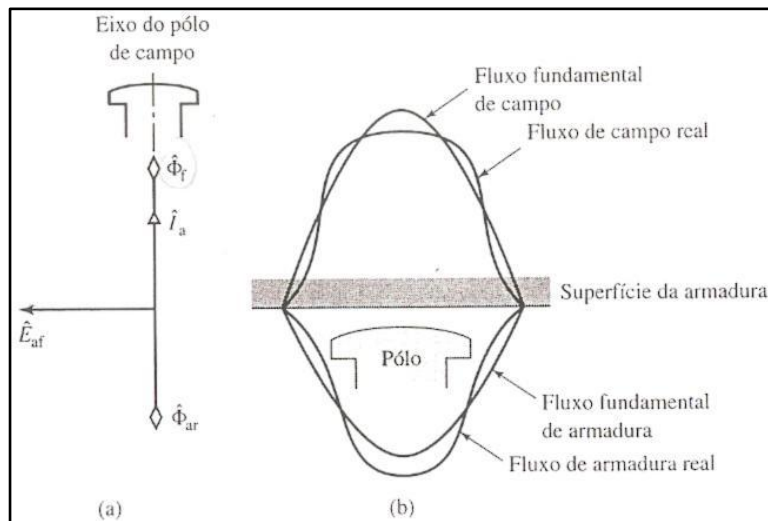


Figura 8 – Fluxos do entreferro ao longo do eixo direto de uma máquina síncrona de pólos salientes.

FONTE: FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS (2006, p. 273).

Na condição da corrente de armadura estar em fase com a força eletromotriz de excitação, Figura 9a, as interações ficam diferentes, ou seja, a onda de reação da armadura possui o eixo diretamente oposto ao espaço interpolar e sendo assim, a onda de fluxo de reação da armadura é fortemente distorcida e com predominância de terceira harmônica gerando forças eletromotrizes também de terceira harmônica, como é possível verificar na Figura 9b. Na região entre os pólos o valor da relutância magnética do entreferro aumenta muito, sendo que a onda de fluxo de reação da armadura devido a corrente de reação, na condição em quadratura (eixo do fluxo alinhado à região interpolar), é menor quando comparada à condição de eixo direto, quando o pólo está alinhado de maneira oposta ao fluxo da armadura, sendo assim, a reatância magnetizante é menor para a condição em quadratura (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006). É possível evidenciar estas condições na Figura 9a e Figura 9b.

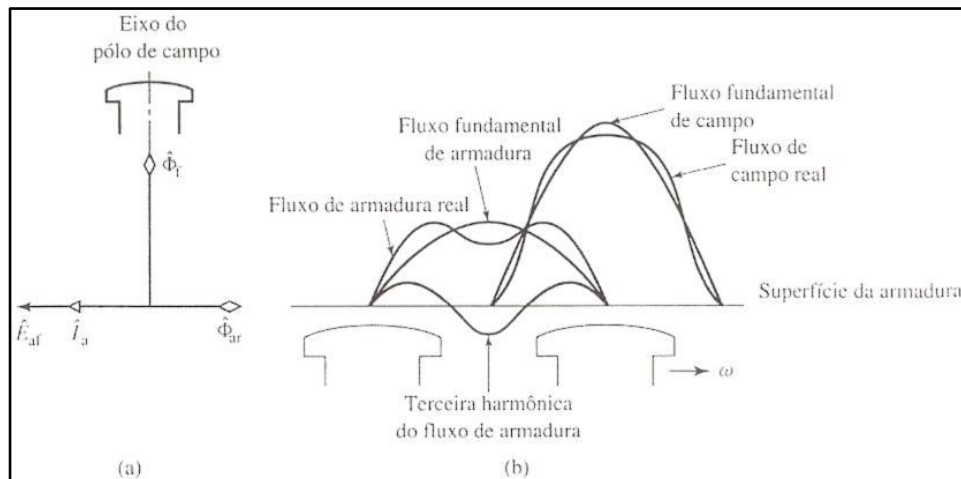


Figura 9 – Fluxo de entreferro ao longo do eixo em quadratura de uma máquina elétrica síncrona de pólos salientes.

FONTE: FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS (2006, p. 274).

Para considerar as condições descritas anteriormente torna-se necessário a decomposição da corrente de armadura em outras duas componentes, uma delas estando em quadratura e outra em fase com a tensão de excitação. A primeira componente da corrente de armadura será a corrente de eixo direto I_d que origina a componente ϕ_{ad} do fluxo de reação da armadura e a componente em quadratura I_q que origina o fluxo ϕ_{aq} que está em quadratura espacial com os pólos do rotor. A representação dos índices 'd' e 'q' estão referenciados a fase espacial do fluxo, não possuindo ligação co-relação com as fase no tempo das correntes que produzem (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2006). Sendo que para uma máquina elétrica não saturada, são válidas as seguintes relações:

$$\Phi_{ra} = \Phi_d + \Phi_q \quad (4)$$

$$I_a = I_d + I_q \quad (5)$$

Para cada uma das duas correntes, eixo direto e quadratura, está associada uma queda de tensão na reatância síncrona, sendo respectivamente, $j \cdot I_d \cdot x_d$ e $j \cdot I_q \cdot x_q$, sendo x_d e x_q , respectivamente, reatância síncrona de eixo direto e quadratura. Estas reatâncias síncronas consideram os efeitos indutivos criados pela corrente de armadura, reação da armadura e fluxos dispersos, sendo assim, estes efeitos dos fluxos de reação de armadura nos dois eixos pode também ser

considerado nas reatâncias magnetizantes da seguinte forma para condição de eixo direto e em quadratura:

$$x_d = x + x_{\varphi d} \quad (6)$$

$$x_q = x + x_{\varphi q} \quad (7)$$

Onde x é a reatância de dispersão da armadura, a reatância x_q é menor que a reatância x_d devido a condição de maior relutância magnética no entreferro para a posição em quadratura (região interpólos).

Considerando o desenvolvido em BARBI (1985) e FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS (2006) a transformação para variáveis de eixo direto e em quadratura, também chamada como $dq0$ ou $\alpha\beta0$, podem ser representada considerando o disposto na Figura 7 e conforme o ângulo elétrico definido como:

$$\theta_{ae} = \left(\frac{\text{pólos}}{2}\right) \cdot \theta_a \quad (8)$$

Onde θ_{ae} representa o ângulo elétrico e θ_a representa o ângulo espacial. Considerando uma máquina multipolar, a simplificação na análise para apenas um par de pólos, representa uma conveniência no desenvolvimento matemático, pois é assegurado que as condições elétricas, mecânicas e magnéticas serão replicações para os demais pares de pólos. Representando S como uma grandeza do estator que deverá ser transformada e θ_{me} como o ângulo elétrico, é possível estabelecer a seguinte condição matricial:

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & \cos(\theta_{me} - 120^\circ) & \cos(\theta_{me} + 120^\circ) \\ -\sin(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me} - 120^\circ) & -\sin(\theta_{me} + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

É importante destacar que uma componente adicional foi inserida, componente de sequência zero, sendo necessário realizar esta adição para obter ao final uma transformação única das três componentes. Esta terceira componente corresponde à corrente de armadura da máquina elétrica que produz fluxo nulo na região do entreferro, ou seja, nenhuma parte do fluxo produzido concatena circuitos

efetivos no rotor, não produzindo resultantes. Considerando uma máquina síncrona com enrolamentos de armadura trifásico e um enrolamento de rotor, a equação fornece a relação entre o fluxo concatenado no rotor e a corrente da máquina. Representando de forma matricial os fluxos concatenados (λ) nas respectivas fases a , b e c da armadura e no enrolamento de campo f , em função das indutâncias (\mathcal{L}) e correntes (i), é obtida a seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{L}_{aa} & \mathcal{L}_{ab} & \mathcal{L}_{ac} & \mathcal{L}_{af} \\ \mathcal{L}_{ba} & \mathcal{L}_{bb} & \mathcal{L}_{bc} & \mathcal{L}_{bf} \\ \mathcal{L}_{ca} & \mathcal{L}_{cb} & \mathcal{L}_{cc} & \mathcal{L}_{cf} \\ \mathcal{L}_{fa} & \mathcal{L}_{fb} & \mathcal{L}_{fc} & \mathcal{L}_{ff} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \end{bmatrix} \quad (10)$$

Sendo que a análise apresentada na equação (10) inclui os efeitos das saliências do rotor o que altera a indutância mútua e própria a medida que ocorre o movimento do rotor. É importante destacar que conforme apresentado por FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS (2006) a análise satisfaz as duas seguintes condições: (1) a permeância do entreferro possui duas componentes, uma constante e outra com valores menos quando comparado a anterior e (2) os efeitos harmônicos podem ser desprezados, sendo que mesmo parecendo restritivas, estas condições representam ótimos resultados nas análises de e obtenção de diversos resultados. As diversas indutâncias existentes na máquina síncrona podem ser descritas com base no ângulo elétrico (θ_{me}), na componente de indutância própria devida ao fluxo fundamental do entreferro (L_{aa0}), na componente adicional devido ao fluxo dispersivo da armadura (L_{al}) e indutância no entreferro (L_{g2}), conforme descrito na sequência de indutâncias próprias do estator (\mathcal{L}_{nn}) referente às fases do estator, sendo:

$$\mathcal{L}_{aa} = L_{aa0} + L_{al} + L_{g2} \cdot \cos 2\theta_{me} \quad (11)$$

$$\mathcal{L}_{bb} = L_{aa0} + L_{al} + L_{g2} \cdot \cos(2\theta_{me} + 120^\circ) \quad (12)$$

$$\mathcal{L}_{cc} = L_{aa0} + L_{al} + L_{g2} \cdot \cos(2\theta_{me} - 120^\circ) \quad (13)$$

Indutâncias mútuas entre estator e rotor (\mathcal{L}_{nm}):

$$\mathcal{L}_{ab} = \mathcal{L}_{ba} = -\frac{1}{2} \cdot L_{aa0} + L_{g2} \cdot \cos(2\theta_{me} - 120^\circ) \quad (14)$$

$$\mathcal{L}_{bc} = \mathcal{L}_{cb} = -\frac{1}{2} \cdot L_{aa0} + L_{g2} \cdot \cos 2\theta_{me} \quad (15)$$

$$\mathcal{L}_{ac} = \mathcal{L}_{ca} = -\frac{1}{2} \cdot L_{aa0} + L_{g2} \cdot \cos(2\theta_{me} + 120^\circ) \quad (16)$$

Indutância própria de campo (estator):

$$\mathcal{L}_{ff} = L_{ff} \quad (17)$$

E indutâncias mútuas entre estator e rotor:

$$\mathcal{L}_{af} = \mathcal{L}_{fa} = L_{af} \cos \theta_{me} \quad (18)$$

$$\mathcal{L}_{bf} = \mathcal{L}_{fb} = L_{af} \cdot \cos(\theta_{me} - 120^\circ) \quad (19)$$

$$\mathcal{L}_{cf} = \mathcal{L}_{fc} = L_{af} \cdot \cos(\theta_{me} + 120^\circ) \quad (20)$$

Considerando a equação 10, que fornece a relação do fluxo concatenado com a corrente, é possível representar de maneira mais simples utilizando as variáveis $dq0$, sendo que esta conversão pode ser feita aplicando-se a transformação da equação 9, resultando:

$$\lambda_d = L_d i_d + L_{af} i_f \quad (21)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (22)$$

$$\lambda_f = \frac{3}{2} L_{af} i_d + L_{ff} i_f \quad (23)$$

$$\lambda_0 = L_0 i_0 \quad (24)$$

Nas equações anteriores aparecem os termos de indutância, sendo:

$$L_d = L_{al} + \frac{3}{2} (L_{aa0} + L_{g2}) \quad (25)$$

$$L_q = L_{al} + \frac{3}{2}(L_{aa0} - L_{g2}) \quad (26)$$

$$L_0 = L_{al} \quad (27)$$

Sendo que L_d é a indutância síncrona de eixo direto, L_q representa a indutância de eixo em quadratura e L_0 a indutância de sequência zero. É possível perceber que nas equações de 21 a 27 deixaram de existir indutâncias que dependem da posição física do rotor (giro), sendo esta a principal característica da transformação de variáveis $dq0$. Considerando as equações de tensão convertidas para as variáveis $dq0$ é possível obter:

$$v_d = R_a i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_{me} \lambda_q \quad (28)$$

$$v_q = R_a i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} - \omega_{me} \lambda_d \quad (29)$$

$$v_f = R_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (30)$$

$$v_0 = R_a i_0 + \frac{d\lambda_0}{dt} \quad (31)$$

Os termos $\omega_{me} \lambda_q$ e $\omega_{me} \lambda_d$ que estão presentes nas equações 28 e 29 são termos da tensão de velocidade que surgem devido ao fato da escolha das variáveis de um sistema girante (rotor) que possui velocidade angular elétrica definida como ω_{me} .

Até este ponto é possível concluir que para a máquina elétrica síncrona simples as equações estão quase completas, sendo que estas equações contemplam fluxos concatenados no rotor e as correntes, tensões, equações de conversão e a consideração que a velocidade angular elétrica é constante. Estão faltando apenas as equações que definem a potência e o conjugado em função das variáveis $dq0$.

A equação da potência em função das tensões e correntes é:

$$p_e = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q + 2v_0 i_0) \quad (32)$$

Para o valor do conjugado eletromagnético, é possível ser obtido com razão entre as tensões de velocidade e velocidade de rotação do rotor, obtendo:

$$T_{mec} = \frac{3}{2} \left(\frac{p\acute{o}los}{2} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (33)$$

2.3 TIRISTOR

Os tiristores são dispositivos eletrônicos utilizados em circuitos de potência e amplamente difundidos em aplicações industriais, além disso, para o desenvolvimento dos próximos capítulos desta monografia será abordada aplicação deste dispositivo, por isso, este item apresenta apenas uma revisão de alguns conceitos básicos e fundamentais do funcionamento deste dispositivo. A definição de tiristor é:

[...] são dispositivos semicondutores de potência com quatro camadas PNPN, usados como chaves eletrônicas. A principal vantagem é converter e controlar grandes quantidades de potência em sistemas AC ou DC, utilizando apenas uma pequena potência para controle [...]. (AHMED,2000)

Este dispositivo possui uma família de componentes que utilizam as características fundamentais do elemento, sendo alguns exemplos: o retificador controlado de silício (*silicon controlled rectifier* – SCR), tiristor de desligamento de porta (*gate-turnoff thyristor* – GTO), triac, diac, chave controlada de silício (*silicon controlled switch* – SCS) e tiristor controlado MOS (*MOS-controlled thyristor* - MCT), sendo o SCR o mais importante e difundido em aplicações industriais e comerciais.

2.3.1 O Retificador Controlado de Silício – SCR

Este controlador de potência possui rápido chaveamento, possui pequenas dimensões e permite controle de elevados valores de corrente e tensão. É formado por três terminais (ânodo, catodo e porta), quando diretamente polarizado a aplicação de tensão na porta dispara o dispositivo que passa a conduzir, somente sendo interrompida a condução com a interrupção de corrente no ânodo. Pode ser representados como dois transistores complementares (NPN e PNP) arranjados conforme disposto na Figura 10.

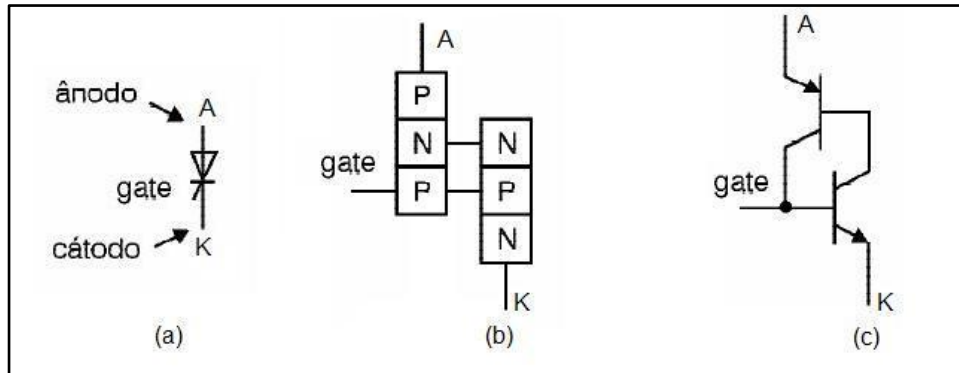


Figura 10 – Representações (a) simbologia do SCR (b) representação das junções complementares (c) representação do dispositivo no arranjo de duplo transistor. FONTE: AHMED (2000).

O Gráfico 2 apresenta a curva característica (curva volt-ampère) típica de um SCR. Para a região de bloqueio direto existe um valor de tensão máxima (tensão de disparo direto) que dispara o dispositivo sem a aplicação da tensão de gatilho, representando uma condição não desejável durante a operação. De maneira análoga, para a condição de polarização reversa também existe um limite máximo seguro para manter o dispositivo bloqueado (tensão inversa máxima).

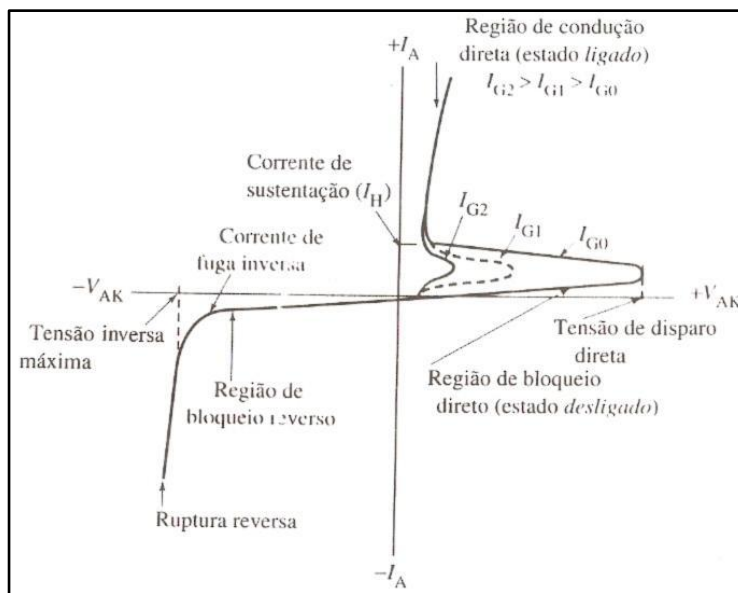


Gráfico 2 – Curva característica de um dispositivo SCR. FONTE: AHMED, 2000, p. 98.

A condição ideal de utilização do SCR é apresentada no Gráfico 3, sendo que a maneira básica de operação consiste no funcionamento como uma chave que possui três estado (bloqueio direto, reverso e condução direta).

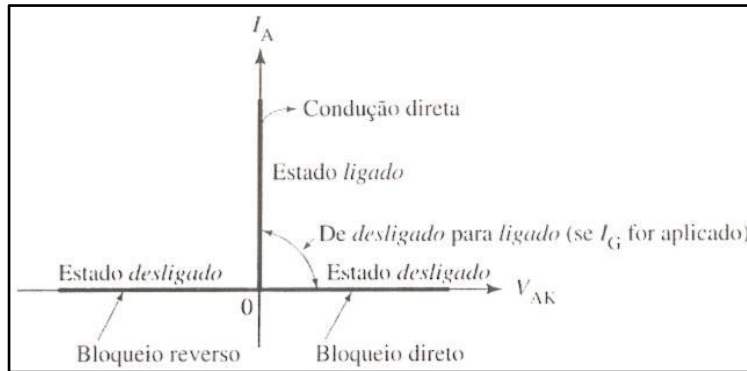


Gráfico 3 – Representação da curva ideal para o SCR.
FONTE: AHMED, 2000, p. 99.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DE ÁREA

O assunto de 'Classificação de áreas' e 'Equipamentos para áreas classificadas' é muito amplo e envolve diversas variáveis, particularidades e conceitos específicos para o assunto. Nesta monografia, o intuito de apresentar este item é visando estabelecer os conceitos básicos do assunto com foco direcionado apenas aos conceitos pertinentes à aplicação apresentada, ou seja, serão abordados apenas os conceitos diretamente utilizados no assunto desta monografia. Sendo assim, conforme definido em NBR IEC 60079-10-1 (2009) a definição de área classificada devido à presença de atmosfera de gás é a seguinte:

[...] área na qual uma atmosfera explosiva de gás está presente ou é esperada estar presente em quantidades tais que requeiram precauções especiais para a construção, instalação e utilização de equipamentos [...] (NBR IEC 60079-10, 2009, p. 2).

E considerando o exposto na NBR 60079-0 (2008) sobre atmosferas explosivas, a definição para atmosfera explosiva é a seguinte:

[...] mistura com ar, sob condições atmosféricas, de uma substância inflamável na forma de gás, vapor, poeira, fibras ou partículas suspensas, na qual, após ignição permite auto-sustentação de propagação [...] (NBR IEC 60079-0, 2008, p. 12).

Para a condição de atmosfera explosiva de poeira e gás, a alteração da definição está na forma da substância inflamável, ou seja, para poeira a substância

deverá estar no estado de poeira ou partículas suspensas e para a atmosfera explosiva de gás a forma básica do elemento explosivo será gás ou vapor.

Além da condição do tipo de atmosfera que poderá estar presente no local, os equipamentos também são classificados quanto ao ambiente que são destinados e certificados para utilização. A norma NBR IEC 60079-0 (2008) estabelece três grupos distintos, sendo Grupo I, II e III, podendo ou não existir subgrupos. As características particulares dos grupos são as seguintes:

- Grupo I – equipamentos que podem ser utilizados em minas de carvão suscetíveis a presença do gás metano ou grisú (gás característico deste grupo);
- Grupo II – equipamentos destinados à utilização em locais onde a atmosfera explosivas de gás não possua a presença de metano. Este grupo em especial possui três divisões, sendo as subdivisões IIA, IIB e IIC. Cada uma das subdivisões apresenta um gás característico, porém não único, ou seja, gases com características semelhantes ao do gás típico também pertencem ao grupo – isto respeitando a condição 'MESG – máximo intrínseco experimental seguro' – conforme normatização.

Para o Grupo IIA o gás típico é o propano e para os Grupos IIB e IIC os gases característicos são respectivamente, etileno e hidrogênio.

- Grupo III – este é o grupo dos equipamentos que estarão sujeitos a exposição à atmosferas de poeiras, mas que não suscetíveis à exposição ao grisú. Da mesma forma que o Grupo II, este também possui divisão em IIIA, IIIB e IIIC, sendo que para cada um deles a característica da substância (poeira) é, respectivamente, a seguinte: fibras combustíveis, poeiras não condutoras e poeiras condutoras.

Os equipamentos destinados as áreas classificadas são categorizados conforme as técnicas de proteção aplicadas aos equipamentos. A norma NBR IEC 60079-0 (2008) define os de proteção conforme o Quadro 1:

Símbolo EX	Subdivisão	Descrição
d	-	Invólucro à prova de explosão
e	-	Segurança aumentada
i	ia / ib / ic	Segurança intrínseca
m	ma / mb / mc	Encapsulamento
n	nA	Não acendível
	nC	Protegido contra centelhamento
	nR	Respiração restrita
	nL	Energia limitada
o	-	Imersão em óleo
p	px / py / pz	Pressurização
q	-	Preenchimento com areia

Quadro 1 – Símbolo e descritivo de cada tipo de proteção de equipamentos Ex.
FONTE: Adaptado da NBR IEC 60079-0, 2008.

Outra definição é importante quando é abordado o tema classificação de área é a condição de ‘zona’ que conforme NBR IEC 60079-14 (2009) é definida como:

[...] zona – áreas classificadas baseadas na frequência e duração da ocorrência de uma atmosfera explosiva [...] (NBR IEC 60079-14, 2009, p. 4).

A classificação em zonas possui mais seis outras subdivisões conforme norma brasileira, sendo que, conforme JORDÃO (2002), três delas podem ser consideradas como principais, sendo: Zona 0, Zona 1 e Zona 2. Cada uma dessas três subdivisões possuem diferenças quanto a severidade dependendo do tempo e repetição na exposição a atmosferas explosivas. A mais severa é a Zona 0 com presença de atmosfera perigosa de maneira contínua ou por longos períodos, enquanto que na Zona 2 a atmosfera explosiva poderá ocorrer por curtos períodos de tempo quando ou será pouco provável existir em caso de operação normal.

2.4.1 Equipamento com Invólucro Pressurizado – Ex-p

Conforme norma NBR IEC 60079-2 (2009) e JORDÃO (2002) os equipamentos destinados a operação em áreas classificadas com proteção por invólucro pressurizado são equipamentos que mantêm a pressão interna do invólucro em um valor superior a pressão externa evitando que, na ocorrência de atmosfera explosiva, esta mistura não entre em contato com parte potencialmente perigosas do equipamento, ou seja, parte que possibilitem ignição da mistura.

É importante destacar que para manter a segurança destes invólucros é necessário garantir que o gás de pressurização seja inerte e que no interior do invólucro não permaneça nenhum tipo de mistura perigosa. A técnica utilizada para garantir estas condições é a chamada 'purga', que consiste na passagem de gás seguro no interior do invólucro e dos acessórios de maneira que toda e qualquer concentração de gás perigoso seja eliminada ou mantida em valores seguros para operação do equipamento.

Depois de realizado o procedimento de purga ou que a condição segura de inexistência de atmosfera perigosa no interior do invólucro seja garantida, será estabelecida uma pressão estática garantindo sobrepressão no interior do invólucro. Seguindo esta consideração, os sistemas pressurizados ainda são subdivididos em três grupos conforme a redução do tipo de zona no interior do invólucro. As três subdivisões são: 'px', 'py' e 'pz', as quais estão mais detalhas no Quadro 2.

Subdivisão	Descrição
px	Redução da classificação de Zona 1 para área não classificada
py	Redução de Zona 1 para Zona 2 no interior do invólucro
pz	Redução de Zona 2 para área não classificada no interior do invólucro

Quadro 2 - Tipo de pressurização conforme Zona
FONTE: DÁCIO, 2002.

2.4.2 Grau de Proteção – Código IP

Para determinado equipamento elétrico, independentemente da aplicação em área classificada, é inerente a existência de proteção capaz de prevenir duas condições básicas, danos às pessoas e ao próprio equipamento, sendo danos causados pela penetração de objetos estranhos ou de água (JORDÃO, 2002).

Quanto ao código IP (do inglês *ingress protection*) é um sistema de codificação que indicam o grau de proteção de determinado invólucro contra acesso às partes eminentemente perigosas, penetração de objetos sólidos e entrada de água, além de poder fornecer informações adicionais no caso de proteções especiais ou diferenciadas (NBR IEC 60529, 2005).

A nomenclatura utilizada possui inicialmente a denominação da sigla IP seguida por dois algarismos determinando o grau de proteção e podendo existir, ao final da representação, letras adicionais e complementares. O primeiro algarismo representa a proteção das pessoas quanto ao acesso a partes perigosas e a proteção do equipamento contra penetração de objetos estranhos (NBR IEC 60529, 2005). O Quadro 3 demonstra a relação entre o primeiro numeral característico do código e as proteções inerentes.

Numeral	Grau de Proteção	
	Proteção pessoal – ingresso de partes humanas	Ingresso de objetos sólidos
0	Não protegido	–
1	Proteção acesso dorso da mão	Objetos sólidos com diâmetro superiora a 50 mm
2	Proteção acesso com um dedo	Objetos sólidos com diâmetro superiora a 12 mm
3	Proteção contra acesso Utilizando ferramenta	Objetos sólidos com diâmetro superiora a 2,5 mm
4	Proteção acesso com fio	Objetos sólidos com diâmetro superiora a 1,0 mm
5	Proteção acesso com fio	Poeira
6	Proteção acesso com fio	Totalmente contra poeira

Quadro 3 – Significado do primeiro dígito do código IP.

FONTE: Adaptado de DÁCIO (2002) e NBR IEC 60529 (2005).

Em relação ao segundo número característico, representa o grau de proteção provido pelo invólucro do equipamento à penetração de água e os efeitos prejudiciais devido a esta condição (NBR IEC 60529, 2005). O Quadro 4 apresenta a relação do numeral característico com a definição e breve descritivo do tipo da proteção.

Numeral	Grau de proteção	
	Descrição	Proteção ofertada
0	Não protegido	Involúcro aberto
1	Proteção contra gotas caindo verticalmente	Gotas não prejudiciais (condensação)
2	Proteção queda de gotas com inclinação até 15°	Não possuem efeito para gotas caindo até 15° com a vertical
3	Proteção contra aspensão de água	Aspersão de água a 60° com vertical não prejudicam
4	Proteção contra projeção de água	Água projetada de qualquer lado não prejudica
5	Proteção contra jatos de água	Água projetada por bico em qualquer direção não prejudica
6	Proteção contra jatos potentes	Água em jatos ou ondas não prejudica
7	Proteção contra imersão temporária	Em determinadas condições de tempo e pressão, não prejudica
8	Proteção contra imersão contínua	Adequado a submersão contínua

Quadro 4 – Significado do segundo dígito do código IP.

FONTE: Adaptado de DÁCIO (2002) e NBR IEC 60529 (2005).

Tanto nas informações apresentadas no Quadro 3, quanto no Quadro 4, para determinado equipamento com proteção caracterizada por um código IP (IP xx, por exemplo), todas as condições anteriores ao algarismo do código são satisfeitas por este equipamento, ou seja, para obter grau de proteção alto implica compatibilidade com todos as proteções referenciadas por algarismos menores.

2.5 ARRANJOS DO SISTEMA DE POTÊNCIA

Aqui é apresentada uma revisão dos conceitos fundamentais sobre os principais tipos de arranjos utilizados nos sistemas de potência e em instalações industriais, pois o descritivo da aplicação apresentada nesta monografia fará referência à importância destes tipos de arranjos e a utilização prática na aplicação.

A continuidade da produção industrial de determinada planta produtiva depende basicamente da confiabilidade do sistema de energia e da confiabilidade do sistema de distribuição de potência elétrica, isto considerando as particularidades e necessidades específicas do processo industrial. Esta exigência de continuidade de serviço dependerá única e exclusivamente do tipo de produto processado, condições específicas de operação e qual o custo da ocorrência de uma interrupção, pois um

sistema mais confiável possui, em geral, um custo mais elevado de instalação – por isso a importância da análise do custo de instalação versus o custo da parada produtiva. Porém, dois outros fatores são importantes e devem ser observados no projeto das instalações elétricas industriais, são a segurança das pessoas e preservação da integridade dos equipamentos da planta (IEEE Std 141, 1993).

Além das condições de segurança, de pessoas e equipamentos, e da confiabilidade, itens já mencionados anteriormente, alguns outros fatores também devem ser observados, e conforme IEEE Std 141 (1993), eles são os seguintes:

- Simplicidade de operação – é importante para segurança de pessoas durante manobras, no estabelecimento de confiabilidade operacional e no atendimento das condições exigidas pelo processo;
- Manutenção – deverão ser implementadas e previstas condições de acessibilidade para inspeções, reparos e ajustes (tanto na instalação quanto nos equipamentos instalados);
- Flexibilidade – no sistema elétrico representa a facilidade em fazer alterações, adaptações e adições durante a vida útil da planta, sendo que a condição de regulação de tensão deve ser mantida após modificações;
- Regulação de tensão – a condição de regulação de tensão é determinante na vida útil da unidade industrial, pois no início representa o reflexo do dimensionamento correto de instalações e equipamentos, enquanto que ao longo da vida útil representará fator determinante para expansão de cargas, pois a instalação deve operar com tensão dentro de certos limites mesmo com o aumento da carga e
- Custo inicial – é um fator importante, porém as condições anteriores de segurança (pessoas e equipamentos), operação, flexibilidade, manutenção e regulação de tensão devem ser primordiais na avaliação da solução final.

Conforme descrito em MAMEDE (2001) e em IEEE Std 141 (1993) diversos são os tipos de arranjos, funcionalidades e aplicações para os sistemas de potência. A seguir são descritos apenas alguns tipos de topologias para os sistemas de potência, porém, apenas os de maior relevância para esta monografia.

2.5.1 Barra Dupla com *By Pass*

Arranjo no qual a configuração de disjuntores e seccionadores dispõe metade das cargas conectas em uma das duas barras e a outra metade das cargas na outra barra. Possui a vantagem de facilidade na operação de troca da carga entre barras, defeitos internos não desligam a carga associada e a perda de uma das barras não afeta as cargas (continuidade operacional). É um arranjo aplicado em setor indústrias que necessitam de alta confiabilidade e continuidade de serviço - geralmente em sistema de 230 kV, 500 kV ou acima, pois representa um custo elevado de instalação e operação mais complexa para o operador. A Figura 11 apresenta um esquemático deste tipo de arranjo.

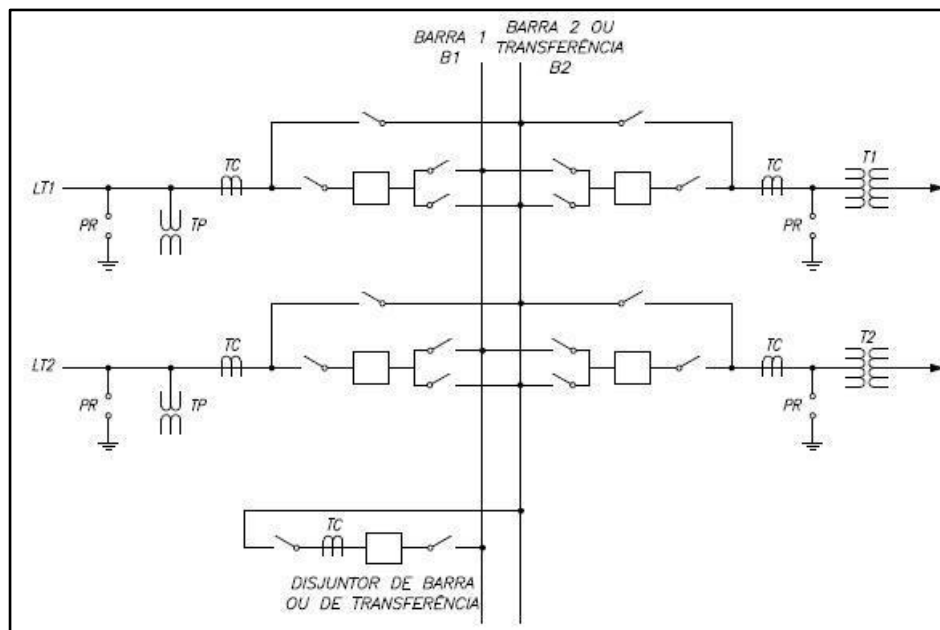


Figura 11 – Esquemático do arranjo de barra dupla com *by pass*.
FONTE: Adaptado de MAMEDE, 2001.

2.5.2 Barra Dupla

Similar a arranjo apresentado no item anterior, porém sem a condição das chaves seccionadoras de *by pass*, sendo que também possui metade das cargas em cada barra, defeitos internos não desligam os consumidores e também possui alta confiabilidade e continuidade de serviço. De maneira análoga ao arranjo de barra dupla com *by pass*, possui alto custo e é complexo na operação, sendo aplicado em sistemas de 230 kV, 138 kV ou 69 kV. A Figura 12 apresenta o esquemático deste arranjo.

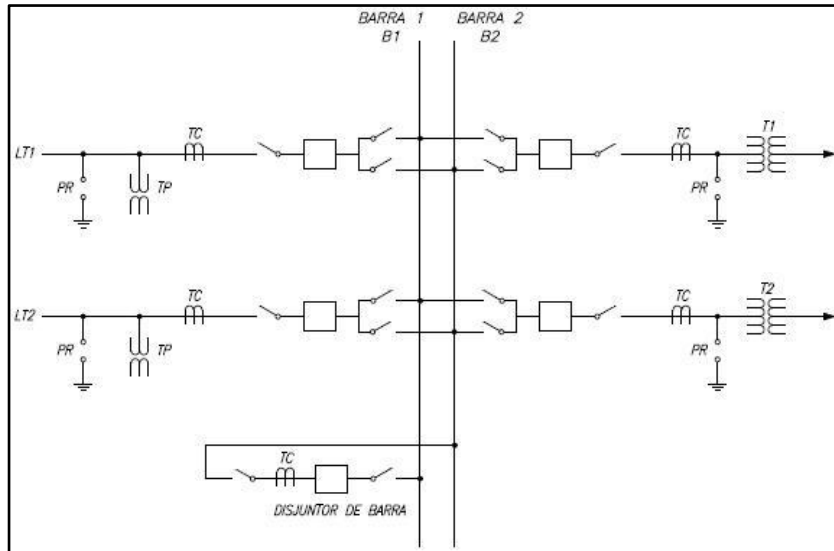


Figura 12 – Esquemático do arranjo de barra.
FONTE: adaptado MAMEDE, 2001

2.5.3 Secundário Seletivo Distribuído

Arranjo de sistemas com tensões de 13,8 kV ou inferiores, sendo assim apresenta maior segurança nas manobras com tensões secundárias, no caso de falha de um dos transformadores é possível alimentar as cargas por meio de apenas um deles (regulação de tensão adequada, pois transformador possui dimensionamento para alimentar todas as cargas) e é de fácil operação e manutenção (permite desligamento do transformador). A desvantagem está na condição da interligação entre as barras que é realizada com cabos, sendo que para a condição de cada uma das barras do secundário representar uma subestação fisicamente separada, pode existir a dificuldade de interconexão e intertravamento devido à dificuldade apresentada pela distância, implicando diretamente no dimensionamento dos cabos. A Figura 13 demonstra um esquemático deste tipo de ligação.

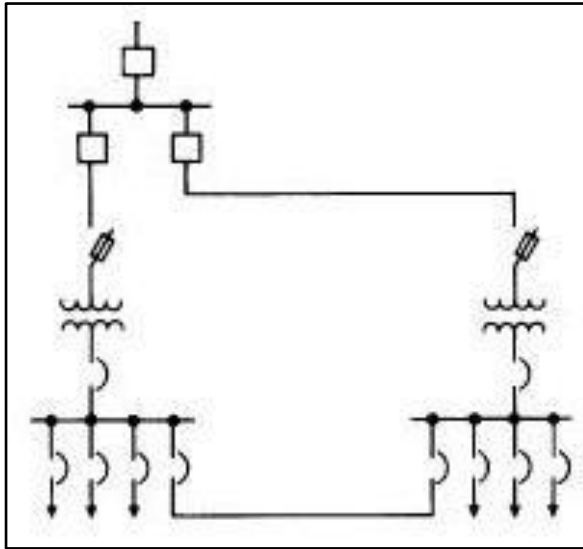


Figura 13 – Esquemático de arranjo secundário distribuído.
FONTE: IEEE Std 241, 1993, p. 116.

2.5.4 Secundário Seletivo Concentrado

Similar ao arranjo com secundário seletivo distribuído, apresenta como diferença apenas a condição de interligação direta entre as barras do secundário, que neste caso ocorrem por meio de um disjuntor diretamente conectado, o chamado *tie*. De maneira análoga ao anterior, deve existir o cuidado no intertravamento evitando a energização do transformador por meio dos terminais secundários (forma reversa). A Figura 14 apresenta o esquemático desta topologia.

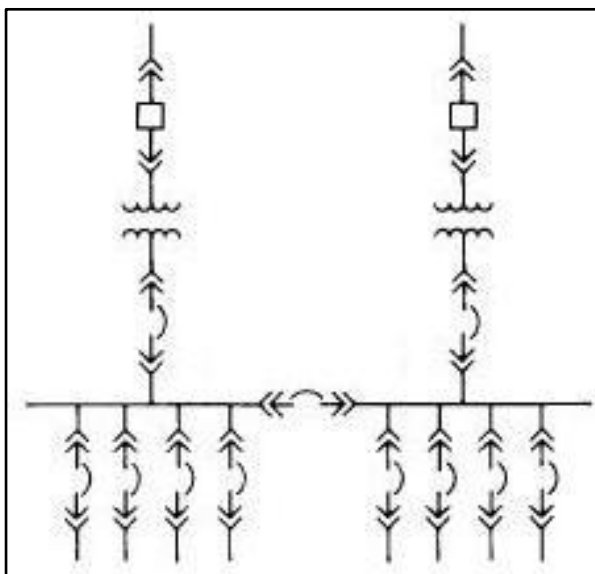


Figura 14 – Esquemático do arranjo de secundário seletivo concentrado
FONTE: IEEE Std 141, 1993, p. 41

2.6 CABOS E MUFLAS

De maneira análoga ao item referente ao funcionamento dos tiristores, este item apenas apresenta uma revisão, de maneira muito resumida, de alguns conceitos básicos sobre dimensionamentos de cabos e cuidados com terminações (muflas) visando apenas retomar alguns conceitos abordados e estudados a fundo durante os cursos de graduação em engenharia elétrica. No caso desta monografia, em especial do caso apresentado, estes serão conceitos importantes e detalhes fundamentais para o correto e seguro funcionamento do equipamento.

Para o correto dimensionamento e especificação dos condutores os seguintes fatores devem ser considerados na análise: tensão e frequência nominais do sistema, potência da carga que será alimentada ou interconectada, natureza da carga, distância e percurso que deverá ser atendido e corrente de curto-circuito (MAMEDE, 2011).

A constituição básica de um condutor com classe de tensão de 15 kV é um núcleo de cobre revestido com material semicondutor e aplicado o elemento isolante encima dos dois. Outra camada de semicondutor é aplicada sob a camada de isolamento e sobre esta segunda camada semicondutora é aplicada a blindagem, que pode ser composta por uma fita ou fios singelos. Na finalização do condutor é realizada a aplicação de uma camada de borracha isolante – em geral PVC (cloreto de polivinila).

Cada uma das camadas descritas anteriormente possui uma finalidade específica, sendo que a primeira camada semicondutora uniformiza o campo elétrico radial e transversal que é deformado na superfície da camada externa do condutor de cobre (alma do cabo - núcleo); a segunda camada de material semicondutor corrige o campo elétrico que está sob a camada de condutores singelos de blindagem logo abaixo; a blindagem por meio de cabos singelos ou no formato de fita servem para garantir que correntes de falta possam ser escoadas corretamente e a última capa mais externa possui como principal finalidade proteção mecânica e agregação final do conjunto das outras camadas (MAMEDE, 2011). A Figura 15 demonstra a estrutura básica de uma cabo deste tipo.

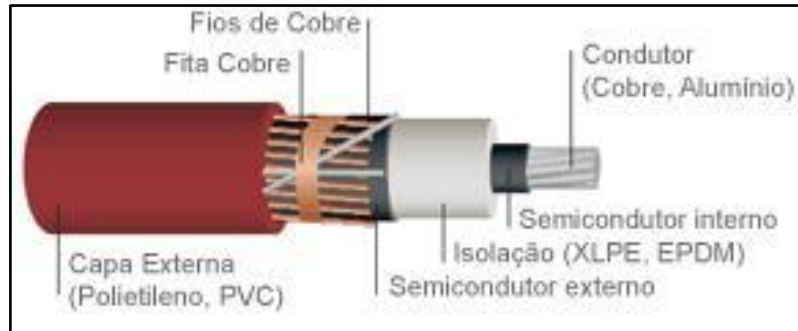


Figura 15 – Detalhes em corte de cabo unipolar.
FONTE: Prysmian, 2012.

As muflas são dispositivos destinados a restabelecer as condições de isolamento na extremidade do condutor isolado quando este será conectado a um barramento ou outro condutor sem isolamento (condutor nu). Considerando as explicações anteriores, a segunda camada de material semicondutor (mais externa) permite o estabelecimento de linha equipotenciais no meio dielétrico, sendo que o gradiente possui intensidades maiores próximo ao condutor metálico e menor na proximidade do semicondutor. De maneira análoga, as linhas de força (radiais ao condutor) possuem maior densidade próximo ao condutor metálico, o que exige mais do isolamento nestas proximidades (MAMEDE², 1993).

Com estas considerações é extremamente relevante e imperativa a redução destes gradientes de tensão para realizar a conexão ou emenda deste condutor. Com esta finalidade específica é que são aplicadas as muflas ou terminações, de maneira a permitir a transição suave dos campos até o ponto de conexão final, sendo que a intensidade destes campos são diretamente proporcionais ao valor da tensão aplicada.

2.7 SISTEMA DE PROTEÇÃO

No projeto e dimensionamento de instalações industriais a elaboração do sistema de proteção constitui uma tarefa composta por diversas etapas, desde a definição da estratégia, equipamentos a serem utilizados, até a especificação dos parâmetros de configuração de cada um dos elementos de proteção. Conforme MAMEDE (2011), alguns critérios básicos devem ser atendidos, sendo:

- Seletividade - capacidade do sistema de proteção em isolar uma falta sem prejudicar a operação do restante do sistema;

- Exatidão e segurança – confere ao sistema características operacionais confiáveis e os acionamentos ocorrem de maneira precisa e
- Sensibilidade – faixa de operação dos dispositivos de proteção, o que reflete diretamente nas duas condições anteriores.

É importante destacar que o projeto de proteção da instalação industrial deve ser realizado de maneira global, ou seja, as diversas proteções realizadas setorialmente devem ser contempladas em um estudo maior que permite que estas proteções fiquem integradas, seletivas e coordenadas de maneira que as falhas elétricas que ocorram possam ser eliminadas de maneira rápida e com o menor impacto ao restante do sistema e por consequência ao processo produtivo.

Considerando a coordenação de proteção contra faltas elétricas, três são os principais elementos capazes de prover o comando ou interrupção de uma falha, são: disjuntores, fusíveis e relés de proteção (controle) (MAMEDE;2011). Em relação ao acionamento destes dispositivos, é desejável que o dimensionamentos dos parâmetros respeitem as condições de resistência à corrente de curto-circuito das instalações e equipamentos, tensões aplicadas, frequência de operação e tempo que os elementos suportam os esforços térmicos, elétricos e mecânicos.

Conforme MAMEDE (1993) e IEEE Std C37.2 (2008) para representação e referência padronizada em projetos, dimensionamentos e operação (indicação em equipamentos) de sistemas industriais cada uma das funções de proteção receberam uma numeração específica representando um tipo de proteção – podendo ser complementada com letras auxiliares. A Tabela 1 demonstra apenas os números de algumas das funções mais aplicadas na indústria.

Tabela 1 – Funções de proteção padronizadas.

(continua)

Número Padronizado	Função
27	Subtensão
49	Proteção térmica – aplicação em máquina
50	Sobrecorrente instantânea
51	Sobrecorrente temporizada
52	Disjuntor – elemento físico

Tabela 1 – Funções de proteção padronizadas.

(conclusão)

Número Padronizado	Função
55	Fator de potência
59	Sobretensão
69	Permissiva de controle
86	Relé de bloqueio

FONTE: MAMEDE, 1993, p. 310.

2.7.1 Proteção Diferencial

A proteção diferencial conforme descrito e definido em MAMEDE (1993) e CLARK (1979) é a proteção realizada por um relé diferencial (eletromecânico) ou pela função diferencial (relé digital – função 87 conforme IEEE Std C37.2) que realiza a comparação entre as correntes de entrada e saída de determinado segmento a ser protegido, no caso da ocorrência de uma falta, as correntes apresentarão valores diferenciados e caso supere um valor determinado no relé, ocorrerá a atuação no elemento de proteção (em geral, o disjuntor).

Outra vantagem que existe neste tipo de proteção está no fato que caso ocorra algum problema em qualquer um dos transformadores de corrente (TCs), a proteção do relé atuará, pois será sensibilizado quanto à diferença de correntes de entrada e saída do trecho a ser protegido. A Figura 16 apresenta um esquema simplificado do arranjo de proteção diferencial, para a Figura 16a é representada uma falha interna ao trecho protegido para a Figura 16b uma falha externa.

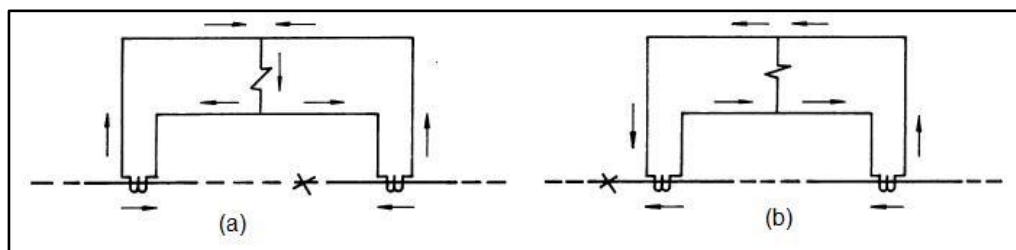


Figura 16 – Arranjo de proteção diferencial (a) falha interna ao trecho protegido (b) falha externa ao trecho protegido.

FONTE: CLARK, 1979.

2.8 AUTOMAÇÃO

Considerando um breve histórico, até final do século XIX a indústria de produção de bens era impulsionada pela utilização da força muscular, porém com o advento da Revolução Industrial surgem os sistemas mecanizados e o homem não faz mais parte como o executor direto das tarefas, mas na função de controle do processo produtivo e tomada de decisões. Com o avanço e desenvolvimentos dos sistemas eletrônicos e de comunicação, a produção cada vez mais fica automatizada e menos dependente da intervenção direta, na produção, do ser humano (MAMEDE, 2011). Ainda considerando MAMEDE (2011), um trecho deve receber destaque devido a perspectiva apresentada e que com certeza a humanidade está seguindo para este caminho e além do mais, retrata uma realidade muito atualizada, mesmo para uma referência já publicada há certo tempo, sendo a citação:

[...] um palestrante iniciou sua apresentação profetizando: “no futuro, as fábricas só terão dois seres vivos – um homem e um cão-de-guarda”. [...] alguém indagou o palestrante: “para que serve o homem?” e a resposta foi enfática: “para cuidar do cão.”. FONTE: MAMEDE, 2011, p. 526.

A citação anterior realmente pode causar polêmica, mas é uma condição quase irreversível, pois considerando custos de implantação da automação e grau de confiabilidade versus custos com pessoal e condições operacionais (incluindo segurança), é possível perceber as vantagens. É importante analisar e destacar que isto não indica a ausência do ser humano, mas a mudança de propósito (controle, supervisão e tomada da última decisão) do ser humano, que deverá ser mais especializado nas funções que desempenhará com esta mudança de cenário.

Conforme MAMEDE (2011), os sistemas de automação seguem, em geral, o princípio básico de gerenciar o processo a partir de informações recebidas após a aplicação de uma ação de controle visando atender um objetivo final de controle e produção atendendo valores e parâmetros estabelecidos no controlador. A complexidade do sistema de gerenciamento e controle dependerá muito do nível de confiabilidade exigido no processo refletindo diretamente na complexidade da arquitetura do sistema, da mesma forma que a porcentagem de intervenção do homem durante o processo produtivo.

Algumas definições de arquiteturas, termos e formas de controle são definidas em OGATA (2000) e IBRAHIM (2006), sendo que os mais importantes utilizados como complemento durante a monografia estão pontuados a seguir:

- Sistemas de controle de malha fechada – sistema de controle no qual o sinal de saída é comparado ao sinal de entrada gerando um valor de erro que será corrigido pelo controlador de maneira a deixar o valor de saída o mais próximo possível de um valor estabelecido e
- Sistemas de controle de malha aberta – nestes sistemas o valor da saída não interfere em nada as condições de controle, ou seja, o valor da variável da saída não é realimentada para a entrada gerando um erro que é corrigido por meio de ações de controle.

A Figura 17 mostra um diagrama de blocos em malha fechada, sistema realimentado, contendo inclusive conversores de sinal do tipo analógico para digital e vice-versa, necessários para adequar o sinal ao controlador – muito semelhante ao que ocorre em sistemas comerciais na indústria.

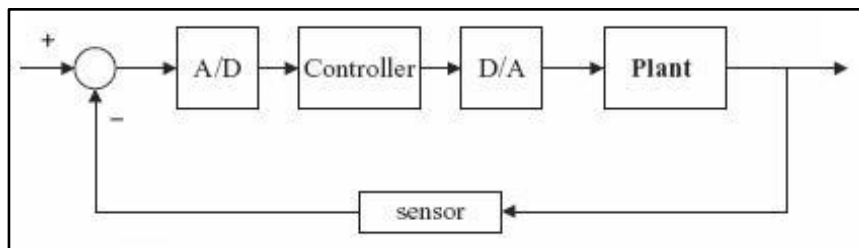


Figura 17 – Diagrama de blocos típico de um sistema de controle.
FONTE: IBRAIM, 2006

2.8.1 Sistemas de Controle

Conforme consta em IBRAHIM (2006) e MAMEDE (2011), os sistemas de automação possuem diversas funções dependendo do tipo de arranjo realizado e qual o objetivo primordial do sistema – para esta escolha existe uma dependência direta do tamanho, complexidade e importância do tipo de processo. É possível enumerar uma série de funções, mas as consideradas como primordiais e mais aplicadas diretamente na indústria de processo produtivo são as seguintes:

- Monitoração – permite ao operador da planta industrial o acompanhamento das grandezas de processo por meio de esquemas gráficos na tela da estação de operação – as informações

disponibilizadas no console são definidas, em geral, pelo cliente final, ou seja, o operador que estará utilizando o sistema;

- Alarme – conforme são determinados valores para as grandezas da planta, é possível configurar o sistema de maneira que o console de operação receba indicações destas irregularidades nos valores das grandezas ou eventos anormais que possam ter ocorrido;
- Intertravamento – condições de bloqueio ou permissão de operação de determinado sistema conforme um conjunto de regras e programações estabelecidas visando manter uma sequência de operação, segurança pessoal e do equipamento durante operação do sistema e estabilidade do sistema na condição de campanha da planta industrial;
- Armazenamento de informações (histórico) – registro de dados conforme as operações da planta são realizadas de maneira a permitir uma análise crítica em caso de falha ou na otimização do processo produtivo;
- Gráficos, oscilografias e tendências (*trend*) – com o advento da computação e digitalização de dados, os sistemas atuais permitem programações que organizem os dados mostrando as informações da melhor maneira ao operador – inclusive aqui surge mais uma importância para o armazenamento de dados para posterior análise e possíveis ações corretivas ou melhorias;
- Medição – com o auxílio dos instrumentos locados na planta - utilizando a transdução e a transmissão em campo – é possível visualizar os dados no centro de controle da planta (importância do sistema de transmissão de dados);
- Supervisão – função que permite garantir que um comando realizado ou enviado a planta foi devidamente realizado *in loco* conforme o esperado e no caso de não ocorrer a ação esperada, um alarme poderá ser gerado ou outra ação poderá ser tomada dependendo do tipo de intertravamento;
- Controle – ação aplicada ao sistema de maneira que a saída seja mantida em valores previamente estabelecidos e determinados;

conforme a topologia da malha de controle (por exemplo, malha aberta ou fechada) poderá existir sinal de realimentação, o que permitirá verificação das condições de saída após a aplicação de uma ação de controle;

- Comando – condição que permite a operação remota de um elemento instalado em campo e com ações físicas no processo, ou seja, após um comando (podendo ser proveniente da sala de operação) será aplicada uma ação real em um elemento físico da planta (disjuntor, relé, válvula de controle, entre outros) e
- Proteção – condição de controle que dependendo do tipo de intertravamento permitirá que condições seguras sejam mantidas durante o regime de operação, durante manobras no sistema produtivo ou no caso de situações de emergência, visando manter a integridade das pessoas e dos equipamentos da planta.

2.8.2 Controlador Lógico Programável – CLP

A seguir é apresentado um descritivo com um breve histórico da origem deste equipamento, a explicação das principais características do equipamento, as principais finalidade de aplicação quando foi concebido e uma das principais formas de programação, muito utilizada até os dias atuais.

2.8.2.1 Breve Histórico

A origem do CLP remonta ao ano de 1968 na fábrica da General Motors nos Estados Unidos com o nome, em inglês, de *modular digital controller* (MODICON – primeiro fabricante) e com invenção atribuída à Richard (Dick) Morley. A finalidade básica para desenvolvimento do atual CLP foi a de substituir os imensos gabinetes de relés que realizavam a lógica do processo por equipamentos mais confiáveis, seguros, possibilitassem modificações e compilações na programação de modo fácil e versátil, tivessem fácil disponibilidade no mercado, preços competitivos com os sistemas à relé e fosse robustos para operação em ambientes agressivos (poeira, umidade, interferências eletromagnéticas e outros) (BEGA, 2003).

O CLP (sigla originária do inglês *PLC – programmable logic controller*) inicialmente teria sigla apenas PC, mas na época estava ocorrendo o advento dos

computadores pessoais (do inglês *personal computer – PC*), que inclusive possuíam diferente propósito, permitiria confusão nas denominações, então foi adicionada uma letra (justificando o propósito do dispositivo – adicionado a letra ‘L’ de lógico ou do inglês *logic*) para evitar confusões de denominações e aplicações, que ao longo do tempo se justificou devido a compatibilidade e integração na operação dos computadores pessoais com os CLPs (BEGA, 2003 e GEORGINI, 2000).

Nas décadas seguintes o desenvolvimento e as inovações prosseguiram com advento, na primeira metade da década de 70, da computação surgem manipulações aritméticas, comunicação com computadores e instruções avançadas durante. Na segunda metade da década de 70, surgem melhorias significativas no armazenamento de informações (memória nos CLPs), controle de entradas e saídas remotas e controle de variáveis analógicas, principalmente de posicionamento (BEGA, 2003).

Na década de 80 os avanços e desenvolvimentos do *hardware* dos CLPs continuaram e chegando a influenciar a maneira como os projetistas de processo empregavam os dispositivos, pois surge avanços como: melhoria significativa no tempo de varredura de variáveis, redução de tamanho físico e emprego em pequenas aplicações, sistemas de *input and output (I/Os)* com alta capacidade, interfaciamento de entradas e saídas digitais permitindo maior integração de sistemas (possibilidade de processamento distribuído – início do chamado SDCD) e surgimento de interfaces complexas para aplicações rápidas (BEGA, 2003).

2.8.2.2 Constituição Básica

O CLP na realidade é composto por um conjunto de dispositivos que operando em conjunto resultam na operação sequencial das variáveis lógicas de entrada e saída – objetivo primordial do CLP – sendo que estes dispositivos são os seguintes: fonte de alimentação, unidade central de processamento – UCP (do inglês *central process unit - CPU*), memórias e dispositivos de entrada e saída (GEORGINI, 2000 e MORAES e CASTRUCCI, 2007).

Seguindo as definições de MORAES e CASTRUCCI (2007) e também constantes em GEORGINI (2000) é possível descrever os constituintes de um CLP da seguinte forma:

- Fonte de alimentação converte a tensão alternada em contínua para alimentar o controlador, em geral, quase todos os controladores possuem uma pequena bateria interna que no caso de falta de energia a programação no controlador não seja perdida;
- UCP é o controlador propriamente dito responsável pelo processamento das informações e acionamento das saídas conforme programação – também possui memória interna para auxílio no processamento;
- Memórias são os dispositivos para armazenamento das informações que podem ser acessíveis ou não pelo usuário, dependendo da finalidade da memória e
- Dispositivos de entradas e saída podem estar integrados fisicamente ao mesmo invólucro dos outros dispositivos ou podem ser cartões independentes interligados à UCP por meio de um barramento de informações, mas que possuem a mesma finalidade de receberem sinais advindos de sensores ou outras fontes digitais ou analógicas e devolvem acionamentos após processamento conforme programação carregada na UCP, sendo que podem, também, serem sinais analógicos ou digitais.

2.8.2.3 Linguagem de Programação – LADDER

Apesar de ter sido a primeira linguagem de programação desenvolvida para aplicações em CLPs, ainda atualmente é utilizada por praticamente todos os diversos fabricantes, pois é uma linguagem gráfica, de fácil identificação (semelhança com contatos físicos) e pequenas variações realizadas por diferentes fabricantes são facilmente assimiladas (GEORGINI, 2000). A Figura 18 apresenta a representação de contatos por dois fabricantes diferentes.

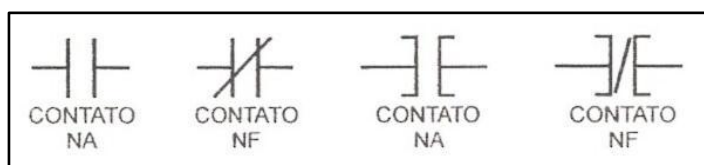


Figura 18 – Representação de contatos por diferentes fabricantes.
FONTE: Adaptado de GEORGINI, 2000, p.82.

O nome LADDER é advindo do inglês (*ladder* significa escada em português) – também podendo ser chamado de Histograma de Contatos ou Diagrama *LADDER* – é decorrente da utilização das duas barras verticais paralelas interligadas formando uma figura similar a uma escada com diversos degraus e cada um dos elementos (contatos, bobinas ou demais elementos disponíveis na linguagem de programação) alocados nas diversas linhas representa uma instrução na linguagem LADDER (GEORGINI, 2000 e BEGA, 2003). A Figura 19 apresenta um exemplo de diagrama *ladder* para acionamento de duas cargas motóricas.

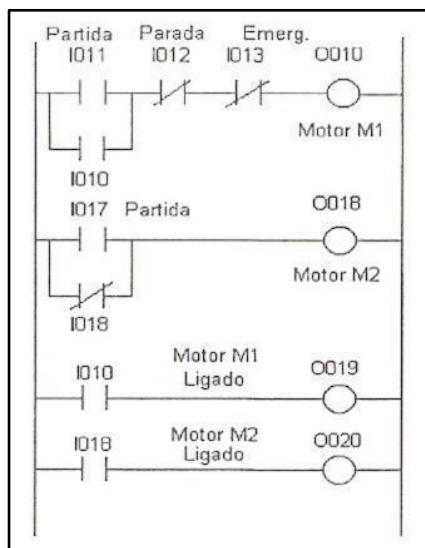


Figura 19 – Programa em Linguagem LADDER.
FONTE: BEGA, 2003, p. 479.

2.8.3 Arquitetura dos Sistemas de Controle

É apresentado em HIBRAHIM (2006) que a maneira de controle até início da década de 80 era concentrada em apenas um equipamento para controle integral da planta industrial, ou seja, todos os periféricos do controlador (computador - incluindo fonte de alimentação, teclado, monitor e demais periféricos), entrada e saídas (I/Os) e alimentações convergiam para este único ponto de controle. Esta estrutura apresenta diversas vantagens como: utilização de apenas um computador, facilidade de manuseio deste computador único e poucas pessoas envolvidas na operação.

Porém, atualmente, com a popularização da utilização de computadores e a consequente redução nos custos dos equipamentos, a forma de controle que está mais sendo difundida é a do controle distribuído (DCS – sigla do inglês *distributed control system*) (HIBRAHIM, 2006).

2.8.3.1 Breve Histórico do SDCD

No final da década de 70 foi realizado um estudo pela divisão de gerenciamento de sistemas da empresa americana Honeywell sobre rotinas de controle empregadas em salas de controle centralizadas, resultando na concepção original da interface homem máquina dos futuros SDCDs. Os resultados desta pesquisa serviram como base para quase todos os estudos posteriores sobre assunto de interfaces entre a máquina e o homem, incluindo estudos desenvolvidos por outros fabricantes. Os autores da pesquisa avaliaram as diversas ações dos operadores em condições normais e nos momentos críticos de operação e qual era o volume de informações que o operador poderia receber, ter um entendimento e processar de maneira coerente para então reagir com uma ação de resposta, sendo que este tempo de resposta é essencial e crítico em momentos de emergência (BEGA, 2003).

Em relação aos painéis de controle, a disposição física das informações não facilitava a rápida avaliação pelo operador das variáveis disponíveis no painel, sendo que muitas vezes era necessário o operador manter determinado afastamento físico do painel para conseguir perceber as variações das principais variáveis de processo em meio a inúmeros instrumentos e indicadores dispostos em painéis que ocupavam uma grande área – técnica eficiente e praticada por experientes operadores. Porém, esta técnica era eficiente em condições normais de operação, no caso do surgimento de alarmes, a técnica apresentava dificuldades pois o operador precisava se aproximar do painel para identificar pontualmente o tipo do alarme e na sequência localizar e se deslocar até o ponto de controle ou monitoramento da variável de processo alarmada para identificar discrepância (BEGA, 2003).

O estudo desenvolvido identificou a dificuldade do operador em manter a supervisão de muitas variáveis simultaneamente e indicou que estas informações deveriam ser passadas ao operador de maneira lógica, ordenada e agrupada. Foram também indicados a utilização de telas representativas do processo por meio de representações pictográficas (símbolos gráficos, coloridos e dinâmicos), ou seja, a antiga utilização de textos e tabelas deveria ser substituída pela representação de equipamentos, linhas, variáveis de processo de modo objetivo e prático para que o operador de maneira fácil e rápida visualizasse as anomalias e alarmes do sistema de processo (BEGA, 2003).

Também foi avaliada a condição de armazenamento dos registros (histórico) do processo, fato que permite ao operador avaliar ao longo do tempo passado as variações nas condições de processo, permitindo planejar estratégias de operação, identificar anomalias e rastrear problemas de maneira muito mais rápida e eficiente quando comparado ao sistema de registro em papel (BEGA, 2003). Estes gráficos de acompanhamento no SDCD são atualmente chamados de *trend*.

O primeiro SDCD comercializado foi projetado, montado e configurado pela empresa americana Honeywell e chamava-se TDC-2000 (sigla proveniente do inglês *Total Distributed Control*). Algumas das características dele são: controlador utilizado possuía 28 diferentes algoritmos de programação, era capaz de realizar o controle de 8 malhas e trabalhava com sinais de 1 a 5 Vdc que eram originados da conversão do sinal de 4 a 20 mA recebido (HONEYWHEEL Inc, 1985 e BEGA, 2003). A Figura 20 mostra o primeiro modelo de SDCD produzido e comercializado.

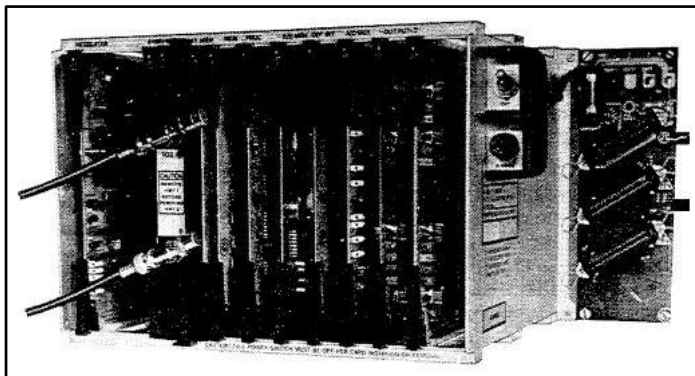


Figura 20 – SDCD Honeywell modelo TDC.
FONTE: Honeywell, 1985.

2.8.3.2 Sistema Digital de Controle Distribuído – SDCD

Esta arquitetura de controle consiste na instalação de diversos computadores – ou controladores – instalados em diversas partes da planta realizando ações de controle independentes, sendo que é importante destacar que este tipo de funcionalidade somente foi possível devido aos avanços nas redes de computadores, na redução do custo dos equipamentos (necessidade de diversos equipamentos distribuídos em vários locais) e consequente popularização da utilização deste tipo de tecnologia (IBRAHIM, 2006).

O controle distribuído apresenta como vantagens: melhor performance quando comparado ao sistema centralizado (resultado da distribuição de ações de controle); são sistema mais confiáveis, pois no caso de falha de um dos computadores apenas uma pequena parcela da planta sofrerá o impacto da parada – e ainda assim, o sistema permite absorção das funções por outras estações – o que não ocorre no sistema centralizado, que no caso de falha ocasiona a parada total da planta; facilidade de expansão (apenas conexão e configuração do computador na rede) e possuir maior flexibilidade e facilidade de ajustes para as exigências da planta e do processo produtivo (IBRAHIM, 2006).

Sensores e atuadores na arquitetura do controle distribuído podem ser conectados à computadores locais (próximos aos elementos de controle) e com isso executarem algoritmos de controle locais utilizando o chamado controle digital direto (do inglês *direct digital control* – DDC). Nesta forma de controle o computador local é apenas responsável pelo comando direto à unidade de processo, o que permite adicionar uma camada adicional de supervisão, uma vez que o controle e as instruções das ações estão carregados diretamente no computador local (IBRAHIM, 2006).

O arranjo do SDCCD, em geral, é utilizado em sistemas do tipo cliente-servidor, ou seja, neste arranjo um computador é designado como servidor (existe a possibilidade de mais computadores serem atribuídos a esta função, dependendo da aplicação e do porte do sistema) e ficando com o controle comum de toda a planta, enquanto isso, as demais estações, chamadas de clientes, ficam subordinadas às instruções do computador mestre (IBRAHIM, 2006). Um exemplo simples para esta definição de cliente-servidor é a tarefa de um computador cliente em realizar a aquisição de dados de um sensor analógico e enviar as informações ao servidor a cada segundo. A Figura 21 apresenta um esquemático de rede, um exemplo de SDCCD; é possível perceber diversas topologias de rede e a maneira distribuída dos computadores (controladores).

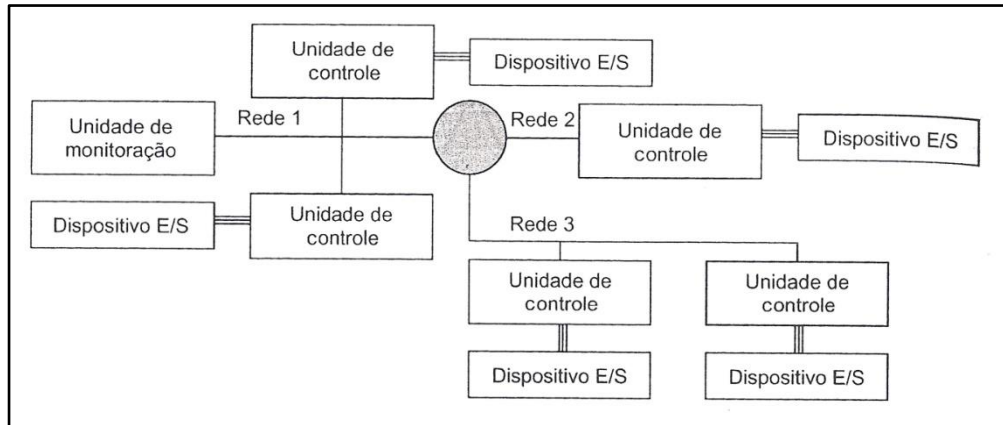


Figura 21 – Esquemático da arquitetura SDCC.
FONTE: MORAES e CASTRUCCI, 2007, P. 158.

2.8.3.3 Sistemas de Segurança e Intertravamento

Na indústria, dependendo da área de atuação, os processos produtivos podem envolver inúmeras e complexas etapas, além da quantidade imensa de instrumentos, elementos de controle, controladores e demais dispositivos que são empregados na planta. Considerando todas as condições normais ou dentro de limites aceitáveis, a operação por meio dos sistemas clássicos é suficiente, mas no caso de uma ocorrência grave (podendo significar a falha do sistema de controle – por exemplo, SDCC) devem existir sistemas preparados para auxiliar no controle e nas medidas de contingências.

Com a função primordial de realizar a parada de emergência no processo ou evitando a operação insegura, surgem os chamados sistemas instrumentados de segurança ou sistema de intertravamento de segurança (SIS – ou do inglês *Safety Instrumented System*). Quando as condições de processo ultrapassarem determinados valores estabelecidos ou que representem condições perigosas, estes sistemas devem atuar com intuito de manter a integridade das pessoas e dos equipamentos (BEGA, 2003).

Os conceitos modernos vão além da simples análise considerando medidas de proteção como se fossem dispostas em camadas, que para ser possível atingir o cerne (falha) deveriam ser vencidas todas as barreiras estabelecidas, as atuais análises consideram os efeitos globais de um evento. Calculando o risco envolvido e comparando com o risco aceitável é obtido o chamado SIL (*Safety Integrity Level*), sendo que a lacuna existente entre o calculado e o aceitável deverá ser completado com a utilização do SIS (BEGA, 2003).

É importante destacar que para segurança de processo não deve existir o paradigma que a segurança é estabelecida com o desligamento de todos os equipamentos, um exemplo a ser citado, no caso de um reator que realiza uma reação exotérmica e necessita de refrigeração contínua, é possível afirmar com certeza que no caso de emergência a condição mais segura é com a bomba de resfriamento ligada. Com o contexto deste exemplo é possível explicar as duas formas de operação do SIS, na primeira, o sistema realiza a parada segura da unidade quando determinadas variáveis ultrapassarem valores previamente estabelecidos, na segunda forma, o sistema impede que determinados equipamentos ou dispositivos sejam ligados se condições prévias não estiverem satisfeitas, como por exemplo, o acionamento de uma máquina mecânica sem o sistema de lubrificação estar em funcionamento – estas condições permissivas de energização ou a sequência de desligamentos é chamado de intertravamento (BEGA, 2003).

O intertravamento está diretamente ligado com a chamada matriz de causa e efeito, na qual determinadas ações (que podem representar um desligamento) necessariamente implicarão em outra, visando a integridade durante o processo e a segurança de pessoas e equipamentos.

Conforme apresentado em MORAES e CASTRUCCI (2007) e no item 2.8.4, para a gestão da automação a matriz de causa e efeito é um documento muito importante, principalmente no tocante a segurança do processo que representa diretamente segurança para pessoas e equipamentos. A Figura 22 apresenta parte de uma matriz de causa e efeito na qual uma causa (disposição na vertical) implica em um ou mais efeitos (dispostos na horizontal). Vale destacar que para auxiliar e referenciar no contexto do processo existe a indicação que qual é o *piping and instrumentation diagram* (P&ID) que esta matriz abrange.

Número		45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57		
Fluxograma DE-XYZ-3404)		005	005	005	005	005	005	005	005	005	005	005	005	005		
Efeito	Tag	-	-	-	-	XY-020	XY-021	XY-022	XY-024	XY-025	XY-026	PV-014	PDV-003	PDV-005		
	Evento	Corte de forn. de ener. elét. (DL-2700-1A)	Corte de forn. de ener. elét. (DL-2700-1B)	Desliga A B-122 208 A/B (notas 4 EB)	Desliga A B-27001 A/B	Fecha XV-020 (nota 5)	Abre XV-021 (nota 5)	Fecha XV-022 (nota 5)	Fecha XV-024 (nota 5)	Fecha XV-025 (nota 5)	Abre XV-026 (nota 5)	Abre damper	Fecha PDV-003	Fecha PDV-005		
Causa	Tag															
Evento	Tag															
Nível muito baixo de HC no DL-27001A	LSSL-004	X			X											
Nível muito baixo de HC no DL-27001B	LSSL-008		X		X											
Corrente elétrica alta no DL-27001A	ISHH-001	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Corrente elétrica alta no DL-27001B	ISHH-002		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Pressão muito alta a jusante da PDV-003	PSHH-004												X			
Pressão muito alta a jusante da PDV-005	PSHH-006													X		

Figura 22 – Exemplo de matriz de causa e efeito para unidade de processo.
FONTE: MOARES e CASTRUCCI, 2007, p. 190.

Os sistemas de segurança estão em evolução e diversas são as contribuições, muitas normas nacionais e internacionais estão sofrendo revisão, diversos parâmetros e exigências estão ficando mais rígidas, arquiteturas de plantas são modificadas e fabricantes estão desenvolvendo aplicações mais robustas e que atendam os novos requisitos (BEGA, 2003).

2.8.4 Instrumentação

Conforme explicado no item 2.8.3.2, a proposição de aplicar o controle distribuído é para que justamente possa ocorrer a descentralização das ações de controle em determinada planta industrial, mas além da condição de controle, o sistema distribuído permite a conexão de sensores, atuadores e elementos de controle diretamente ao controlador.

Neste contexto, são de grande importância os dispositivos instalados em campo, em especial, os dispositivos que permitem a aquisição e leitura de grandezas de processo. Dois conceitos na área de instrumentação merecem destaque, o primeiro conceito é definido em HELFRICK e COOPER (1994) como:

Instrumento [...] dispositivo de determinação do valor ou grandeza de uma quantidade ou variável. (HELFRICK e COOPER, 1994, p.1)

e a segunda definição, conforme MORAES e CASTRUCCI (2007), é:

sensores são dispositivos amplamente utilizados na automação industrial que transformam variáveis físicas, como posição, velocidade, temperatura [...], em variáveis convenientes. (MORAES e CASTRUCCI, 2007, p. 47)

É interessante ressaltar que em HELFRICK e COOPER (1994) apresentam a segunda definição de modo muito semelhante, porém denominam de transdutor este dispositivos capaz de transformar energia de um sistema para outro.

Considerando a conversão de energias, sensores ou transdutores, em geral em sistemas com forte presença da eletrônica, é usual a conversão da informação em sinais de tensão ou corrente, sendo que esta segunda opção é mais robusta devido à maior imunidade à ruídos eletromagnéticos e implica que o receptor tenha um valor de impedância relativamente baixo. Quando a distância for um a maior dificuldade, é indicada o emprego da fibra ótica (MORAES e CASTRUCCI, 2007).

Em aplicações industriais, principalmente em processos contínuos de produção, dependendo da complexidade dos processos a serem monitorados e controlados, a quantidade de instrumentos necessários pode chegar a números representativos, além disso, torna-se necessário existir uma representação unificada e que represente fielmente o processo e variáveis a serem controladas e qual seria a forma de realizar este controle, conforme MORAES e CASTRUCCI (2007), para ser realizada a gestão da automação a organização destas informações é de vital importância.

Com a finalidade de estabelecer e uniformizar a representação e identificação de instrumentos ou dispositivos e as respectivas funções, sistemas de instrumentos e funções de *software* utilizadas nas medições, monitoramento e controle, foram normatizadas as formas dos esquemas e símbolos gráficos a serem utilizados, criando assim os chamados P&ID, empregados diretamente na instrumentação e automação (ISA 5-1, 2009). A Figura 23 mostra um exemplo de P&ID representando uma parte de um processo industrial.

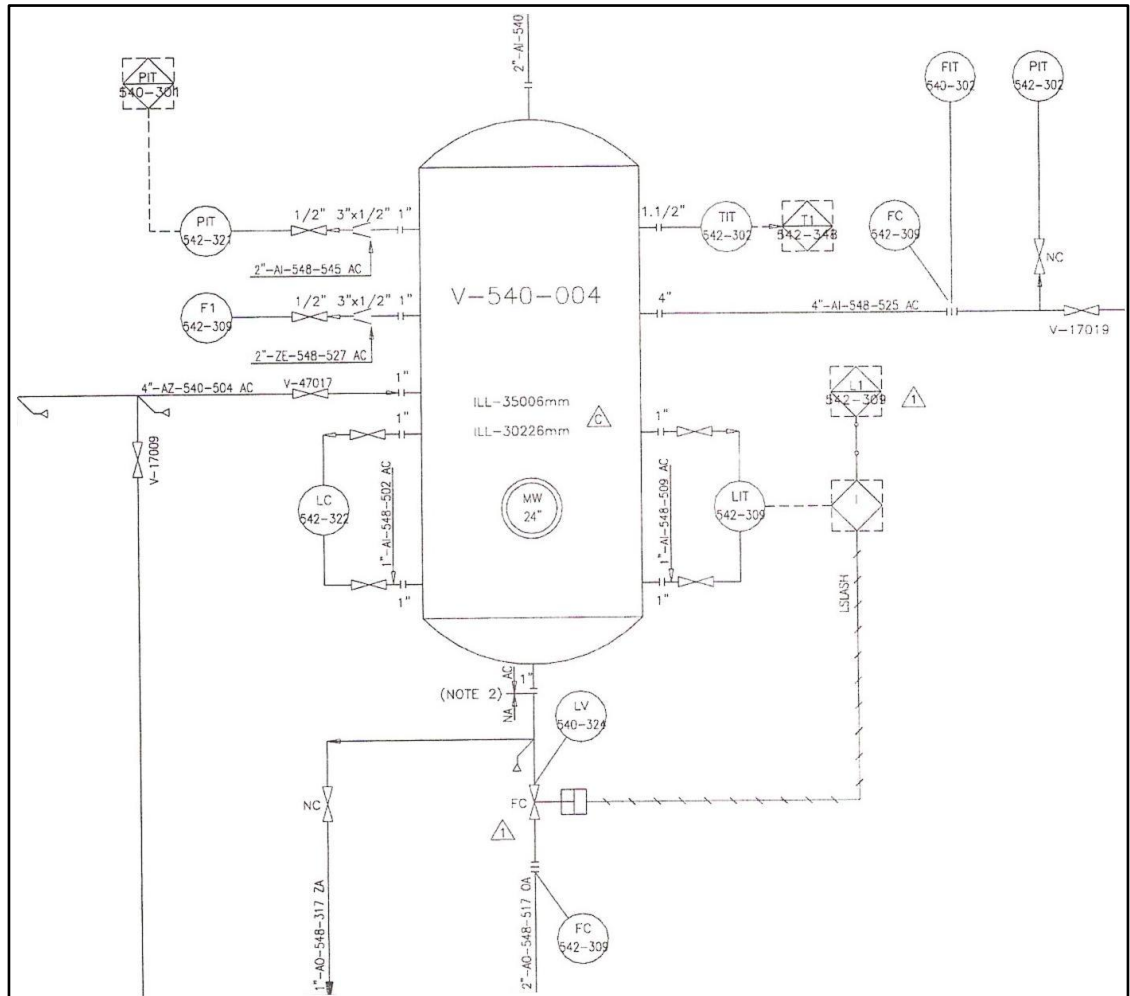


Figura 23 – Exemplo de parte de P&ID de processo.
FONTE: MORAES e CASTRUCCI, 2007, P. 141.

2.9 REDES DE COMUNICAÇÃO

Considerando YAMAGUCHI (2006) os complexos e modernos sistemas industriais de processo são sistemas fortemente automatizados, constituídos por dispositivos instalados no campo e controladores distribuídos pela planta. Além das particularidades individuais das diferentes plantas de processo, todos os dispositivos instalados necessitam de comunicação rápida e eficiente, pois os controladores (ou também chamados computadores), mesmo possuindo arquitetura complexa, conseguem ter alto poder de processamento e altíssimas velocidades de reposta.

A comunicação necessária entre os diversos dispositivos constituintes da rede consiste no envio e recebimento de informações (mensagens codificadas) que são emitidas, transmitidas e recebidas através de um meio físico que permite conexão entre os dois ou mais emissores e receptores da rede. As informações que

são enviadas devem ser compreendidas no receptor, ou seja, deve existir uma padronização nas formas de envio e recebimento para que as mensagens possam trafegar de maneira eficiente, possam ser decodificadas e corretamente processadas no receptor. Outro ponto importante é a padronização no formato da comunicação, ou seja, a forma de envio, verificação de erros, sequência de envio, endereçamento e demais particularidades que devem ser seguidas para dois sistemas de origens diferentes possam realizar a comunicação eficiente. Todas estas exigências surgem devido ao fato da existência de inúmeros fabricantes no mercado, além do surgimento de novos fabricantes, e a condição de aplicações simultâneas de diversos dispositivos provenientes de fabricantes diversos (SOUSA, 2002).

2.9.1 Topologias de Rede

Conforme COMER (2001), foi no início da década de 70 que a interconexão entre computadores começou a mudar e sofrer alterações surgindo a forma de comunicação por meio das redes locais (*local areas networks – LANs*) como solução para as conexões dedicadas (ponto a ponto) e dentro deste cenário surgem as configurações físicas possíveis de conexão entre computadores. A seguir estão descritas de maneira breve as principais e mais utilizadas topologias de rede.

- Estrela – os diversos computadores conectados a um ponto central (dispositivo eletrônico – em geral o *hub*) que distribui as mensagens da rede para todos os usuários de maneira indistinta;
- Anel – cada um dos elementos da rede está conectado ao subjacente até que o último volte a ser conectado ao primeiro, fechando assim uma malha de comunicação circular, ou seja, o arranjo forma um *loop* fechado de conexões, as quais não precisam ser necessariamente físicas, sendo possível um arranjo lógico entre os integrantes da rede e
- Barramento – consiste em uma topologia que emprega um único cabo longo no qual os diversos computadores integrantes da rede são conectados, de maneira que as mensagens enviadas por um dos integrantes é recebida por todos, porém apenas interpretada pelo receptor endereçado e codificado (surgindo a necessidade da correta

coordenação no envio das mensagens evitando conflitos e simultaneidades). É importante destacar que as extremidades do cabo neste tipo de topologia devem possuir terminais apropriados para evitar o efeito de reflexão de onda.

2.9.2 Protocolos

Conforme COMER (2001) e SOUSA (2002), o dispositivo de comunicação consiste em um *hardware* capaz de realizar a transferência de bits entre dois pontos, porém, o bit, propriamente dito, não é apropriado para ser transmitido devido à incompatibilidade com programas que utilizam linguagens de programação em nível mais elevado, pois a manipulação do *bit* propriamente é realizada por linguagens de programação chamadas de linguagem de máquina ou de baixo nível. Como solução para esta dificuldade de compatibilidade, os diversos *hardwares* de comunicação são incorporados com aplicativos (*softwares*) capazes de realizarem estas adequações de modo que todas as partes envolvidas na comunicação utilizem as mesmas regras de formatação de mensagens e operem os mesmos tipos de sinais e informações, permitindo entendimento em ambas as partes.

Uma analogia com a diplomacia é proposta em COMER (2001), onde para realizar a comunicação entre as diversas nações com diferentes idiomas é estabelecido um idioma comum para ambas as partes para que então ocorra o entendimento por todos os envolvidos, este tipo de acordo é chamado de protocolo. Nas comunicações, o conjunto de regras e convenções para comunicação, considerando duas camadas de mesmo nível em equipamentos diferentes, é conhecido como protocolo de rede ou protocolo de comunicação entre computadores (COMER, 2001 e SOUSA, 2002).

2.9.3 Modelo OSI Conforme Norma ISO

Com o advento dos protocolos de comunicação surge uma nova dificuldade, pois a complexidade existente para elaborar um código unificando todos os projetistas seria uma tarefa quase irrealizável devido à imensa quantidade de informações necessárias na mesma codificação. Mas a solução obtida foi a divisão

em subpartes do problema principal, ou seja, a dificuldade em implementar um código único e muito complexo foi resolvido com o surgimento do conceito do chamado modelo de camadas (do inglês *layering model*) o qual foi estabelecido como padrão para desenvolvimento das soluções de comunicação (COMER, 2001).

Para estabelecer oficialmente perante todos os projetistas dos fabricantes de dispositivos de comunicação, a *International Organization for Standardization* – ISO, organização internacional para padronizações definiu o chamado Modelo de Referência de 7 Camadas, permitindo a criação de um modelo de comunicação entre máquinas, denominado de OSI (do inglês *open systems interconnection*), aplicável à comunicação de dados e que não depende de uma arquitetura específica e serve de base para redes de curta até longa distância (COMER, 2001).

Considerando as definições de COMER (2001) e KAKUDA (2006), a seguir são apresentadas as sete camadas do modelo OSI definido pela ISO e um breve comentário sobre cada uma, as camadas são as seguintes:

- Física – representa a comunicação direta entre o *hardware* propriamente dito, ou seja, controle de sinais elétricos, acesso, confirmações e velocidade de transmissão;
- Enlace de dados – especifica a forma de organizar os quadros para transmissão e a forma de transmiti-los na rede;
- Rede – determina a forma de endereçamento da rede permitindo o envio da mensagem para o destinatário correto e a maneira como pacotes de dados são enviados de uma ponta a outra da rede;
- Transporte – os protocolos desta camada estão entre os mais complexos, responsáveis pela recepção dos dados, remontagem e verificação dos dados recebidos para repasse às camadas seguintes, operando como uma interface entre as camadas mais baixas e as mais elevadas;
- Sessão – especifica detalhes de transferência entre dois computadores, sincronizando a forma de transmissão, detecção de erros e forma de reinício no caso de perda de rede;
- Apresentação – determina a forma de representação dos dados, pois diferentes fabricantes incorporam aos equipamentos formas particulares de representações internas e

- Aplicativo – realiza a interface com o programa que realizou a solicitação e determina a maneira de utilização da rede por este programa.

A Figura 24, apresentada em SOUSA (2002), representa as sete camadas do modelo OSI permitindo melhor entendimento dos posicionamentos das diversas camadas e a forma como estão organizadas e interligadas.

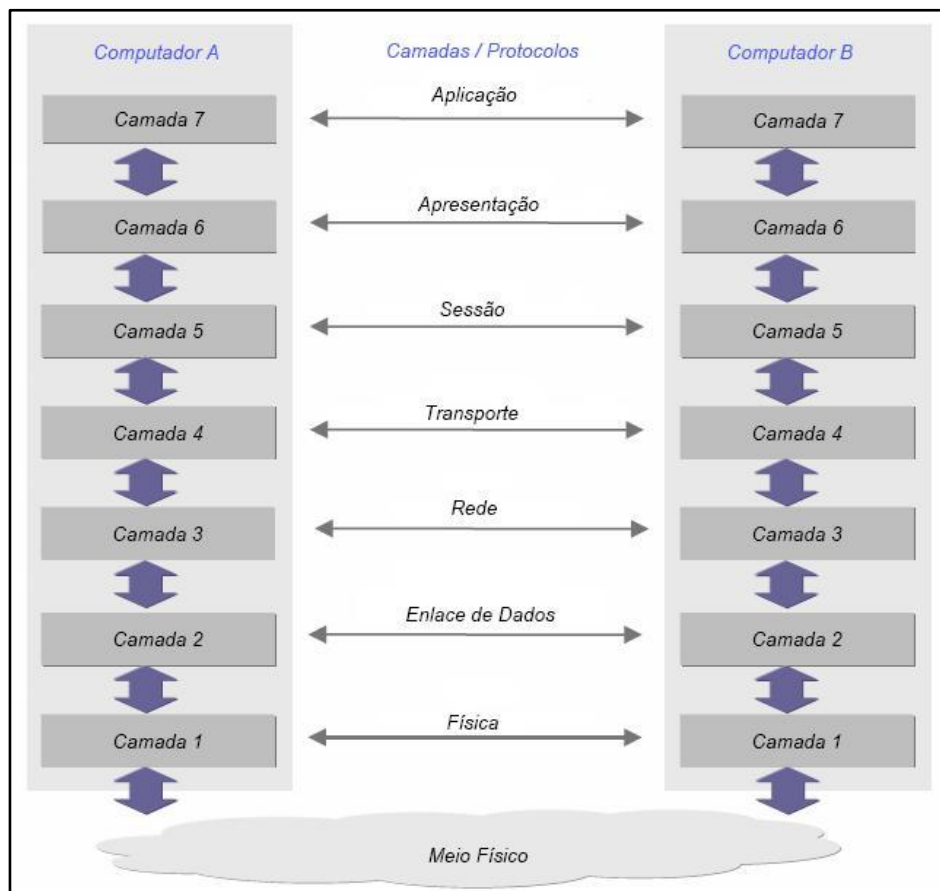


Figura 24 – Representação das camadas do modelo OSI.
FONTE: adaptado de SOUSA, 2002.

2.9.4 Ethernet

O padrão *ethernet* especifica e padroniza a forma de comunicação entre dispositivos da rede, ou seja, desde o formato dos quadros, prioridades, tensões dos sinais, tipos de portadoras empregadas e demais informações necessárias à comunicação são definidas e delimitadas neste padrão. A principal característica deste tipo de rede é a configuração em topologia do tipo barramento, na qual existe o compartilhamento de um único meio de transmissão, com isso, é imprescindível a

condição de coordenação na transmissão, para a função de detecção de portadora na linha (rede) é utilizado um esquema de coordenação chamado *Carrier Sense Multiple Access (CSMA)* (COMER; 2001).

2.9.5 Protocolo IEC 61850

A atualização dos antigos sistemas eletromecânicos empregados em sistemas de automação de subestações (SAS) foi possível, principalmente, graças ao advento dos sistemas microprocessados que utilizam sinais digitais. Com a utilização deste tipo de sinais surge a possibilidade de utilização dos chamados dispositivos eletrônicos inteligentes (sigla do inglês *intelligent electronic device* – IED) para desempenho das funções de automação da subestação (proteção, monitoramento, controle e demais funções), antes totalmente realizado por meio de relés eletromecânicos, sinais analógicos e pulsos de comando (IGARASHI, 2007 e IEC TR 61850-1, 2003).

As aplicações industriais, pelo histórico de outros equipamentos, demonstraram a necessidade do desenvolvimento de um protocolo de comunicação padrão aplicável aos IEDs dos diversos fabricantes, pois nas aplicações industriais existe a necessidade existência da interoperabilidade e intercambialidade entre IEDs de diferentes fabricantes (IEC TR 61850-1, 2003). Como resultado do esforço para convergir em um padrão único, resulta a criação da norma IEC 61850, que utiliza três métodos principais, convergindo em um padrão único, sendo os métodos: decomposição em funções, fluxo de dados e modelagem da informação (IGARASHI, 2007). De modo mais detalhado, cada uma das três funções anteriores é explicada da seguinte forma, conforme IGARASHI (2007) e IEC TR 61850-1 (2003):

- Decomposição em funções – utilizada no entendimento da lógica entre sistemas de funções distribuídas, sendo que este elemento está presente nos termos do nó lógico – que possui descrição das funções, subfunções e interfaces;
- Fluxo de dados – necessário para que ocorra o entendimento nas interfaces de comunicação entre componentes e requisitos funcionais do sistema e
- Modelagem da informação – utilizado na definição da sintática e semântica da informação.

Continuando a análise, mas agora apenas em (IEC TR 61850-1, 2003), é possível obter as seguintes importantes definições:

- Interoperabilidade - capacidade de dois ou mais IEDs, podendo ou não ser do mesmo fabricante, trocar informações para correta execução das funções neles programadas;
- Intercambialidade – possibilidade de troca de um dispositivo por outro de mesma função, porém de outro fornecedor, não necessitando realizar alterações em outros elementos do sistema (por exemplo, tensão de alimentação, formato físico do invólucro etc.);
- IED – dispositivo que possui um ou mais processadores (controladores) e que podem enviar e receber sinais de controles e dados (por exemplo, relés de proteção elétrica, controladores etc.);
- Nó Lógico – menor parte de uma função e que pode realizar a troca de informações e
- *Bay* – consiste em subpartes de um sistema, as quais possuem funcionalidades semelhantes e estão interconectadas.

2.9.6 HART

O protocolo de comunicação *Highway Addressable Remote Transducer* (HART) foi criado pela empresa Rosemount na década de 80 e utilizando protocolo aberta às demais empresas com interesse de utilização. Devido ao protocolo ser aberto, em 1990, as empresas que utilizavam o protocolo formaram um grupo que no ano de 1993 culminou na fundação da HCF (*HART Communication Foundation*), organização sem fins lucrativos (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

O protocolo HART apresenta grande fidelidade para aplicações de transmissão de dados a longas distâncias, fácil utilização e a principal característica está na simultaneidade durante a transmissão em um único meio, ou seja, permite é possível realizar a transmissão digital (HART) juntamente com sinal analógico (4 a 20 mA), condição que permite utilização de cabos já instalados (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

Concebido para operar com o padrão analógico de sinais 4 a 20 mA, o protocolo suporta modos de comunicação aplicados à medidas de processo e equipamentos de controle. A especificação deste protocolo também está baseado no

modelo OSI (mais detalhes no item 2.9.3), correspondendo diretamente a três camadas: física, enlace de dados e aplicação. O Gráfico 4 apresenta a dupla transmissão de dados, ou seja, o protocolo HART juntamente com o sinal analógico.

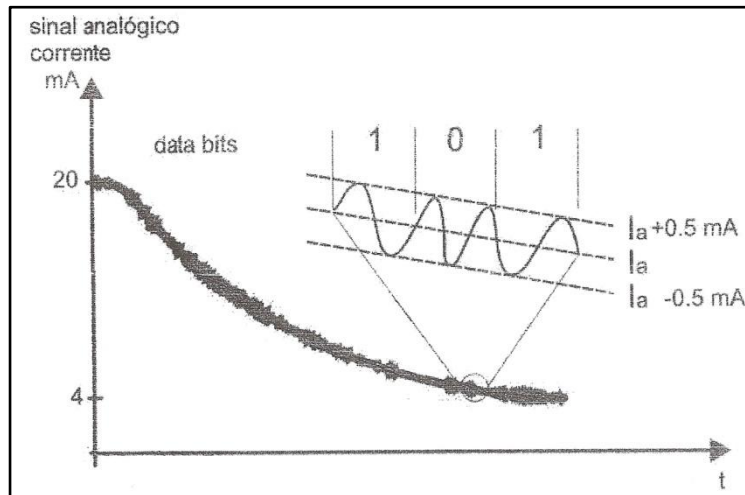


Gráfico 4 – Sinal HART e analógico 4 a 20 mA transmitido conjunta.
FONTE: Adaptado de ALBUQUERQUE e Alexandria, 2009, p. 192.

Além da concepção para operar conjuntamente com sinais analógicos, o protocolo HART, originalmente aplicado em transmissores, opera no modo *multidrop*, ou seja, é possível realizar a comunicação entre os dispositivos instalados em paralelo. O modo *multidrop* permite conexão de até 15 dispositivos, limitados pelo dimensionamento do cabo – pois o dispositivo utiliza a corrente elétrica (4 mA) do próprio sinal analógico para alimentação – e o mestre da rede consegue distinguir os elementos integrantes da rede devido ao endereçamento (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

2.9.7 MODBUS

É um protocolo para arquiteturas de rede para dispositivos de campo ligados em barramento e que foi criado pela empresa MODICON para os próprios equipamentos (protocolo proprietário), mas com a utilização do protocolo por diversos outros fabricantes, acabou sendo aberto pela própria MODICON (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

O protocolo MODBUS é baseado na arquitetura de equipamentos do tipo mestre-escravo, na qual os escravos não podem realizar comunicação entre si sem passar primeiramente pelo mestre, para o caso de comunicação do mestre com os escravos, duas formas são possíveis, na primeira o mestre requisita informação de determinado escravo e aguarda a resposta (modo requisição) e na segunda, o

mestre envia o requisição para todos os escravos, mas apenas o escravo endereçado na mensagem responde (modo difusão) (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

Ainda considerando as explicações contidas em ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA (2009), para o mestre são atribuídas funções em que ele deve garantir:

- Troca de informações com estações de controle local (ECL) ou equipamentos de campo;
- Comunicação com a IHM;
- Comunicação com os outros mestres ou controladores para assegurar a gestão centralizada do controle e
- Carregamento de parâmetros ou programação dos escravos.

2.9.8 Profibus

Protocolo de comunicação aberto (não proprietário), disponível por praticamente todos os fabricantes, possui aplicações na automação industrial e também em outras áreas (automação predial, por exemplo) e muito aplicada em redes de campo (*fieldbus*). Este protocolo está baseado no *European Fieldbus Standard 50170 e 50254* (EN 50170 e EN 50254) e pelo padrão da *International Electrotechnical Commission 61158* (IEC 61158) (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

É um protocolo do tipo mestre-escravo, no qual os controladores estão descentralizados e ligados em rede diretamente no campo e os mestres ao final da transmissão emitem uma mensagem sem solicitação, a codificação chamada de estações ativas e os escravos, também chamados de estações passivas, não possuem direito de acesso direto ao barramento de comunicação, a menos que ocorra a solicitação do mestre (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

2.9.8.1 Profibus DP

É um protocolo dimensionado para transmissão de informações com elevada velocidade na camada mais inferior da hierarquia de automação, ou seja, dos dispositivos instalados em campo, desta forma os dispositivos controladores (por exemplo, CLP) se comunicam com os dispositivos de campo (por exemplo, válvulas,

drivers de controle e I/Os) com extrema velocidade e de maneira cíclica, permitindo configurações, diagnósticos e alarmes (ALBUQUERQUE e ALEXANDRIA, 2009).

2.10 COMPRESSORES

Por ser um elemento de interesse no assunto desenvolvido nesta monografia, alguns conceitos básicos e fundamentais sobre compressores, em especial os do tipo alternativo, devem ser apresentados e detalhados, sendo assim e com base em COSTA (1978) e HOUAISS (2001) define-se compressor como máquina ou estrutura mecânica com finalidade e capacidade de comprimir fluídos elásticos por meio do aumento da pressão.

Segundo NÓBREGA (2011), as características e o dimensionamento de determinado compressor dependerão das particularidades do tipo de gás que será empregado e qual será a forma de operação do equipamento, considerando de maneira conjunta o processo onde será empregado. As principais particularidades dos fluídos (na maioria das aplicações, gases) a serem comprimidos são: compressibilidade, expansibilidade, difusibilidade e densidade.

Constam em HOUAISS (2001) as seguintes definições: compressibilidade é a propriedade de uma substância de ter o volume reduzido devido à aplicação de uma pressão externa; expansibilidade é a qualidade ou propriedade de tornar amplo, alargar ou dilatar; difusibilidade característica de se espalhar largamente por todas as direções (disseminação) e densidade que é relação entre massa e volume de uma substância.

Em COSTA (1978) a divisão dos tipos de compressores é baseada essencialmente no movimento mecânico do sistema principal de compressão, porém, em NÓBREGA (2011) a divisão dos tipos de compressores é realizada com base em dois critérios diferentes que são as características dos gases de aplicação do compressor e quais serão as condições operacionais do equipamento.

Considerando as definições e a divisão apresentada em NÓBREGA (2011) e por concordar e considerar uma divisão mais abrangente, que utiliza como fator de ponderação as particularidades de funcionamento (operacionalidade) essencialmente mecânicas em conjunto com o regime de processo onde estarão inseridas, é então apresentado para os compressores a seguinte divisão:

- Volumétricos alternativos (diafragma / pistão);

- Volumétricos rotativos (palhetas / parafusos / lóbulos);
- Dinâmicos centrífugos (fluxo radial);
- Dinâmicos axial e
- Dinâmicos ejetores.

Cada tipo de compressor apresenta faixas e capacidades próprias de trabalho conforme o tipo construtivo. A Tabela 2 apresenta as características quantitativas para cada um dos tipos de compressores descritos segundo a divisão de NÓBREGA (2011).

Tabela 2 – Limites operacionais para tipos de compressores.

Tipo		Vazão Máxima na Sucção [m ³]	Pressão Máxima Descarga [psi]
Volumétrico	Alternativo	3.500 à 5.000	3.5000 à 50.000
	Rotativos	50.000	100 a 250
Dinâmicos	Centrífugos	200.000	3.000 à 6.000
	Axiais	2.000.000	80 – 130

FONTE: NÓBREGA, 2011, p. 30.

2.10.1 Compressores Volumétricos

O funcionamento básico está calcado na admissão de determinado volume de gás na câmara de compressão, através da válvula de sucção, onde o gás permanece por um curto período de tempo até sofre a ação das partes móveis da máquina, acionada por meio externo, e então o gás com pressão superior a pressão de entrada é eliminado através da válvula de descarga (NÓBREGA, 2011). A seguir são apresentadas, brevemente, as principais características dos principais tipos de compressores volumétricos, conforme NÓBREGA (2011).

2.10.1.1 Alternativo de Diafragma

Equipamentos, em geral, de pequeno porte nos quais a variação de volume é realizada pelo movimento de um diafragma; são máquinas muito utilizadas na compressão de ar de instrumento devido à característica de completo isolamento entre gás comprimido e ambiente. A Figura 25 apresenta os componentes e modo de funcionamento deste tipo de compressor alternativo.

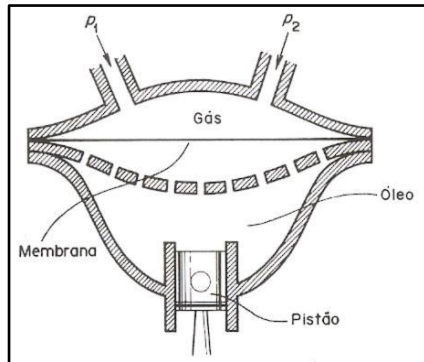


Figura 25 – Modo de funcionamento do compressor de diafragma.
FONTE: COSTA, 1978, p. 1.

2.10.1.2 Alternativo de Pistão

Determinado volume de gás é confinado na câmara de compressão e por ação de um êmbolo sofre compressão (redução do volume) e conseqüente aumento na temperatura; após a compressão o gás é eliminado através da válvula de descarga e deslocado para outro local com pressão compatível; o pistão retornado à posição original, faz surgir uma pressão levemente negativa na câmara de compressão em relação ao reservatório de sucção. Na Figura 26 é possível identificar o virabrequim e a biela – alguns autores, atualmente, empregam a denominação de cruzeta para denominar este mesmo elemento – na parte inferior e o pistão (ou êmbolo) e câmara de compressão na parte superior.

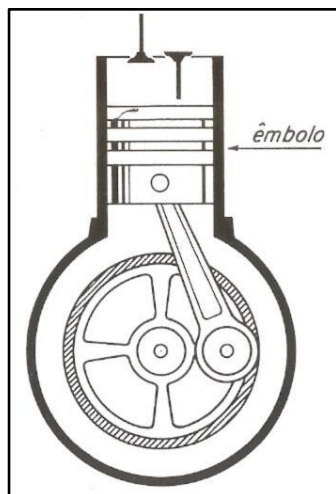


Figura 26 – Compressor de pistão representado em corte (virabrequim, cruzeta, pistão e câmara).
FONTE: COSTA, 1978, p. 9.

2.10.1.3 Palhetas Deslizantes

Compressor consiste em um rotor contendo diversas palhetas deslizantes no sentido radial do rotor que gira excentricamente em relação à carcaça (invólucro das partes girantes) e à medida que ocorre o giro do rotor as palhetas são forçadas contra as paredes da carcaça (força centrífuga) mantendo as cavidades hermeticamente fechadas. A Figura 27 apresenta a disposição das palhetas deslizantes em um rotor.

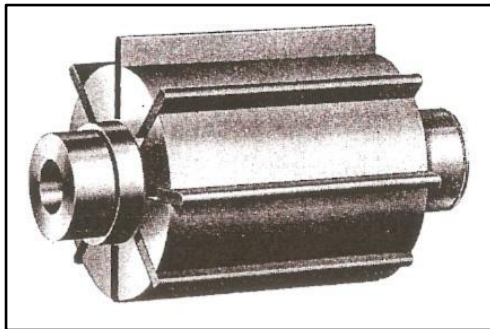


Figura 27 – Disposição das palhetas em um rotor de compressor de palhetas deslizantes.

FONTE: COSTA, 1978, p. 5.

O volume entre duas palhetas varia durante o giro do rotor, desde um espaço máximo durante a sucção, sendo progressivamente reduzido no ciclo de compressão e por fim, com a pressão máxima especificada, o gás é expelido através do orifício de descarga (COSTA, 1978). A Figura 28 apresenta este ciclo de admissão, compressão e descarga.



Figura 28 – Representação do ciclo de compressão do compressor de palhetas.

FONTE: COSTA, 1978, p. 5.

2.10.1.4 Parafuso

Máquina composta por um par de elementos helicoidais (uma peça macho e outra fêmea) girando em sincronia causando abertura das cavidades internas, resultantes do acoplamento das duas engrenagens, e realizando a sucção do gás de

interesse com movimento axial do fluido e consequente descarga após passagem pelos elementos rotativos de compressão.

Uma característica interessante deste tipo de compressor consiste no fato que as duas peças girantes se mantêm afastadas, por meio de engrenagens, praticamente não gerando desgaste e permitindo que pequenas partículas em suspensão no gás passem pelo compressor, mas desde que estas partículas tenham diâmetro menor que o espaço entre os elementos rotativos. A Figura 29 mostra os dois parafusos (macho e fêmea) do compressor e a forma de sucção e descarga do fluido.

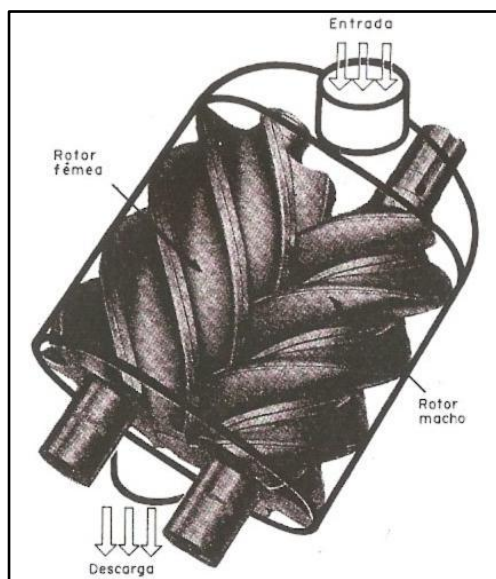


Figura 29 – Elementos de compressão (macho e fêmea) e forma de circulação do fluido em compressor parafuso.
FONTE: COSTA, 1978, p. 3.

2.10.1.5 Lóbulos ou Engrenagens

Compressores que utilizam engrenagens para realizar a tarefa de compressão, porém, não realizam grandes aumentos de pressão (baixo Δp) devida aos rotores apenas realizarem, basicamente, o deslocamento do fluido e devido à esta característica são equipamentos que também são denominados de sopradores. A Figura 30 apresenta o esquemático de vazão para um compressor de engrenagens.

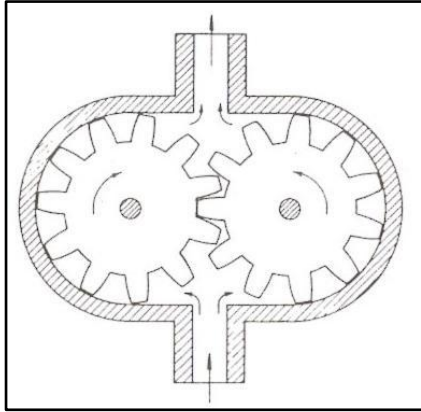


Figura 30 – Representação em corte dos internos do compressor de engrenagens e sentido de fluxo interno do fluido.
FONTE: COSTA, 1978, p.2.

Conforme COSTA (1978), um tipo especial de compressor de engrenagens é compressor chamado de *roots*, no qual uma das engrenagens realiza a transmissão do movimento e o outro desloca o fluido de interesse e por esta característica de funcionamento também é denominado propriamente de soprador. A Figura 31 apresenta o esquema deste tipo de compressor.

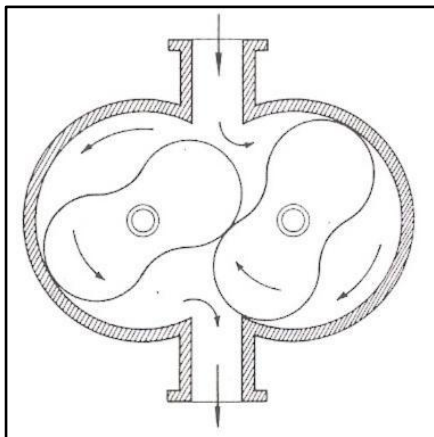


Figura 31 – Representação em corte do compressor *root* e maneira de funcionamento interno.
FONTE: COSTA, 1978, p. 2.

2.10.1.6 Anel Líquido

O funcionamento deste tipo de máquina é muito semelhante ao compressor de palhetas, porém, no lugar das palhetas realizarem a compressão é um anel líquido que realiza a mesma função das palhetas.

Este tipo de compressor possui como principal característica e aplicação a pressão de sucção ser inferior a pressão atmosférica, ou seja, na sucção a pressão gerada é inferior a pressão externa enquanto na descarga a pressão é o mesmo

valor da pressão atmosférica, esta característica concede a este tipo de máquina outra denominação, bomba de vácuo. A Figura 32 apresenta o esquema de um compressor de anel líquido.

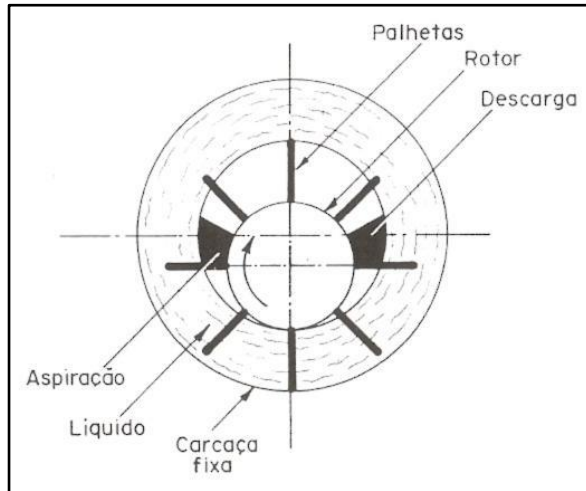


Figura 32 – Representação em corte do compressor de anel líquido e componentes internos.

FONTE: COSTA, 1978, p. 7.

2.10.2 Compressor Dinâmico

Os compressores dinâmicos realizam a tarefa de compressão por meio de um impelidor que transfere a energia cinética, advinda de um acionador externo, para o gás realizando aceleração das partículas do gás. O impelidor descarrega o gás em um difusor que contém elementos que aumentam a área de passagem do fluido e pelo princípio de conservação de energia, uma vez que o tempo de passagem é muito curto, convertem a energia cinética em pressão, sendo que a transformação de energia (cinética para pressão e vice-versa) ocorre por meio das mudanças de seções de escoamento nos difusores (NÓBREGA, 2011).

A seguir estão descritos brevemente dois principais tipos de compressores dinâmicos conforme a divisão constante em NÓBREGA (2011).

2.10.2.1 Axial

Dentre os compressores dinâmicos este tipo é o que possui maior capacidade de vazão, porém também possui a característica de menos pressão entre todas as máquinas deste tipo. Possui um rotor com fluxo puramente axial o que caracteriza muito o emprego deste tipo de equipamento em siderúrgicas e refinarias na função primordial de sopradores.

A Figura 33 apresenta a foto de um rotor de um compressor axial caracterizado principalmente pela presença das aletas do impelidor .que transfere ao fluído a energia cinética.



Figura 33 – Exemplo de rotor utilizado em compressor axial.
FONTE: NÓBREGA, 2011, p. 33.

Para complementar a explicação sobre a forma construtiva do compressor axial a Figura 34 mostra o esquemático, em corte, dos componentes internos de um compressor axial e o posicionamento no rotor, Figura 33 apresentada anteriormente.

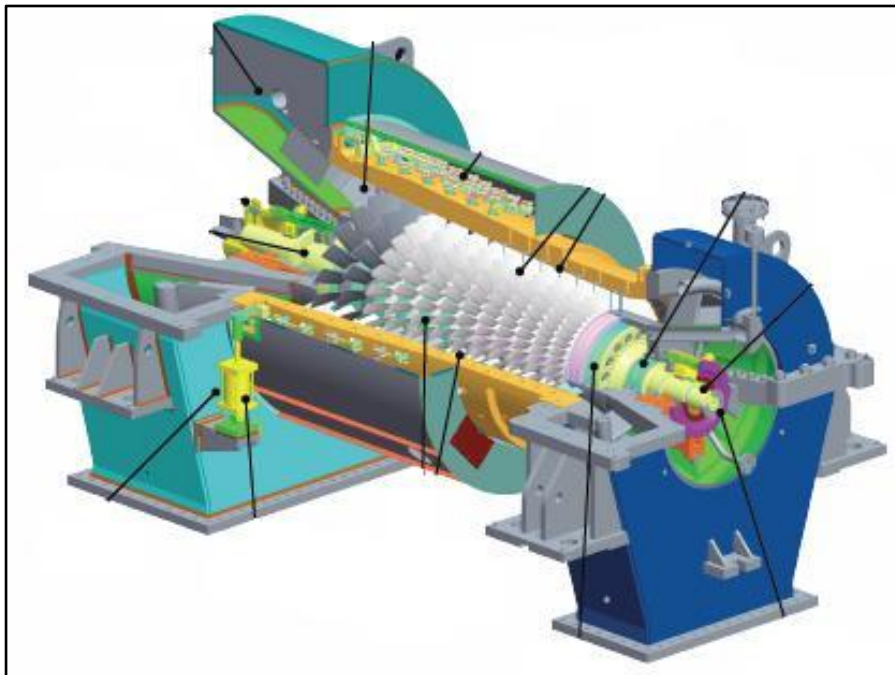


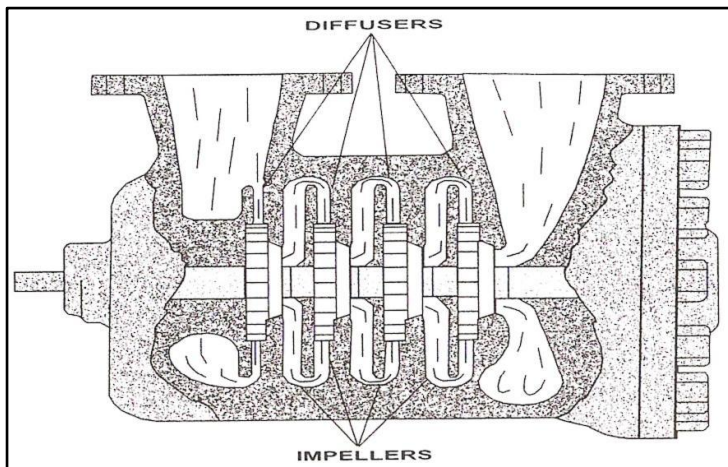
Figura 34 – Esquemático em corte do compressor axial.
FONTE: Elliot¹, 2010.

2.10.2.2 Centrífugo

Neste tipo de compressor o fluído entra na sucção do primeiro impelidor que transfere a energia cinética rotacional do eixo para o gás a ser comprimido e

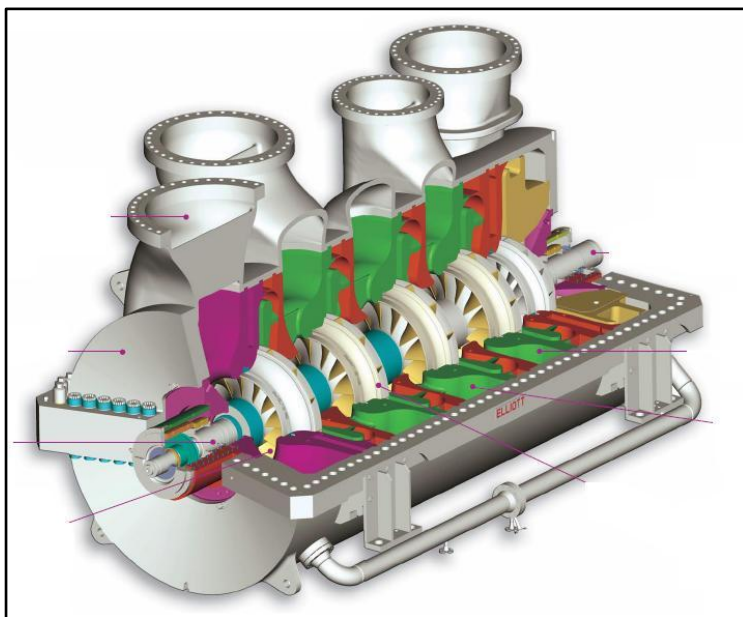
circulado e com a ação da força centrífuga o gás é expelido pela periferia do mesmo impelidor com alta velocidade. Na etapa seguinte, agora no difusor, devido ao aumento de área ocorre a conversão da energia cinética em pressão, ocorrendo essa sequência de etapas sucessivamente nas diversas divisões internas do compressor desde a sucção até a descarga.

A Figura 35 apresenta, em corte, a sequência de etapas (difusores e impelidores) de um compressor centrífugo.



**Figura 35 - Rotor e carcaça, em corte, do compressor centrífugo.
FONTE: NÓBREGA, 2011, P. 34.**

De maneira análoga ao apresentado no item 2.10.2.1 e para ilustrar melhor o contexto global do compressor, a Figura 36 apresenta o esquemático em corte dos internos do compressor centrífugo.



**Figura 36 - Esquemático em corte dos internos do compressor centrífugo.
FONTE: Elliott², 2010.**

2.10.3 Diagrama Teórico

Considerando COSTA (1978), para se obter a elevação de determinada massa de fluido é necessário a retirada do fluido de determinado meio que se encontra a certa pressão, deverá sofrer compressão durante um ciclo de revolução da máquina e então ser devolvida a certo ambiente com a pressão desejada. A operação de compressão durante um ciclo de rotação da máquina pode ser dividida em três etapas distintas e sequenciais, sendo:

- Sucção (aspiração) – fase na qual o êmbolo do cilindro estará retraído deixando a câmara de compressão com a máxima capacidade e provocando uma pressão negativa no interior da câmara provocando a entrada do gás, o qual estará a pressão P_1 ;
- Compressão – fase na qual ocorre a aplicação do efetivo trabalho de compressão, ou seja, o gás sofre redução de volume e consequente aumento na pressão, supondo um valor P_2 ($P_1 > P_2$) e
- Descarga – nesta fase a pressão desejada para o gás, ou outro fluido compressível, foi atingida e ocorre a liberação do volume comprimido através da válvula de descarga para um ambiente equilibrado com a nova pressão P_2 .

Considerando um plano de Clapeyron para uma situação ideal, conforme o Gráfico 5 e seguindo as etapas apresentadas anteriormente, na região horizontal que sai do ponto 4 e vai até o ponto 1, corresponde a fase de sucção; o deslocamento do ponto 1 para 2 representa a fase de compressão propriamente dita e na faixa horizontal entre os pontos 2 e 3 ocorre a descarga do fluido já comprimido à pressão desejada (COSTA, 1978).

molhas do obturador (representação na área superior adicionada ao Gráfico 6);

- Expansão (3 – 4) – neste ponto as válvulas de descarga estão fechadas, da mesma forma que as da sucção também estão fechadas (existência da contra pressão), então o gás residual no cilindro (volume morto) começa a se expandir com o movimento de retorno do pistão – devido à expansão do volume morto que esta fase possui esta denominação e
- Admissão (4 – 1) – com o movimento de retorno do pistão e queda da pressão interna (deverá ser um valor de pressão inferior ao da sucção para abertura das válvulas), ocorre abertura da válvula de admissão e entra do gás reiniciando o ciclo.

O Gráfico 6 representa as etapas descritas anteriormente e demonstra que entre a condição teórica (Gráfico 5) e a condição prática existem diferenças principalmente devido á inércia dos componentes, forças resistivas, necessidades de diferenciais de pressão (positivo e negativo), temperatura, lenta resposta do sistema e imperfeições construtivas dos componentes.

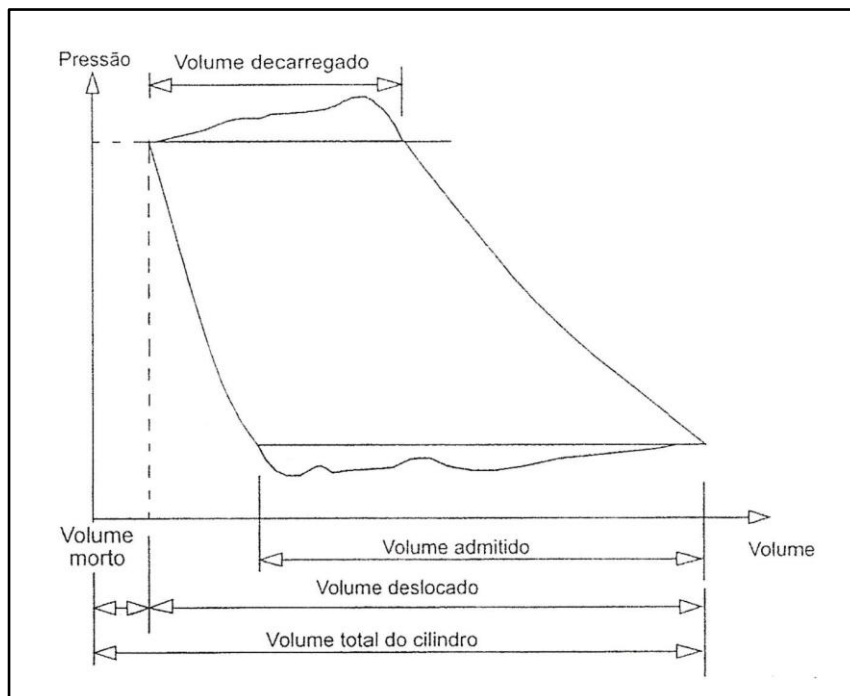


Gráfico 6 – Diagrama pressão versus volume (PxV) representando sistema real e com perdas.

FONTE: NÓBREGA, 2011, p. 46.

3 O CONTEXTO DE PRODUÇÃO – PETRÓLEO

Neste capítulo é apresentado um breve contexto histórico sobre o petróleo, tanto no mundo quanto o surgimento e desenvolvimento no Brasil, uma explicação sobre o processamento de petróleo para obtenção dos diversos derivados e maiores detalhes sobre o processo de hidrodesulfurização, o qual é de enorme interesse para o desenvolvimento desta monografia, pois a abordagem do caso apresentado está inserido no contexto de uma planta petroquímica com esta finalidade.

3.1 HISTÓRICO NO MUNDO

A utilização do petróleo pela humanidade é recorrente aos tempos bíblicos na antiga Babilônia, onde na forma de betume era utilizado em construções; os Fenícios utilizavam o betume na vedação de embarcações marítimas; os egípcios empregavam na pavimentação, embalsamamento dos mortos e construção das pirâmides, enquanto que os gregos e romanos empregaram para fins bélicos; nas Américas, os índios pré-colombianos já conheciam o petróleo e o empregavam em decorações e na impermeabilização de potes de cerâmica (THOMAS, 2004).

O início da busca crescente e processamento do petróleo datam de 1859, quando foram registradas as primeiras explorações comerciais no Estados Unidos, pois até então o petróleo era retirado de exsudações naturais (jazidas com óleo aflorando à superfície – conforme HOUAISS (2004), líquido que adquire consistência viscosa na superfície onde aparece). A descoberta do Cel. Drake, em Tittusville – Pensilvânia – com um poço de 21 metros de profundidade, sistema de percussão movido a vapor e produção de 2 m³ por dia de óleo, inicia o marco exploratório do petróleo que após a descoberta do processo de destilação, resultava em produtos úteis que substituíam a querosene obtida do óleo de baleia e do processamento do carvão. Com o desenvolvimento do processo de destilação, inicialmente, os subprodutos obtidos (gasolina e diesel) eram desprezados, mas com o advento dos motores a combustão estes produtos adicionam alto valor agregado ao produto (THOMAS, 2004).

Até final do século XIX a perfuração por meio do método da percussão viveu um período áureo, mas em 1900, no Texas – Estados Unidos – o americano Anthony Lucas utilizando o método de perfuração rotativo encontra óleo a profundidade de 354 metros, o que se torna um marco na exploração de petróleo em

profundidade. Com esta nova técnica e avanços na tecnologia dos materiais (maior resistência de brocas e demais acessórios) diversas descobertas de campos de petróleo surgem nos Estados Unidos até 1945, quando após o final da Segunda Guerra Mundial o cenário geopolítico começa a ser reformulado e países do Oriente Médio surgem como maiores produtores de óleo tanto em terra quanto no mar, sendo que as profundidades oceânicas de perfuração (lâmina de água) estavam aumentando a cada dia, inclusive sendo o mesmo cenário da atual da exploração (THOMAS, 2004).

A década de 60 é marcada por abundância nas jazidas e novas descobertas de gás na região da antiga União Soviética. Na década de 70 inicia a alta nos preços do barril de petróleo e as jazidas descobertas nos Estados Unidos começam a esgotar a perspectiva de produção, sendo necessário desenvolvimento de novas técnicas exploratórias e investimento em novas pesquisas tecnológicas buscando inovações no campo exploratório. As décadas de 80 e 90 refletem as buscas tecnológicas realizadas e as reservas mundiais são ampliadas em mais de 60 por cento, além disso, o custo de exploração e produção são reduzidos, viabilizando novos investimentos e novas descobertas. Ao longo do tempo até os dias de hoje, o petróleo foi se impondo como fonte de energia primária, e sobretudo, com o advento da petroquímica moderna, muitos dos produtos consumidos hoje utilizam compostos ou derivados de petróleo – são exemplos desta presença os plásticos em geral, tintas, corante, cosméticos, detergentes, explosivos, medicamentos, solventes e muitos outros produtos (THOMAS, 2004).

3.2 HISTÓRICO NO BRASIL

No Brasil a história do petróleo tem início em 1858 quando o Marquês de Olinda assina um decreto concedendo direito a José Barros Pimentel de extrair mineral betuminoso para fabricação de querosene em uma área situada às margens do Rio Marau, na província da Bahia. Contudo, apenas em 1891, em Alagoas, surgem as primeiras pesquisas diretamente ligadas ao petróleo e somente em 1897, Eugênio Ferreira Camargo, no município de Bofete, no estado de São Paulo, realiza a perfuração do primeiro poço com profundidade de 488 metros e produzindo 0,5 m³ de óleo betuminoso (segundo relatos da época). Em 1919 foi criado o Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, em 1938 é criado o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) que inicia trabalhos de

prospecção de petróleo e em 21 de janeiro de 1939, em Lobato – Bahia – descobre o primeiro poço com petróleo no país, apesar de não ser considerado viável economicamente, representa um marco na história (THOAMAS, 2004).

A partir do ano de 1953, o governo do Presidente Getúlio Vargas constitui o monopólio estatal do petróleo e cria a Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras). Na década de 60 diversos marcos estão na história do país e da própria Petrobras, sendo: construída a primeira refinaria brasileira (Refinaria Duque de Caxias – REDUC); o maior centro de pesquisa da América Latina é construído (Centro de pesquisa e desenvolvimento – Cenpes) e ocorre a primeira descoberta de petróleo no mar, na região litoral de Sergipe a profundidade de 80 metros – é nesta época surge a tradição de batizar os campos exploratórios com nomes de peixes. Na década seguinte, com a crise mundial o Brasil também sofre as consequências e na tentativa de recuperação e com a missão de impulsionar o desenvolvimento nacional é criada a Petrobras Distribuidora que até 1975 torna-se líder no segmento, sendo também criado o Programa Nacional do Álcool que reduz a dependência de petróleo estrangeiro (Petrobras, 2012).

Na década de 80 descobertas em alto mar iniciam uma nova fase para a companhia brasileira, a exploração em águas profundas; com isso também surge a preocupação ambiental e são criados diversos programas de proteção a biodiversidade. Na região amazônica é estabelecido um campo exploratório no coração da Amazônia – o campo de Urucu. Nas décadas seguintes, ocorre abertura do capital da companhia, quebrando o monopólio estatal após mais de 40 anos, diversos avanços ocorrem na exploração de petróleo em águas profundas e ultra profundas; o Brasil consegue estabelecer a autosuficiência sustentável de petróleo em 2006 e o ano de 2009 marca o início da exploração do pré-sal (Petrobras, 2012).

3.3 O PETRÓLEO, REFINO E DERIVADOS

3.3.1 O Petróleo e o Refino

Conforme HOUAISS (2001) a origem da palavra petróleo é descrita como sendo óleo natural de coloração escura composta quase unicamente por hidrocarbonetos, além disso, possui origem no latim da palavra *oleum* que significa óleo e de *petra* significando pedra. É constituído basicamente por uma mistura de compostos orgânicos (hidrocarbonetos) e nas condições normais de pressão e

temperatura está no estado gasoso – caso contenha moléculas pequenas – e no estado líquido para a existência de moléculas maiores.

O petróleo contém centenas de compostos químicos na formulação, sendo que é a separação destes inúmeros componentes da mistura ocorre por meio da diferença de ponto de ebulição, ou seja, a partir do aquecimento do óleo é possível realizar a separação, a Tabela 3 a seguir demonstra estas diferenças existentes e a ordem de separação conforme o aumento da temperatura.

Tabela 3 – Frações típicas na destilação do petróleo.

Ordem Extração	Fração Extraída	Temperatura de ebulição [°C]	Composição aproximada	Utilização
	Gás residual		$C_1 - C_2$	Gás combustível
1º	Gás liquefeito de petróleo	≤ 40	$C_3 - C_4$	Gás combustível engarrafado uso doméstico e industrial
2º	Gasolina	40 – 150	$C_5 - C_{10}$	Combustível automóveis, solvente
3º	Querosene	175 – 235	$C_{11} - C_{12}$	Combustível de aviação
4º	Gasóleo leve	235 – 305	$C_{13} - C_{17}$	Diesel
5º	Gasóleo pesado	305 – 400	$C_{18} - C_{25}$	Matéria-prima para lubrificantes
6º	Lubrificantes	400 – 510	$C_{26} - C_{38}$	Óleos lubrificantes
7º	Resíduo	> 510	$\geq C_{38}$	Asfalto, impermeabilizante

FONTE: adaptado THOMAS, 2004.

A Tabela 3 demonstra as principais frações que são obtidas com o processo de destilação, mas é importante destacar que os diversos óleos retirados de diferentes poços e localidades apresentam composições e aspectos diferentes, podendo ocorrer diferenças de cor, densidade, viscosidade e nível de liberação de gases. Entretanto, de maneira análoga é possível estabelecer uma composição básica geral para a maioria dos óleos cru. A Tabela 4 demonstra a composição típica do óleo cru.

Tabela 4 – Composição básica do petróleo cru.

Composto	Porcentagem [%]
Hidrogênio	11 – 14
Carbono	83 – 87
Enxofre	0,06 – 8
Nitrogênio	0,11 – 1,7
Oxigênio	0,1 – 2
Metais	≤ 0,3

FONTE: THOMAS, 2004.

É importante destacar que todas as informações anteriormente apresentadas neste tópico compreendem informações sobre a composição básica do petróleo e sobre qual é a forma de fracionar e obter os diversos derivados através do processo de destilação. Porém, ainda não foi apresentada a definição deste tipo de processo, que conforme a Agência Nacional do Petróleo (ANP¹,2012), é definido como refino de petróleo e consiste, basicamente, em processos físicos e químicos realizados na matéria-prima (petróleo) para obter subprodutos, os chamados derivados.

O processo tem início na chamada destilação atmosférica que realiza o primeiro fracionamento, considerando o processo aplicável à qualquer refinaria de petróleo, do óleo cru que após sair dos tanques de armazenamento é pré-aquecido e então introduzido na torre de destilação atmosférica, que ao longo da extensão da torre, separa os derivados conforme os diferentes pontos de ebulição, resultando então frações de gás, gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, gasolina, querosene, óleo diesel e resíduo atmosférico. Com exceção do resíduo atmosférico, os demais produtos obtidos seguem para outras plantas industriais para melhorar a qualidade do produto, enquanto que a porção mais pesada, depositada no fundo da torre atmosférica, é reaquecida e segue para outro processo de fracionamento, agora em outra torre sob condições de vácuo, da qual resultam frações de gasóleos e resíduos (ANP¹,2012).

Todas as frações derivadas da torre de vácuo servem como carga para outras unidades que processam este subproduto visando reduzir o peso molecular e maior valor agregado ao produto final. Um exemplo clássico, considerando um modelo genérico para qualquer planta de refino de petróleo, é o envio destes

gasóleos para a unidade de craqueamento catalítico fluido (FCC) que resulta em novos produtos, GLP e gasolina, e o envio do resíduo para a unidade de coqueamento de resíduo de vácuo que gera GLP, nafta e óleo diesel – que em geral, também são encaminhados para outras unidades para serem reprocessados e obtidos outros novos produtos finais e produtos com maior qualidade (ANP¹, 2012).

A sequência de figuras a seguir apresentam, de maneira didática, os esquemáticos, ou também chamados fluxogramas, das diversas etapas do processamento de petróleo, iniciando no processo mais simples da destilação do óleo cru e evoluindo com acréscimo de etapas para melhor aproveitar os derivados e acrescentar qualidade e valor agregado ao produto final. É importante destacar que estes são processos comuns em qualquer planta de processamento de petróleo e são de conhecimento e divulgação universal, não apresentando nenhum tipo de detalhe sigiloso ou fundamental para determinada procedimento ou empresa.

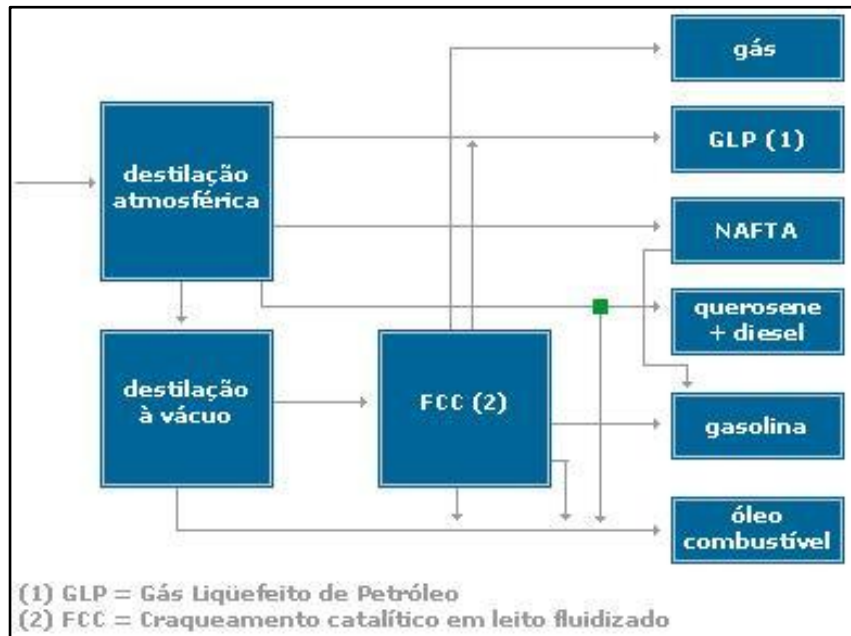
A Figura 37 apresenta o esquemático da primeira etapa de qualquer planta de refino, a destilação atmosférica, onde são separados os derivados leves e médios do petróleo. Nas plantas atuais este esquema é apenas a parte inicial dos demais processos, pois somente esta etapa não permite melhoria nos produtos ou obtenção de derivados mais elaborados (ANP², 2012).



Figura 37 – Processo de destilação atmosférica – início dos processos modernos.
FONTE: ANP².

O esquema da Figura 38 apresenta o acréscimo da etapa da destilação à vácuo, que representa aproveitamento das fases mais pesadas da destilação atmosférica, o que resulta em gasóleos aproveitados na etapa do FCC e resultando em produtos mais nobres, como por exemplo a gasolina com octanagem superior à obtida do processo inicial da destilação atmosférica. Comparando a qualidade dos produtos obtidos com esta configuração e a legislação atual, é importante destacar,

ainda não é possível obter os padrões atuais exigidos nas novas legislações que estão entrando em vigor (ANP²).



**Figura 38 – Esquema complementado com a destilação à vácuo e FCC.
FONTE: ANP².**

É importante destacar que o acréscimo de etapas aumenta a qualidade do produto final e agrega maior valor no derivado, mas tecnologicamente estas modificações representam aumento na complexidade da planta, podendo representar o acréscimo de mais unidades inteiras de processo e aumentos no consumo de suprimentos para processo, como por exemplo, vapor, energia elétrica e demais utilidades necessárias ao processo.

O próximo esquema de processamento, Figura 39, incorpora o processamento do coqueamento que utiliza a fração do resíduo da destilação à vácuo em produtos comerciais (GLP, nafta, gasolina e óleo diesel), porém as parcelas de óleo diesel e nafta não são diretamente aproveitadas devido a falta de tratamento das características de instabilidade que apresentam após saírem da unidade de coqueamento sendo encaminhadas ao FCC e outra parcela, o coque, que também para ser comercializado necessita de processamento por outra unidade específica.

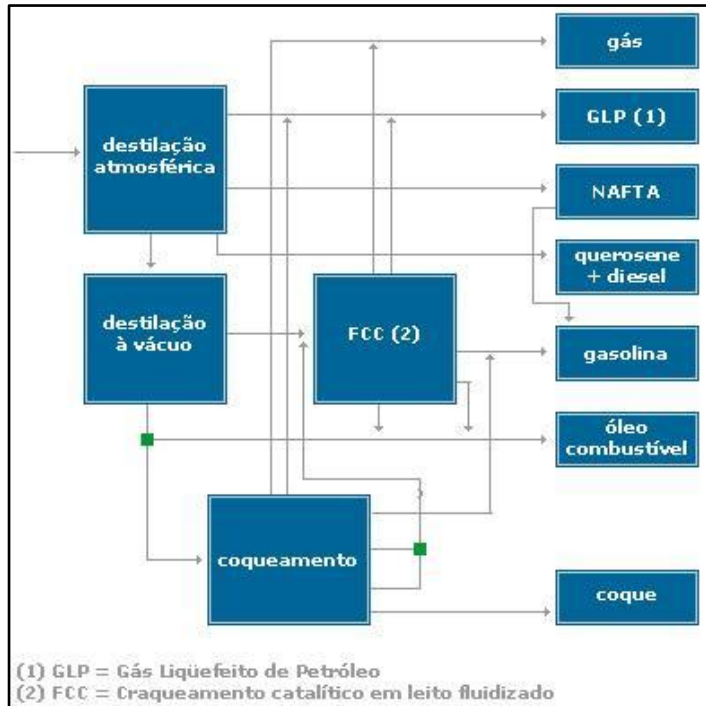


Figura 39 – Complementação do processo com a unidade de coqueamento.
FONTE: ANP².

O próximo fluxograma, Figura 40, apresenta a implementação do tratamento da instabilidade da parcela de óleo diesel e gasolina, que anteriormente era deslocada para o FCC, mas agora é tratado e resulta em produto de alta qualidade, além de representar maior equilíbrio no processamento geral da planta de refino.

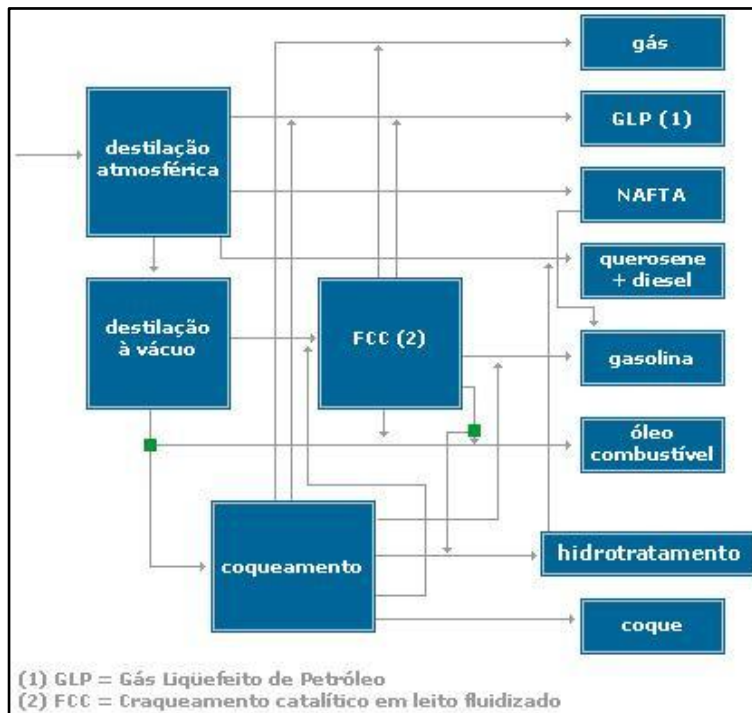


Figura 40 – Complemento de processamento de coque e hidrotratamento de instáveis.
FONTE: ANP².

3.3.2 O Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais simples e leve dentre todos os elementos existentes, é o elemento mais abundante no Universo, tendo papel fundamental no fornecimento de energia para estrelas por meio da fusão nuclear, como por exemplo, no caso do Sol, o hidrogênio é encontrado na forma de plasma, estado que difere muito da forma atômica fundamental, pois o próton e o elétron não estão ligados resultando em alta condutividade elétrica e emissão de luz, o chamado plasma (CRUZ; 2010).

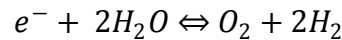
Considerando as condições ambiente de pressão e temperatura, o hidrogênio é encontrado na forma molecular (H_2), no estado gasoso, possuindo as seguintes características: incolor, inodoro, insípido, muito mais leve que o ar, inflamável, não produz chama quando está em combustão, altamente reativo em contato com óxidos e insolúvel em água (NFPA 49, 1991 e CRUZ, 2010).

O hidrogênio molecular na forma fundamental (H_2) é raro de ser encontrado na atmosfera, sendo produzido na natureza por algumas algas e bactérias em processos fotobiológicos, fermentação ou digestão anaeróbica, porém, considerando as diversas aplicações comerciais e industriais estas formas de obtenção são insuficientes para suprir as demandas (NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION¹, 2012).

Os métodos produtivos do hidrogênio são basicamente três: térmico, eletroquímico e biológico, sendo que os dois primeiros métodos são empregados comercialmente enquanto que o terceiro, biológico, ainda está em fase de desenvolvimento e aprimoramento. As fontes primárias para retirada das reservas de hidrogênio podem ser obtidas por meio do processamento das seguintes fontes: gás natural, água, carvão ou biomassa (NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION¹, 2012).

O método popularmente divulgado para obtenção do hidrogênio é a utilização do processo de eletrólise da água que consiste em passar determinado valor de corrente elétrica através da água para separar a água (H_2O – no estado fundamental e puro) nos elementos constituintes – hidrogênio e oxigênio (NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION², 2012).

A reação química básica de eletrólise da água é a seguinte:



Onde e^- representa a aplicação de corrente elétrica através da água. A Figura 41 mostra um esquemático do arranjo físico para obtenção do hidrogênio por meio da eletrólise.

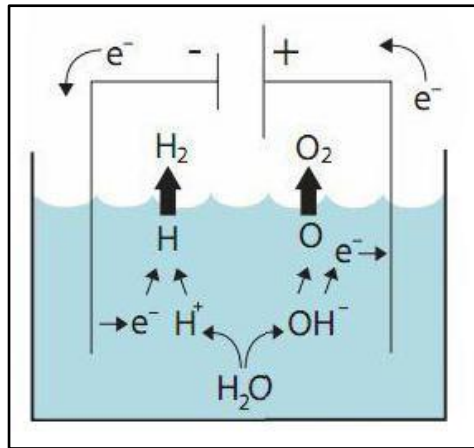


Figura 41 – Esquemático para eletrólise da água.
FONTE: NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION², 2012.

As fontes de energia elétrica utilizadas no processo de eletrólise podem ser as mais diversas possíveis, podendo ser renováveis ou não, no caso das fontes renováveis o grande ganho está na redução na emissão de agentes poluentes. Considerando as chamadas fontes renováveis, as formas comerciais disponíveis e utilizadas de obtenção de energia elétrica são as seguintes: eólica, geotérmica, hidroelétrica, força dos oceanos (marés, ondas e térmica), solar fotovoltaica e solar concentrada (aquecimento para geração de vapor e giro de turbina) (NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION², 2012). A utilização da chamada energia não renovável para geração de energia elétrica pode ser obtida por meio das seguintes fontes: gás natural, carvão e nuclear (NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION¹, 2012).

Considerando a realidade dos processos petroquímicos em uma refinaria de petróleo, principalmente nos dias atuais, a demanda por hidrogênio tem crescido de maneira expressiva devido à implantação de novas unidades de tratamento de derivados (HDR) e conforme BRASIL; ARAÚJO e SOUSA (2012), nas plantas industriais de refino de petróleo as formas mais comuns de obter hidrogênio aproveitando os processos petroquímicos são os seguintes:

- Reforma utilizando vapor (*steam reforming*): principal processo para obter hidrogênio aplicado no refino, por ser o processo mais viável economicamente para produção direta e contínua;
- Reforma catalítica: no processo de produção de naftas com alta quantidade de compostos aromáticos (reforma catalítica) surge como coproduto o hidrogênio, porém em quantidade reduzida e não suficiente para suprir exclusivamente unidade de hidrorrefino (caso da reforma de vapor), mas sendo utilizada de maneira complementar;
- Oxidação parcial de hidrocarbonetos pesados: reação de hidrocarbonetos (condições subestequiométricas) com o oxigênio, na presença de catalisador, produzindo hidrogênio que após o processo deve ser purificado. Este processo ainda não supera a reforma do vapor e
- Gaseificação de resíduos: processo não catalítico onde a carga reage (também em condições subestequiométricas) com o oxigênio do ar sob condições de alta temperatura e pressão gerando gás de síntese com muitas impurezas.

3.3.3 Forno Reformador

Conforme descrito no item 3.3.2, a reforma utilizando vapor e gás natural (metano) é uma das formas, principalmente no setor petroquímico, de obter hidrogênio de maneira viável economicamente e que atende em volume e vazão o suprimento necessários aos novos processos de tratamento dos derivados de petróleo.

O gás natural é uma mistura de diversos elementos químicos, todos estes elementos estão presentes em três partes principais (estados) no óleo cru que é extraído dos poços, sendo: a primeira parte hidrocarbonetos no estado gasoso, nas condições de temperatura e pressão do reservatório; a segunda porção está dissolvida no óleo e vaporiza quando o óleo é trazido até a superfície; a terceira parte encontra-se dissolvida na água presente no reservatório (THOMAS, 2006). A composição básica deste grupo de elementos químicos está disposta na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição do gás natural (% em mol).

Elemento	Gás natural próprio	Gás dissolvido em óleo
	[%]	[%]
Nitrogênio	≤ 15	≤ 10
Dióxido de carbono	≤ 5	≤ 4
Gás sulfúrico	≤ 3	6
Hélio	≤ 5	Não
Metano	70 – 98	45 – 92
Etano	1 – 10	4 – 21
Propano	≤ 5	1 – 15
Butanos	≤ 2	0,5 – 2
Pentanos	≤ 1	≤ 3
Hexanos	≤ 0,5	≤ 2
Heptanos e outros	≤ 0,5	≤ 1,5

FONTE: THOMAS, 2006, p. 11.

Conforme CALLARI (2010) e CRUZ (2010) o processo de reforma a vapor do metano (*steam methane reforming - SMR*) é uma reação química endotérmica que ocorre em reatores tubulares dentro de um forno e com a presença de catalisador a base de níquel (Ni) ou cobalto (Co).

Catalisadores comerciais podem conter determinados tipos de aditivos que evitam a formação de coque na porção superior dos tubos do forno reformador, o que reduz as reações e promove o superaquecimento dos tubos gerando uma consequente redução da vida útil do equipamento, além disso, durante o carregamento do catalisador é importante observar a uniforme distribuição e de modo compacto do catalisador, também para evitar problemas de aquecimento e redução nas reações (BRASIL; ARAÚJO e SOUSA, 2012).

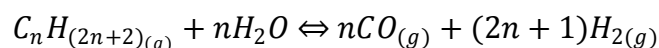
A faixa de temperatura de operação do forno varia de 750 a 900°C, os queimadores podem estar dispostos no topo ou nas laterais do forno, a pressão de funcionamento permanece no intervalo de 20 a 50 atm e a relação estequiométrica de água (vapor) e metano (CH₄) varia de duas partes de água para uma de metano (2:1) até uma relação de quatro parte de água para uma de metano (4:1) (CALLARI, 2010).

A Figura 42 mostra um exemplo real de forno reformador aplicado na indústria petroquímica.

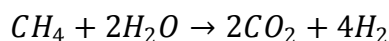


Figura 42 – Exemplo de forno reformador real aplicado ao setor petroquímico.
FONTE: Confab Industrial S.A. (2010).

Conforme CALLARI (2010) a relação estequiométrica genérica para reforma do gás natural, considerando que existem outros hidrocarbonetos que estão presentes, é representada por meio da seguinte reação química de elementos:



Conforme descrito na Tabela 5, o gás natural é formado por diversos elementos, porém considerando a composição do gás natural como majoritariamente de metano (CH_4), analisando apenas a reação ideal do metano no processo de reforma a vapor para obtenção do hidrogênio a relação estequiométrica obtida é a seguinte (CRUZ, 2010):



Considerando a rede de gás natural instalada atualmente no território brasileiro e as fontes de fornecimento, principalmente por meio do gasoduto Brasil-Bolívia, existem facilidades e condições favoráveis na utilização do gás natural, considerando as aplicações que utilizam hidrogênio as facilidades são múltiplas: a

fonte de armazenamento de hidrogênio (por exemplo, na reação química anterior), utilização em caldeiras para geração de vapor utilizado no processo de reforma (reforma a vapor do metano), permite redução nos custos de transporte do hidrogênio pois permite geração próxima aos centros de consumo (refinarias e plantas de produção de amônia ou metanol) e flexibilidade em aplicações industriais com grande consumo – armazenamento (CALLARI, 2010).

Conforme BRASIL; ARAÚJO e SOUSA (2012), após a produção do hidrogênio (reação anterior), o resultado não é apenas o hidrogênio puro, também estão presentes na mistura excesso de vapor d'água (oriundo do processo – utilização de vapor), elevado teor em volume de gás carbônico (CO₂) e outros tipos de contaminantes, todos os quais devem ser removidos. Dois processos podem ser utilizados, são eles:

- Tratamento com aminas: empregado quando são empregados dois estágios de conversão catalítica e/ou quando a exigência de pureza para o processo não é elevada, e
- Adsorção em peneiras moleculares: empregados em unidades que geram com apenas um estágio de conversão e após o processo de adsorção a pureza do hidrogênio é superior a 99%.

A seguir, o item 3.3.4, apresenta mais explicações sobre o segundo tipo de sistema de purificação de hidrogênio, adsorção, além de ser o tipo processo empregado na aplicação descrita nesta monografia.

3.3.4 *Pressure Swing Adsorption – PSA*

Conforme apresentado em UOP LLC (2011) e LINDE AG (2012) o processo físico chamado de PSA (adsorção por variação de pressão, do inglês *pressure swing adsorption*) consiste na purificação de um gás por meio da passagem deste através de diversas camadas de leitos contendo materiais que irão reter as impurezas (quaisquer elementos diferentes do gás de interesse – no caso, o hidrogênio) utilizando o princípio físico de 'filtragem' molecular, ou seja, processo no qual apenas a molécula do gás de interesse passa através das diversas camadas e os demais gases ou impurezas espúrias ficarão retiradas, garantindo pureza de até 99,99%.

Segundo CRUZ (2010) o princípio de funcionamento da PSA é baseado na diferença de pressões entre entrada de alimentação do sistema, da saída do gás de interesse e o gás de purga utilizado, sendo que o arranjo dos diversos vasos trabalham em regime de batelada de maneira alternada e com velocidade relativamente elevada devido à característica inerente ao processo. Pesquisando em HOUAISS (2001) o termo adsorção consiste no processo pelo qual átomos ou moléculas são retidos na superfície de algum tipo de sólido específico por meio de processos físicos ou químicos.

Analisando o apresentado em OLIVA, MATTOS e BABUGIA (2010), a pureza e especificação do gás após o processo da PSA dependerá muito das características, tipo e qualidade do adsorvedor, sendo que quando a mistura de gases é injetada, sob pressão, no vaso contendo os adsorvedores, a quase totalidade dos componentes são levados a ter contato com a superfície do adsorvedor onde ficam temporariamente aprisionadas (até ocorrer a purga), enquanto que as moléculas do gás de interesse (por exemplo, o hidrogênio) passam livremente devido a característica mais volátil para determinado tipo de material do adsorvedor.

Complementando as explicações de OLIVA, MATTOS e BABUGIA (2010) com o apresentado em CRUZ (2010), o gás de carga flui do fundo do vaso saindo pelo topo com a pureza especificada, à medida que as impurezas indesejadas vão se acumulando no adsorvedor, vestígios de impurezas começam a aparecer no produto final e para evitar contaminação torna-se necessário a troca ou 'limpeza' do adsorvedor carregado.

O processo de recuperação ou regeneração do elemento adsorvedor consiste em três fases principais: depressurização, purga e pressurização (CRUZ, 2010). Para depressurizar o vaso, o gás no interior é enviado a um vaso com adsorvedor novo ou regenerado até que ocorra a equalização de pressões entre os vasos, isto tudo ocorrendo no sentido normal da corrente de hidrogênio (cocorrente), ou seja, saída pelo todo do hidrogênio com alta pureza; após este procedimento de equalização de pressões, o vaso que necessita ser recuperado será depressurizado no sentido inverso, ou seja, depressurizado pelo fundo no sentido contracorrente (topo para o fundo) e o gás contendo impurezas é enviado para um vaso de armazenamento residual; na sequência é realizada a purga, ainda no sentido contracorrente, utilizando hidrogênio de alta pureza oriundo de um ou mais

vasos regenerados e também originando gases que são enviados ao sistema de armazenamento de impurezas; finalizando o ciclo e preparando o vaso já regenerado, recém purgado e com adsorvedor pronto para o ciclo normal de operação, ocorre a pressurização do vaso, ainda em sentido contracorrente, com hidrogênio em alta pureza originário de outro vaso em processo normal de despressurização, com isso finalizando a recuperação do adsorvedor e deixando o vaso operacional para reinício do processo no sentido normal e fechando o ciclo (BRASIL; ARAÚJO e SOUSA, 2012).

A Figura 43 apresenta um esquema com as etapas de operação normal de um vaso (adsorção), o processo de recuperação do adsorvedor (despressurização, purga e repressurização) e retorno ao ciclo normal de operação.

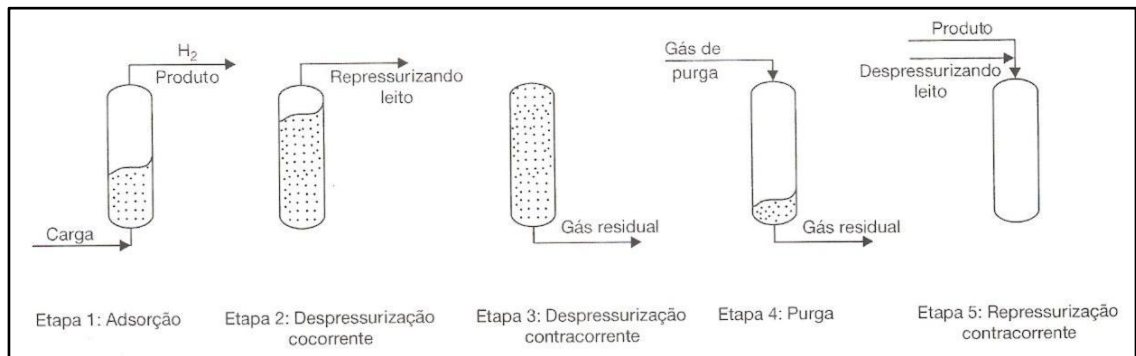


Figura 43 – Esquema com as etapas de operação de uma PSA típica.
FONTE: BRASIL; ARAÚJO e SOUSA, 2012, p. 212.

A Figura 44 apresenta um arranjo real dos vasos de uma PSA e o sistema de válvulas que controla a troca automática (válvulas de controle) entre os diversos vasos permitindo a operação em batelada e realizando os passos de regeneração de adsorvedor (despressurização, purga e pressurização) em regime automático, necessitando apenas ao operador a função de supervisão e acompanhamento das variáveis de processo durante a operação normal do sistema.



**Figura 44 – PSA aplicada ao setor petroquímico na purificação de hidrogênio.
FONTE: LINDE AG, 2012.**

3.3.5 HDTI de Diesel

Conforme THOMAS (2004) o petróleo é uma mistura complexa de diversos compostos e não existem duas fontes completamente idênticas de petróleo, sendo assim, as plantas ou parques de refino sofrem grande influência e impacto nas instalações, arranjos e equipamentos disponibilizados para o refino de determinadas qualidades de petróleo (óleo cru) visando otimização do processo, redução nos custos de produção, produção de derivados com maior valor agregado (derivados mais nobres), atendimento ao mercado consumidor e atendimentos às condições da legislação brasileira. Analisando as considerações de MARIANO (2005), o refino, de maneira geral, possui dois objetivos básicos: produção de produtos energéticos - derivados de consumo direto, como por exemplo, gasolina, querosene e gases em geral – e produção de produtos não-energéticos - derivados mais elaborados, com valor agregado maior, utilização em aplicações específicas destes derivados e aplicação, também, como matéria-prima para outras áreas do setor petroquímico.

O processo de refino conhecido como HDR ou HDT consiste no processamento de frações do petróleo (derivados – como por exemplo os apresentados no item 3.3.1) em atmosferas ricas em hidrogênio, sob condições de altas temperaturas e elevadas pressões e na presença de catalisadores, sendo que conforme for a especificação da carga da unidade de processo (tipo de produto que sofrerá o processo de tratamento) o rendimento do processo poderá ser alterado influenciando no resultado do produto final (NEIVA, 1993). A grande vantagem nos

processos de hidrotratamento consiste em obter produtos com maior qualidade, valor agregado maior devido à melhora na qualidade, permite o atendimento às novas legislações em vigor e reduz a geração de derivados pesados, os quais possuem demanda decrescente (NEIVA, 1993).

Considerando uma unidade de processo do HDT com carga de diesel, a principal função do processo de refino será: processar o produto para evitar a formação de gomas no diesel final; reduzir o teor de enxofre e nitrogênio em no mínimo 90% e 70%, respectivamente, em relação à carga da unidade; resultando em um produto final isento de umidade, possuindo número de cetano maior que 40, apresentando aspecto límpido e maior valor agregado para comercialização (MARIANO, 2005; OLIVA, MATTOS e BABUGIA, 2010).

De maneira análoga, em BRASIL; ARAÚJO e SOUSA (2012), porém com mais detalhes, é explicado que a natureza da carga de processo da unidade petroquímica influenciará diretamente a forma de operação, sendo que a faixa de temperatura de destilação, a constituição da carga (compostos insaturados e contaminantes) e a aplicação final do produto tratado definem os diversos tipos de produtos que podem ser hidrogenados na unidades. Considerando a aplicação de interesse desta monografia, e com base em BRASIL; ARAÚJO e SOUSA (2012), os dois tipos de correntes tratadas na unidade serão:

- Destilados médios originários da destilação direta para produção de óleo Diesel com reduzido teor de enxofre;
- Correntes de instáveis, ou seja, utilização de óleo leve de ciclo (do inglês *light cycle oil - LCO*), originários do craqueamento catalítico ou gasóleo leve de coqueamento, oriundo da seção de coqueamento retardado e
- Existe a possibilidade de retirada de uma parte da nafta pesada do craqueamento catalítico para incorporação à carga principal do HDT.

Apesar dos diversos processos de HDR possuírem diversas aplicações e possam tratar diversos tipos de cargas, como explicado anteriormente, uma unidade de HDT possui um esquema fundamental e básico para permitir o funcionamento e a Figura 45 demonstra este fluxograma esquemático.

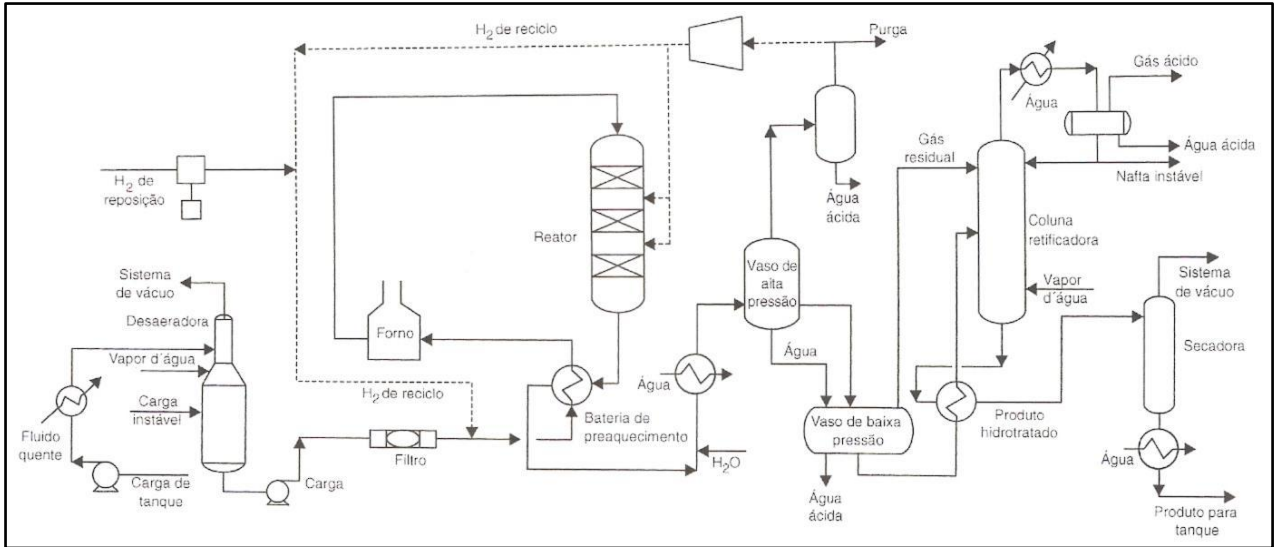


Figura 45 – Fluxograma básico de uma unidade de HDT.
FONTE: BRASIL; ARAÚJO e SOUSA, 2012, p. 157.

3.3.5.1 Motor Diesel

Inventado por Rudolf Diesel, o motor foi patenteado no ano de 1892, sendo que o projeto foi desenvolvido inicialmente para utilização de carvão pulverizado ou óleos betuminosos, porém foi sendo aprimorado melhorando a eficiência e reduzindo a emissão de poluentes, funcionando de maneira muito semelhante ao motor de quatro tempo (ciclo de Otto) (CHEVRON¹, 2012 e CHEVRON², 2012).

A Figura 46 apresenta as principais fases durante o ciclo de funcionamento do motor Diesel, sendo que na a representação a sequência numérica crescente representa, respectivamente, as fases admissão, compressão, potência e descarga.

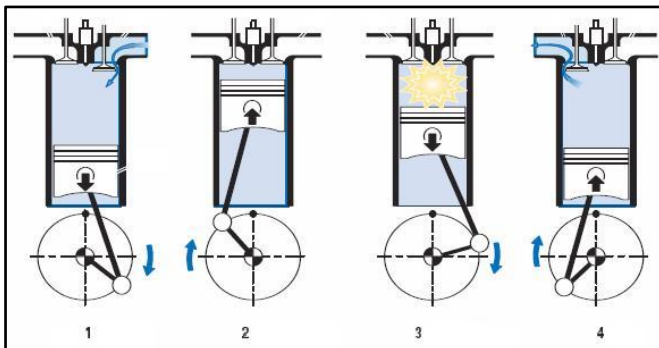


Figura 46 – Diversas fases durante o funcionamento do motor Diesel (admissão, compressão, potência e descarga).
FONTE: adaptado de CHEVRON1, 2012, p. 73.

3.3.5.2 Legislação e Qualidade do Óleo Diesel

Conforme definido em BRASIL, ARAÚJO E SOUSA (2012), a primeira obtenção do óleo Diesel é na destilação atmosférica com temperatura de ebulição comumente situada na faixa entre 150°C e 400°C, formado por hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e aromáticos – com predominância dos dois primeiros tipos – e possuindo cadeias carbônicas com 10 a 25 átomos de carbono.

Quanto à produção e conseqüente comercialização dos produtos, analisando alguns dados disponíveis no anuário estatístico da ANP, é possível perceber a importância do óleo Diesel no cenário brasileiro, pois mais da metade (aproximadamente 58%) da produção do refino e petroquímica são de óleo diesel e óleo combustível, com produção majoritária do primeiro (considerando apenas os derivados empregados como fontes energéticas), demonstrando a importância econômica deste produto e os impactos ambientais que a qualidade do combustível pode gerar. O Gráfico 7 abaixo representa estes dados e os demais derivados produzidos no território brasileiro.

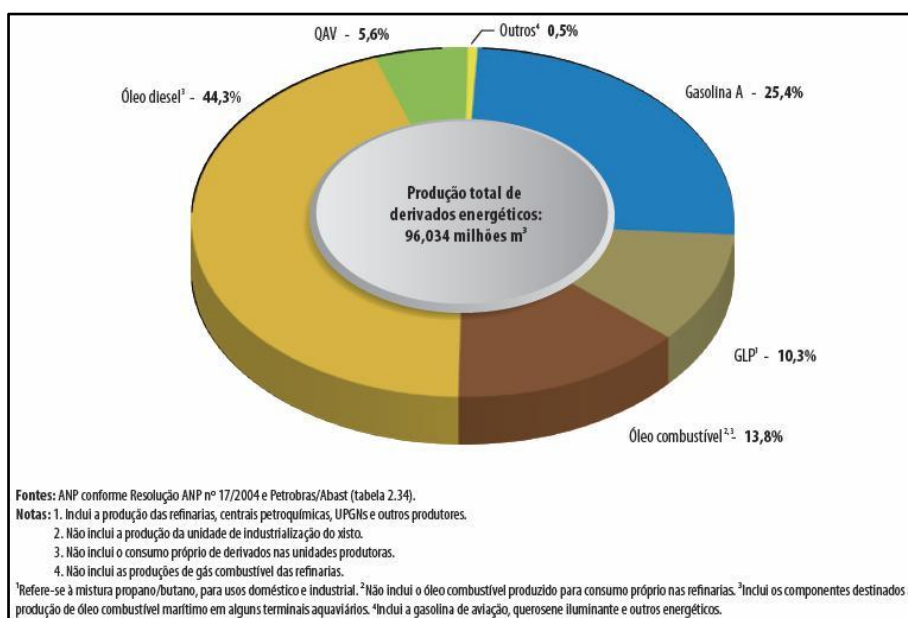


Gráfico 7 – Distribuição da produção de derivados de petróleo para fins energéticos – dados do ano de 2011.

FONTE: Anuário ANP, 2012, p. 111.

Considerando o grande volume de produção de óleo diesel, é possível considerar o reflexo direto no consumo e por conseqüência a escolha primordial do tipo de transporte empregado no Brasil – o transporte rodoviário. Da mesma maneira

que as tecnologias de motores a combustão interna foram evoluindo em paralelo com as novas perspectivas e preocupações com o meio ambiente, os requisitos da legislação brasileira, também, foram sendo alterados e critérios de emissões de poluentes e novas especificações para produção de derivados de petróleo foram surgindo e sendo exigidos.

Neste aspecto, surgem legislações para regular, reduzir e controlar as emissões de veículos automotores, como por exemplo, uma importante legislação, a Resolução nº 315 do CONAMA, que é um órgão deliberativo e consultivo do SISNAMA do Ministério do Meio Ambiente. Em especial, o CONAMA estabeleceu por meio de resoluções, normas, critérios, moções e demais instrumentos legais, as novas etapas para o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE – que define os valores de contorno e prazos a serem atendidos para determinadas metas. É importante destacar que os últimos marcos para o PROCONVE foram o início das etapas L-6 e P-7, para veículos leves e pesados, iniciando, respectivamente, no dia 1º de janeiro de 2012.

Para atender estas novas demandas, a Petrobras – empresa responsável pela quase totalidade da produção brasileira, também necessitou modernizar o parque industrial produtivo para adequar os produtos às novas tecnologias de motores. Esta melhoria no combustível consiste basicamente no processo de hidrotratamento que reduz a concentração de enxofre para 50 ppm, aumento no número de cetano para o valor mínimo de 46, densidade com valor de 0,82 a 0,85 e temperatura de 90% de evaporação da curva de destilação de 360°C, isto tudo resultando na redução de emissão do material particulado e compostos NO_x, benefícios na combustão e na partida a frio e atendimento às normas e legislações vigentes (Petrobras Distribuidora e BRASIL ANP, 2009).

Além da legislação vigente sobre a redução de emissões de veículos automotores, como descrito anteriormente, que implica diretamente na produção de combustíveis com melhor qualidade, outra lei federal e uma resolução da ANP foram instituídas determinando a quantidade mínima (cinco por cento em volume) de biodiesel que deve ser incluída no combustível (BRASIL, 2005 e BRASIL, 2010). Neste cenário duas definições importantes sobre biocombustível e biodiesel são encontradas na Lei nº 11.097.

Sendo a primeira, biocombustível, é definida como:

Biocombustível: combustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna, [...] ou outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil. (BRASIL, 2005)

E a segunda, biodiesel, que consta na mesma referência é a seguinte:

Biodiesel: biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna, [...] ou outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil. (BRASIL, 2005)

3.3.5.3 Número de Cetano (NC)

Conforme ASTM D613 (2000) o número de cetano (NC) corresponde à medida da performance da ignição do diesel combustível comparado com combustíveis de referência (combustíveis padronizados e com propriedades conhecidas) em um motor de combustão interna padronizado e sob condições controladas e mensuradas. Seguindo as definições de ASTM D613 (2000) e as análises apresentadas em LASCALA (2011), o número de cetano reflete as importantes propriedades dos combustíveis, pois considerando o combustível sob análise contido no cilindro de admissão do motor de referência e sob alta temperatura, quando ocorre contato com o ar surgem reações químicas espontâneas que culminam na auto-ignição do combustível na câmara.

Para complementar, em BRASIL; ARAÚJO e SOUSA (2012), o NC corresponde ao percentual volumétrico de n-hexadecano (cetano) que misturado com heptametilnonano produz um mesmo efeito de autoignição que o combustível que está sob análise (diesel). Ainda na mesma referência, é destacado que hidrocarbonetos do tipo parafínicos são os mais importantes na constituição do óleo diesel (maior NC), enquanto que os hidrocarbonetos aromáticos não são desejáveis (menor NC) e os compostos naftênicos e oleofínicos não apresentam influência na constituição final pois apresentam características intermediárias.

4 CASO DE ESTUDO

Neste capítulo será apresentado um caso real de aplicação da automação industrial, consistindo em um grande equipamento (compressor) operando integrado ao sistema produtivo de uma unidade de processamento de derivado de petróleo.

Dentro deste cenário produtivo, MORAES e CASTRUCCI (2007) apresentam um exemplo, descrito na sequência, muito elucidativo e objetivo sobre as etapas de concepção, projeto, construção, comissionamento e partida de uma planta petroquímica.

Inicialmente, considerando uma planta de processo petroquímico pioneira, antes mesmo de iniciar a construção propriamente dita são necessárias diversas etapas preliminares, desde a experimentação em laboratório das reações químicas, passando pela análise da viabilidade técnica da produção em escala industrial e somente então realizando os testes em escala. Confirmada todas as etapas anteriores, é possível desenvolver a parte civil, mecânica, hidráulica, elétrica e instrumentação. Em paralelo, a engenharia de controle deve atribuir às malhas de controle a melhor sintonia para atender a operacionalidade do processo produtivo e a engenharia de automação implementará a lógica do processo para resultar na produção final conforme especificado pela engenharia de processo. Não obstante das atribuições de implementação da lógica processual, a engenharia de automação deve considerar os alarmes (segurança de pessoas e equipamentos), especificar equipamentos e redes, realizar a integração das diversas partes e acompanhar testes em bancada (ou em fábrica) e realizar acompanhamento durante a fase de *start-up* (MORAES e CASTRUCCI, 2007)

4.1 UNIDADE DE PROCESSO

A unidade de processo de interesse para esta monografia é uma unidade do setor petroquímico de processamento de derivados de petróleo, em especial, uma unidade que realiza hidrotreamento de instáveis (HDTI de Diesel), conforme explicado no item 3.3.5 com mais detalhes.

4.1.1 Contexto do Processo

A unidade de HDTI de Diesel não produz de modo isolado no sistema, esta unidade está inserida em um contexto mais amplo dentro do processo de refino, no qual outra unidade é primordial para a operação plena do HDTI, a unidade geradora de hidrogênio – UGH.

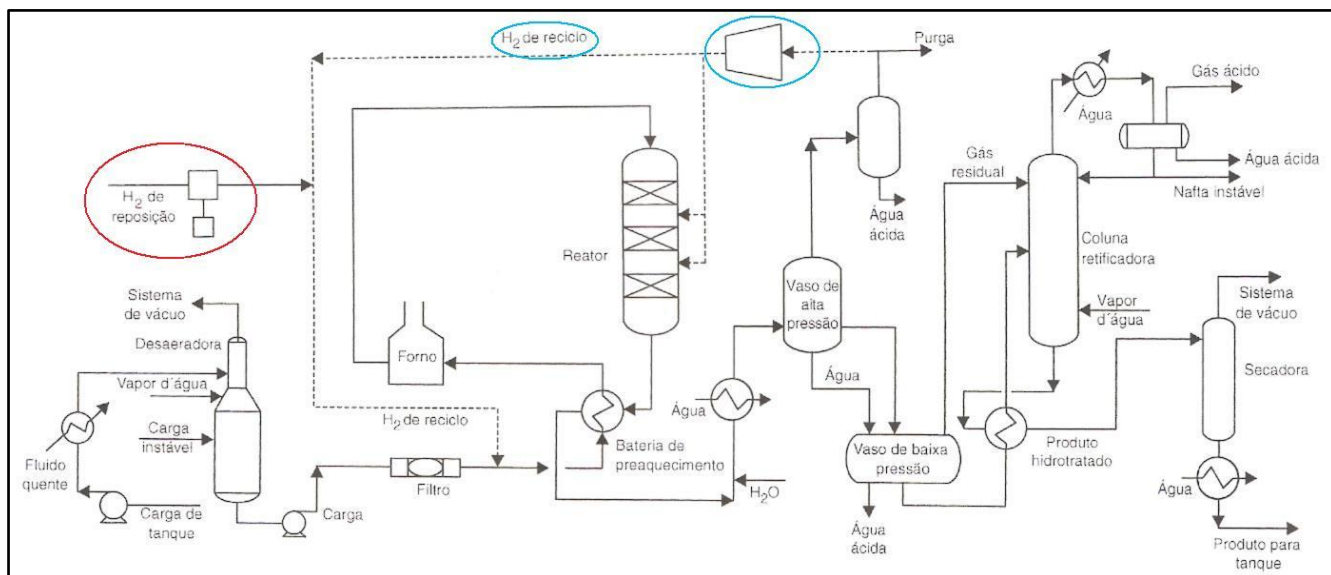
A unidade geradora de hidrogênio é composta, em termos gerais por dois equipamentos principais, forno reformador e PSA. Inicialmente o gás natural (ou nafta) e vapor são injetados nos tubos do forno reformador, tais tubos estão preenchidos com catalisador, que com a aplicação de calor por meio de queimadores verticais que finalizam os elementos necessários para ocorrer a reação de reforma e produção de hidrogênio, o item 3.3.3 apresenta as reações químicas que ocorrem até a obtenção do hidrogênio.

Após a reação e geração do hidrogênio, o gás é enviado para a PSA que possui como função básica a purificação do hidrogênio gerado no forno reformado. A função básica dos elementos adsorvedores será de retirar as impurezas misturadas ao hidrogênio gerado, vale destacar que devido às perdas de processo, reações incompletas, desbalanço estequiométrico, desgaste no catalisador entre outras variáveis, o hidrogênio gerado não é puro como pode parecer a reação apresentada na reação apresentada no item 3.3.3.

Na sequência do processo, o hidrogênio após passar pela PSA, ficando com determinado valor de pureza, pode seguir para a unidade de HDTI e ser aplicado no processo de hidrotratamento do Diesel. Para ser aplicável ao processo de hidrotratamento o hidrogênio deve possuir pureza elevada e alta pressão, o primeiro requisito é atendido após passagem do gás através da PSA, para o segundo requisito, existe a necessidade de equipamento próprio para elevação de pressão (compressor), surge neste ponto do processo a necessidade de compressão (devendo atender requisitos específicos de pressão e vazão).

A Figura 47, já apresentada anteriormente no item 3.3.5, mas aqui apresentada com um círculo na cor azul (círculos na parte superior da figura), indicando o ponto no processo onde é aplicado o compressor de hidrogênio (reposição no sistema) e com outro círculo na cor vermelha (localizado na lateral esquerda da figura), o indicação do compressor responsável por realizar a circulação de produto pelo processo no interior da própria unidade. Este segundo compressor é

do tipo centrífugo, pois conforme descrito no item 2.10.2.2, as características deste tipo de compressor são ideais para a tarefa de circulação de produto nos equipamentos da unidade.



**Figura 47 – Localização do compressor alternativo (vermelho) e centrífugo (azul).
FONTE: Adaptado de BRASIL; ARAÚJO e SOUSA, 2012, p. 157.**

Ainda utilizando como base fluxograma da Figura 47, é interessante destacar que a essência do fluxograma é a representação gráfica dos sistemas de processo produtivo, de maneira análoga aos diagramas elétricos, lógicos ou funcionais utilizados nas áreas de automação, elétrica e instrumentação.

Quando no texto é feita uma referência a um equipamento ou a passagem de determinado fluido de um local para outro, este deslocamento é realizado por meio de tubulações ou outros caminhos mecânicos que interligam os diversos equipamentos (estáticos, dinâmicos, instrumentos, motores, entre outros). Outro fato importante diz respeito ao tamanho dos equipamentos, que devem ser compatíveis com as classes de pressão e temperatura, além de atenderem as demandas por vazão no processo. Este tipo de ponderação sobre as dimensões e distâncias nas aplicações reais também é compartilhada por CRUZ (2010) e considerações sobre fluxogramas também são compartilhadas por MORAES e CASTRUCCI (2007).

Avaliando as reações químicas apresentadas no texto, deve ser salientado que todos estes processos químicos apresentados nesta monografia são de natureza muito mais complexa, envolvem uma enorme quantidade de bombas, filtros, permutadores, tubulações, reatores e demais equipamentos empregados

diretamente ou indiretamente no refino de petróleo, derivados, recuperação da energia do próprio processo ou tratamento de resíduos gerados. Como esta monografia não possui foco no processo químico, não são apresentados detalhes e particularidades das reações, mas em BRASIL, ARAÚJO e SOUSA (2011) é possível encontrar um conteúdo muito acessível a pessoas externa à área química.

4.1.2 Empregabilidade Direta do HDTI

No estado do Paraná a primeira unidade de HDTI construído foi a existente na refinaria pertencente à Petrobras, localizado no município de Araucária, tendo início de produção no começo ano de 2011.

Nos últimos anos, visando reduzir a emissão de poluentes, a legislação brasileira tem se tornado mais restritiva quando aos valores permissíveis para emissão de gases em motores de combustão interna. Para alcançar os novos níveis de emissão, tanto produtores de motores quanto dos combustíveis, necessitaram envidar esforços tecnológicos e investimentos para atingir tais patamares. O item 3.3.5.2 descreve melhor o programa desenvolvido pelo MME para a redução gradativa das emissões poluentes (PROCONVE). Em LASCALA (2011) e CRUZ (2010), também é possível identificar esta mesma linha de análise sobre a poluição por veículos automotores e impactos gerados pelos diversos componentes nocivos emitidos para a atmosfera.

4.1.3 Arquitetura de Automação do Processo

Considerando os avanços da automação na área de equipamentos, ampla disponibilidade de *hardware* para as mais diversas aplicações, e o advento de novos arranjos destes equipamentos com a finalidade de atender aplicações cada vez maiores e mais complexas, surge a necessidade de existir uma divisão organizando a abrangência e a forma de interligação (comunicação) entre os chamados níveis hierárquicos.

De maneira didática e apresentada em MORAES e CASTRUCCI (2007), a Figura 48 explica de modo ilustrativo as diversas divisões em níveis e quais as possíveis formas de comunicação entre cada um destes níveis.

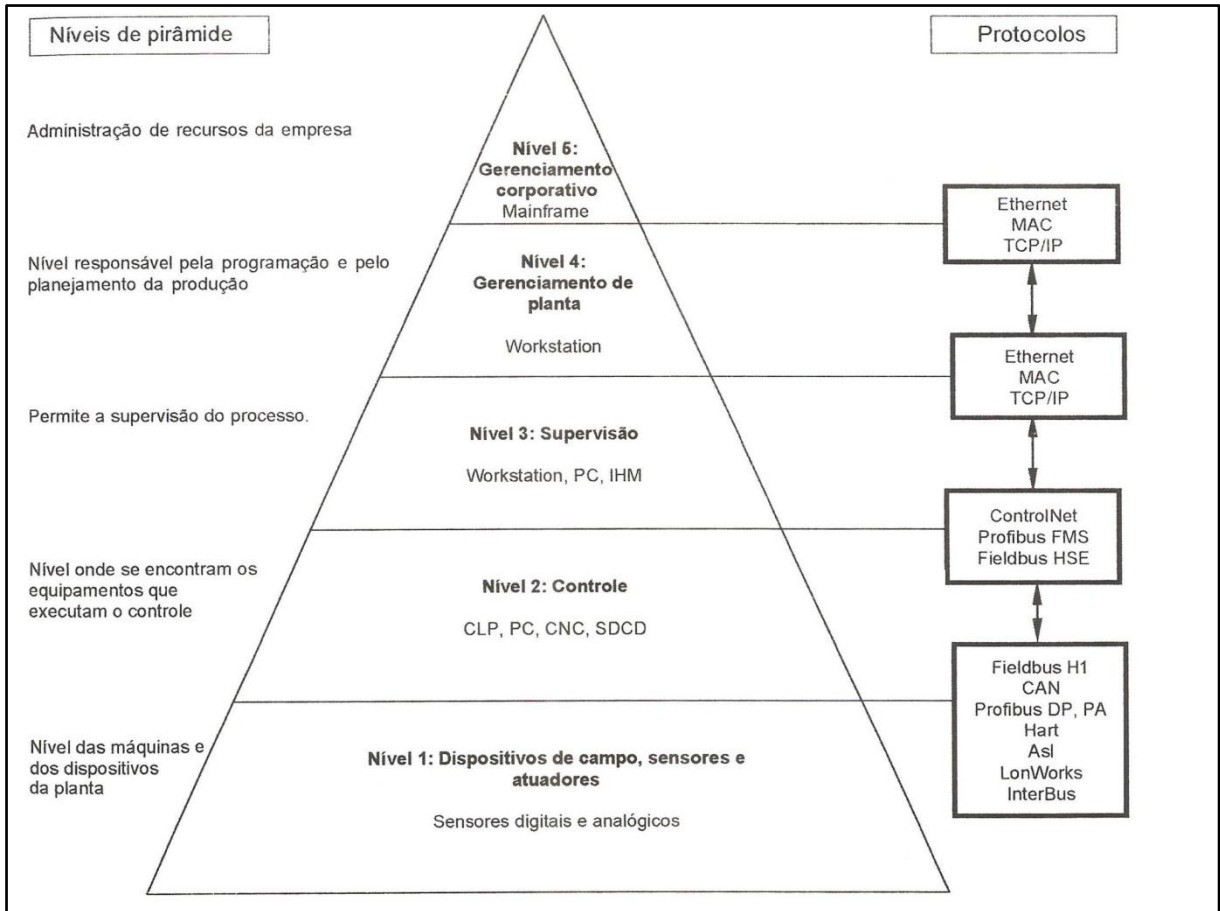


Figura 48 – Representação da divisão em níveis hierárquicos do sistema de automação.
FONTE: Adaptado de MORAES e CASTRUCCI, 2007, p. 13.

4.1.3.1 SDCD

Considerando a principal unidade de processo de interesse nesta monografia, HDTI de Diesel, para realizar a tarefa de controle do processo foi empregada a forma de controle utilizando SDCD, arquitetura de controle detalhada no item 2.8.3.2. O SDCD destinado ao controle desta unidade foi instalado na CCL construída próxima a unidade de processo, de certa forma justificando a condição de ‘distribuição de controle’ – principal característica desta arquitetura. Vale destacar que todas as descrições aqui apresentadas para o HDTI também são aplicáveis a UGH.

Por motivos de segurança e confiabilidade de processo, a unidade consta com dois SDCD’s (redundância completa para controladores, fontes de alimentação, cartões e demais dispositivos) interligados e em paralelo, que no caso de ocorrência de alguma falha crítica em um dos equipamentos o outro assume sem prejuízo à continuidade do processo. Devido à característica do processo produtivo do setor

petroquímico, processo contínuo, esta condição de continuidade torna-se requisito fundamental para o controle e para os operadores.

Prosseguindo com a filosofia do controle distribuído (tipo cliente-servidor) e atendendo condições de segurança de processo, o controle principal dos servidores, os servidores, estações de engenharia e controle e os próprios servidores (incluindo a estrutura de armazenamento) estão localizados a uma grande distância da unidade de processo em um prédio estruturado e reforçado (proteção para o caso de eventos severos), a chamada casa de central de controle (CCC) ou centro integrado de controle (CIC). Neste ponto, quanto à variável distância, é possível evidenciar a importância das comunicações e das redes, conforme é explicado no item 2.9.

Considerando a complexidade das unidades, a quantidade de variáveis de processo a serem monitoradas e controladas e o inúmeros de elementos de controle a serem acionados, é possível estimar que a quantidade de instrumentos, sensores, atuadores, válvulas de controle e demais equipamentos será imensa. Mas não apenas a quantidade de dispositivos será imensa, o número de cabos (singelos, pares, multicabos ou de rede – dependendo da tecnologia adotada) também será muito elevado.

Todos estes sinais (I/Os analógicos ou digitais) deverão chegar até o cartão ou entrada de sinais do controlador, da mesma forma que deverão sair os comandos. Com o intuito de facilitar o manuseio, evitar danos aos cartões de I/Os, permitir fácil acesso durante ampliações e paradas de manutenção e também realizar a interposição de sinais (adequação do tipo de sinal), foram instalados, na própria CCL, painéis contendo relés e régua de bornes que realizam esta interface, o chamado painel de rearranjo. A Figura 49 apresenta um conjunto de cartões (I/Os) instalados em um painel onde é possível visualizar a condição relata e justificar o emprego do painel de rearranjo.

Considerando que mesmo com a existência do controle via SDCCD, inúmeras serão as ações do operador, tanto diretamente no console (monitoramento de variáveis de interesse, ajustes de processo ou alarmes, são alguns exemplos), quanto orientando ou recebendo orientações do operador de campo. Conforme descrito em 2.8.3.1, a tela do SDCCD deve ter uma aparência a facilitar as intervenções e leitura realizadas pelo operador.

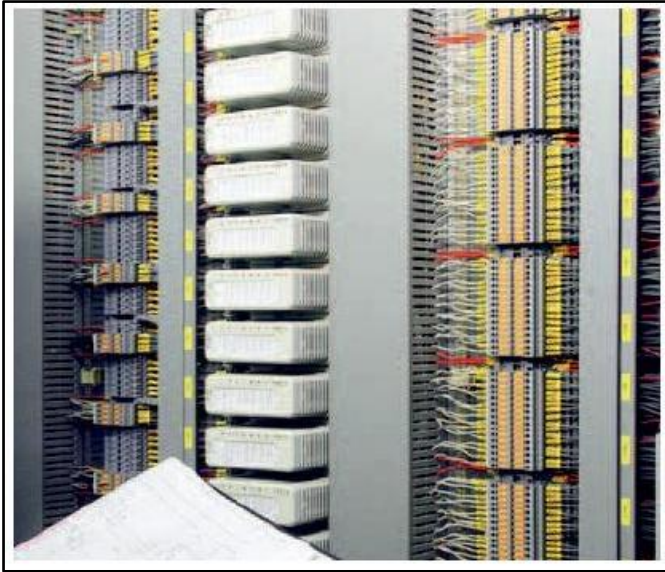


Figura 49 – Exemplo de I/Os em grande quantidade conectados aos cartões.
FONTE: ABB¹, 2012.

A Figura 50 apresenta duas telas de SDCD conforme ocorre na prática com um operador, ou seja, ao fundo é possível identificar o esquemático de produção (baseado em um fluxograma de processo) e no primeiro plano, diversas janelas estão abertas contendo diversas informações do processo. A abertura das janelas ocorre com a seleção do operador, na primeira tela é possível identificar uma janelas mostrando um *trend*, outra com eventos e a terceira de comando; na segunda tela, uma das janelas apresenta vídeo da área externa e outras duas com o programa de desenvolvimento (neste exemplo, o operador das telas deve ser administrador do sistema, pois telas de desenvolvimento não ficam normalmente disponíveis).

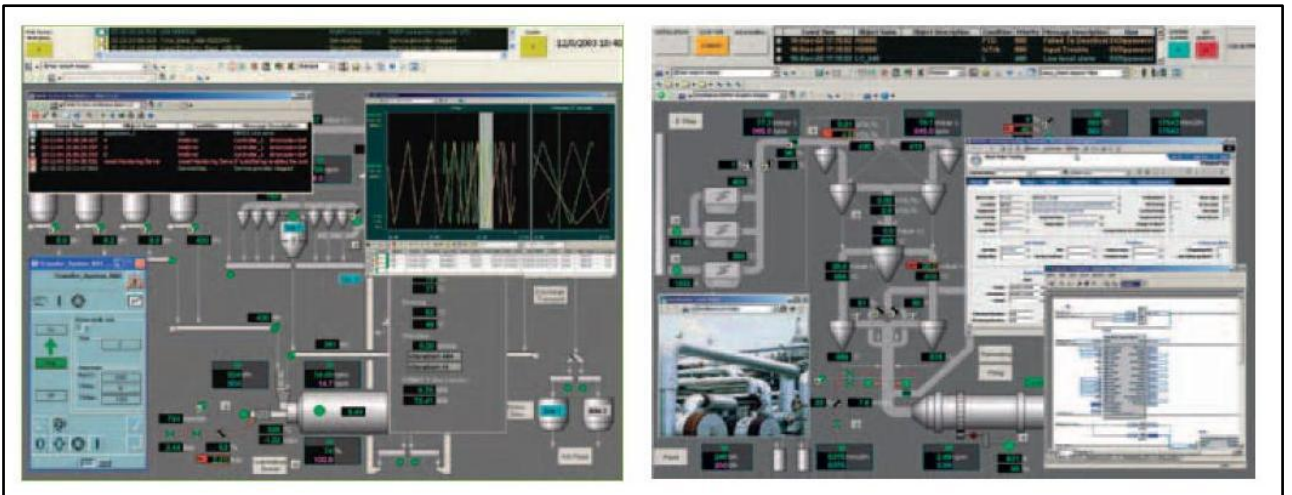


Figura 50 - Exemplo de Telas SDCD Real.
FONTE: ABB², 2012.

Neste exemplo ilustrativo de telas de SDCCD, estão representadas apenas duas telas, que no caso de operação em ambiente real, estaria em dois monitores separados apesar de que para plantas complexas, como por exemplo, HDTI, a utilização de quatro a seis monitores pode ser considerada normal, tamanho é o número de variáveis principais que o operador deve ter disponível em um mesmo plano.

4.1.3.2 Intertravamento e SIS

De maneira análoga ao descrito no item 2.8.3.3, as unidades de processo também possuem matriz de causa e efeito, na qual um problema, defeito ou falha em um determinado equipamento implica na ação de outro ou em outro equipamento ou dispositivo.

A matriz possui a descrição do elemento, a identificação ou *tag*, referência a qual fluxograma o elemento está representado e qual é a votação que ele representa na lógica de processo da unidade (intertravamento). Para a matriz de causa e efeito da unidade de processo constam relacionados todos os equipamentos de fundamental operação para o processo, independente do tipo de elemento ou porte, sendo importante ao intertravamento, deverá constar nesta matriz.

O fato de um elemento estar presente na matriz não elimina a possibilidade que este dispositivo tenha outra matriz própria, referente somente aquela célula, como por exemplo, o compressor abordado nesta monografia que possui uma matriz de causa e efeito apenas interna ao sistema de funcionamento do equipamento. Mas vale destacar que existe integração e coerência entre as duas matrizes – da unidade e do compressor.

Quando o assunto de segurança e robustez surge, o tema redundância certamente é citado. É importante relatar que para o processo produtivo, muitas vezes, existe a necessidade prática da redundância, não apenas de sistemas ou dispositivos, mas necessidade e exigências de que equipamentos de grande porte atendam a este quesito.

Esta condição é aplicável ao compressor abordado nesta monografia, ou seja, na unidade de processo estão instalados e interligados (processo produtivo) dois compressores exatamente idênticos e que possuem operação alternada.

A Figura 51 mostra um equipamento disponível comercialmente para aplicações industriais em processo que necessitam alta confiabilidade em SIS ou

também chamados de sistemas de parada de emergência (do inglês *Emergency Shutdown* – ESD), pois uma falha deste ramo industrial de processo representa risco iminente à pessoas e equipamento, direta ou indiretamente.



**Figura 51 – Equipamento aplicável em um SIS.
FONTE: Invensys Inc, 2012.**

4.2 O COMPRESSOR

Quanto ao equipamento de interesse para esta monografia, consiste em um compressor destinado à compressão de hidrogênio (H_2) aplicado ao processo de hidrotratamento de Diesel. A fabricação do compressor é destinada exclusivamente a este propósito de operação, adequado ao tipo de instalação classificada e possui controle e instrumentação próprios, porém, necessitam integração com a unidade de processo.

Seguindo exigências de processo, premissas operacionais e de maneira análoga à filosofia de segurança e redundância, a unidade de HDTI possui dois conjuntos de compressor (conjunto mecânico de compressão e motor elétrico), ou seja, foram especificados e montados dois compressores exatamente iguais. Inicialmente pode parecer estranho a existência de dois equipamentos idênticos e com a mesma função para atender uma única unidade de processo, porém, relevando que este é um equipamento crítico e que sem a operacionalidade dele a unidade não pode produzir, torna-se plenamente justificável a instalação de um par de máquinas.

4.2.1 Descritivo Mecânico do Compressor

O compressor de interesse é composto por duas partes principais, o motor elétrico, responsável pelo acionamento (tração) da parte mecânica, e conjunto mecânico – representado pelo conjunto de compressão e conjunto de acionamento, divisão baseada em NÓBREGA (2011) para melhor clareza na explicação.

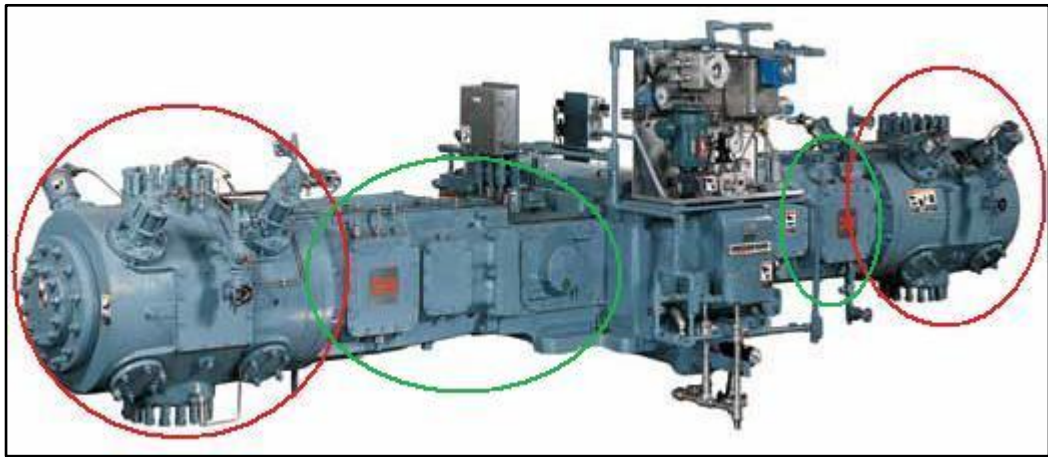
Considerando o conjunto de compressão, este é formador por quatro câmaras de compressão distribuídas em três estágios, ou seja, os dois primeiros cilindros são de seção de baixa pressão, o terceiro cilindro recebe o gás oriundo do primeiro estágio e por último, o quarto cilindro, eleva a pressão para o valor final especificado na descarga. A Figura 52 mostra um compressor completo com quatro cilindros, instalado com todos os equipamentos auxiliares ao corpo principal, ou seja, é possível notar ao fundo o motor de tração, nas laterais direita e esquerda os vasos destinados a sucção e descarga, logo abaixo destes vasos ficam os cilindros de compressão e ao centro o corpo principal do sistema mecânico de compressão (virabrequim e cruzeta - internamente).



Figura 52 – Exemplo de compressor instalado em campo.
FONTE: Dresser-Rand, 2009.

Indagado em campo sobre o arranjo realizado com diversos estágios, o engenheiro da empresa fabricante explicou que a razão dos vários estágios é para atender duas finalidades básicas, a primeira, o diferencial de pressão (ΔP) especificado para o processo e a segunda, a vazão final na descarga do compressor. Explicação muito semelhante também é compartilhada em NÓBREGA

(2011). A próxima imagem, a Figura 53, apresenta apenas o corpo principal do compressor (região mecânica), ou seja, circulado na cor vermelha (círculos localizados nas extremidades direita e esquerda da figura) estão os cilindros de compressão – note a ausência dos vasos tanto na sucção quanto na descarga – a região circulada na cor verde (corpo intermediário – indicado pelos dois círculos centrais na figura) acondiciona a cruzeta e a haste e na região central (entre os dois círculos na cor verde) fica locado o virabrequim e a biela.



**Figura 53 – Compressor apresentando, exclusivamente, a região mecânica destinada a compressão e acessórios (instrumentos, válvulas de controle, entre outros).
FONTE: Adaptado de Dresser-Rand, 2009.**

O conjunto de compressão possui todos os quatros cilindro com dupla ação, ou seja, existem duas câmaras de compressão, uma em cada um dos lados do pistão, e enquanto em uma câmara ocorre a sucção a outra já sofreu compressão e está na fase de descarga. A Figura 54 é a representação de um cilindro de compressão em corte demonstrando a condição de dupla ação do pistão, onde a seta azul (localizada no lado direito, na parte superior da figura) indica a sucção do gás e a seta vermelha (localizada no lado esquerdo, parte inferior da figura) indica a descarga o gás já comprimido.

Vale destacar, ainda analisando a Figura 54, a importância da vedação de maneira hermética entre as duas câmaras, pois os dois cilindros sempre estão em condições operacionais opostas (compressão versus admissão) e por isso esta vedação é de vital importância para o funcionamento da máquina, sendo que para os fabricantes de compressores, este represente um segredo de tecnologia.

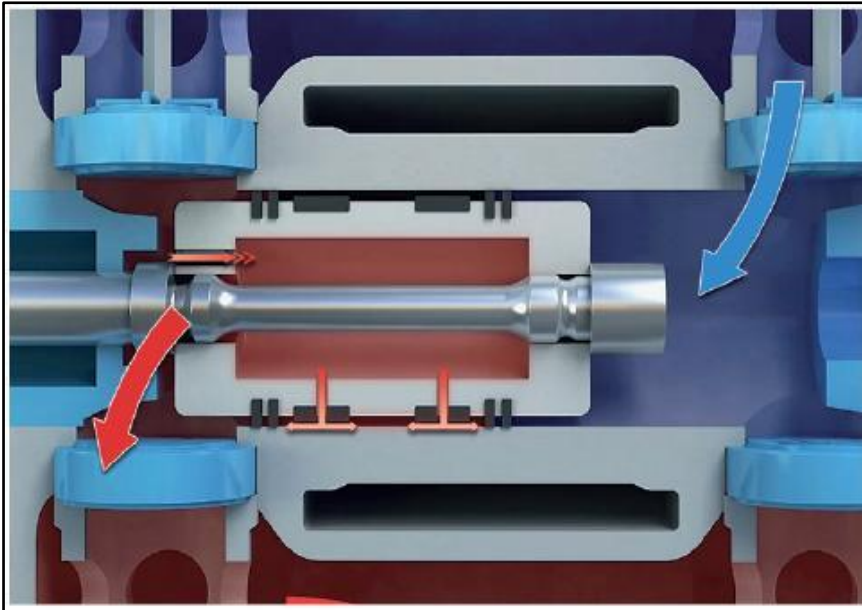


Figura 54 – Representação em corte de um cilindro com pistão de dupla ação.
FONTE: HOWDEN THOMASSEM COMPRESSORS, 2012.

Ainda considerando a Figura 54 é possível identificar que na parte superior e inferior do cilindro existem dois espaços vazios, estes dois espaços são utilizados na circulação da água de refrigeração do cilindro, muito importante para o funcionamento do compressor, sendo uma das muitas condições impeditivas a partida da máquina (intertravamento).

O conjunto de compressão possui pressão máxima de descarga de 1500 kN, potência mecânica máxima de 24.800 kW, velocidade máxima de 372 rpm e quatro cilindros de compressão (mas para outras aplicações, podem chegar até oito) – estas são especificações máximas de operação, não significando que em campanha o equipamento trabalhe apenas nesta faixa máxima. O próximo esquema, Figura 55, apresenta um compressor alternativo com quatro cilindro e diversas seções em corte, mas para esta monografia o foco não está somente na parte mecânica, o esquema é apresentado para contextualizar melhor as condições anteriores apresentadas neste mesmo item, da mesma forma que procura ilustrar os conhecimento do item 2.10.1.

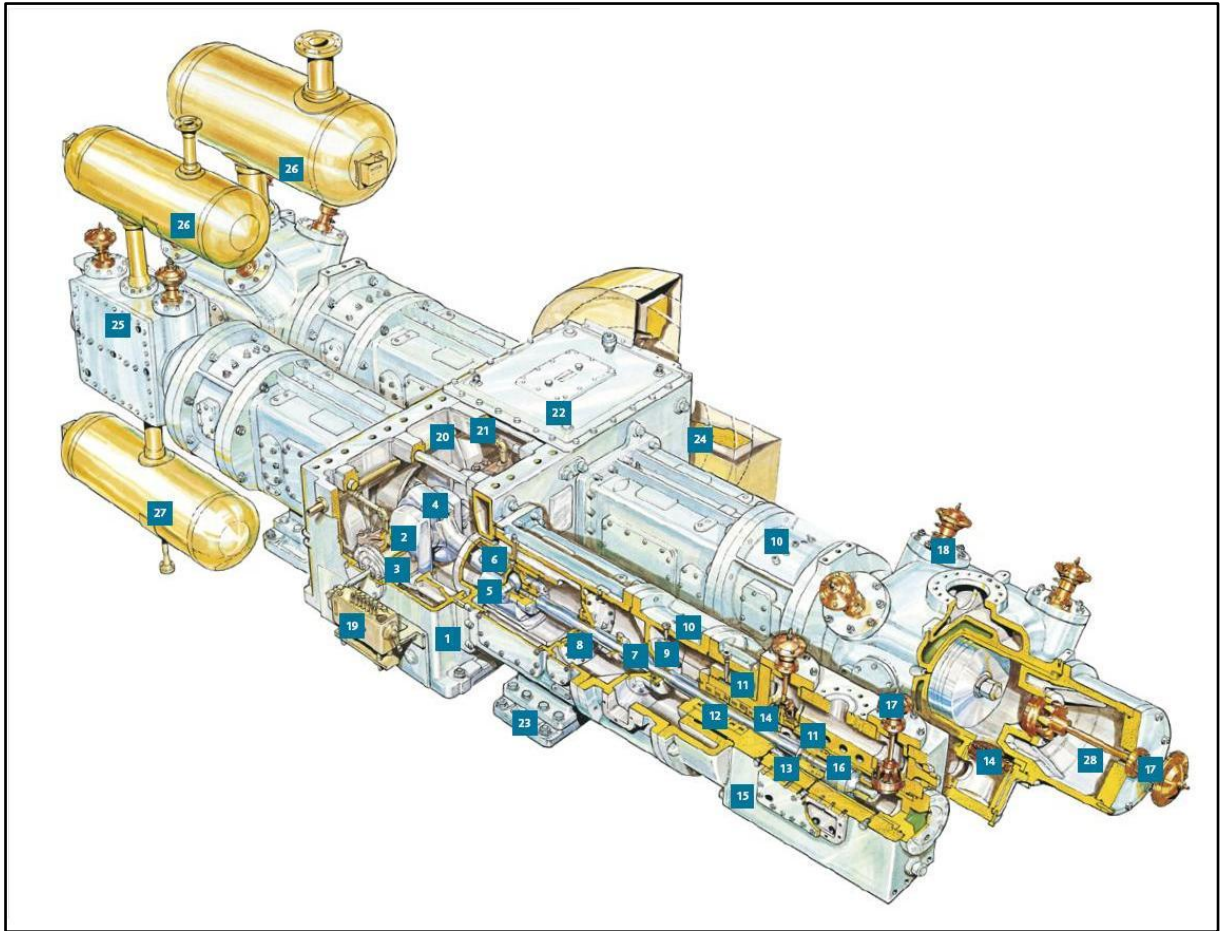


Figura 55 – Compressor alternativo com corte apresentando componentes mecânicos internos. FONTE: Adaptado de HOWDEN THOMASSEM COMPRESSORS, 2011.

Este relato de especificações visa atender as condições do processo do HDTI de diesel (pressão e vazão – no caso o compressor) conforme descrito em BRASIL, ARAÚJO e SOUSA (2012), além disso, a máquina deve seguir rígidos parâmetros construtivos e de desempenho, conforme descrito em API Std 618 (2007). Analisando os diversos modelos de compressores disponíveis em HOWDEN THOMASSEM COMPRESSORS (2011), é possível afirmar que o modelo C-85 deste fabricante seria uma opção viável e atenderia os requisitos de processo e normativos para máquinas mecânicas.

4.2.2 Acionamento do Conjunto Mecânico

O conjunto mecânico é acionado por meio de um motor elétrico com alimentação proveniente de subestação específica para atendimento às unidade de HDTI e UGH. As características elétricas mais detalhadas serão abordadas no item 4.3, porém, vale destacar previamente que o motor elétrico é do tipo síncrono com

excitação *brushless*, fato importante para esta aplicação em área classificada, conforme item 2.4.

Na fase inicial do projeto, o cliente final, solicitou que o motor adotado fosse síncrono e com possibilidade de emprego na correção do fator de potência do sistema, porém, quase na parte final da fase de projeto ocorreram divergências quanto ao custo final para um motor com esta finalidade. Como opção para reduzir o custo, foi verificada a possibilidade do emprego de outra máquina, apenas síncrona na concepção, mas que poderia, após realizar ampliação e modificação no sistema de controle, realizar a função de corretor de fator de potência.

4.2.3 O Controle – CLP

Considerando as características do compressor apresentadas anteriormente, severidade das condições operacionais e porte da máquina tornam-se preeminente a utilização de um controlador dedicado para realizar o controle individual de cada um dos compressores. Realmente ocorre o emprego de controladores individuais para cada uma das máquinas, não obstante e para atender condições de segurança e de processo, os controladores são redundantes, ou seja, cada uma das máquina possui um par de controladores que operam de modo redundante. Outra justificativa importante para a existência de controladores individuais para cada um dos compressores reside no momento de troca de carga.

Durante a manobra de troca de carga, ou seja, quando um dos compressores que já estava em funcionamento por determinado período é desligado e o outro que estava parado entra em funcionamento, o controle do compressor necessita sincronizar os dois sistemas de compressão, visando preservar as condições operacionais do equipamento e da unidade de processo. O desligamento de uma das máquinas pode ocorrer por diversos motivos, como por exemplo, manutenção, vazamento, falha operacional, entre outros problemas, mas o detalhe mais importante reside no fato que para realizar a permuta operacional é necessário, por um período de tempo não muito longo, que as duas máquinas estejam operando em paralelo.

A operação em paralelo garante a continuidade do processo produtivo da unidade e possibilita condições operacionais mais favoráveis e seguras para equipamentos e pessoas, pois a condição de parada total de uma das máquinas e

então início operacional da outra, representa a aplicação quase instantânea das pressões operacionais no compressor (carga) e a possibilidade de instabilidades nos equipamentos e tubulações da unidade.

Quanto à interligação, não apenas os dois CLPs estão interligados entre si, eles também estão interligados ao SDCD e ao sistema instrumentado de segurança (SIS). Estas interligações visam obter a integração no controle entre os CLPs e a unidade de processo – representado pelo SDCD – e o sistema de controle de segurança da planta.

A programação dos CLPs dos compressores, de maneira análoga ao apresentado no item 2.8.2.3, é realizada utilizando a linguagem LADDER, porém, devido ao desenvolvimento e facilidades da eletrônica embarcada nos controladores, a programação também pode ser feita por meio de blocos de função ou lista de instruções e dependendo do modelo e do fabricante do CLP, linguagens de nível mais alto também estão sendo aceitas nos controladores. A Figura 56 apresenta uma janela do *software* de programação e simulação para CLP contendo um programa desenvolvido na linguagem LADDER e que está sendo compilado.

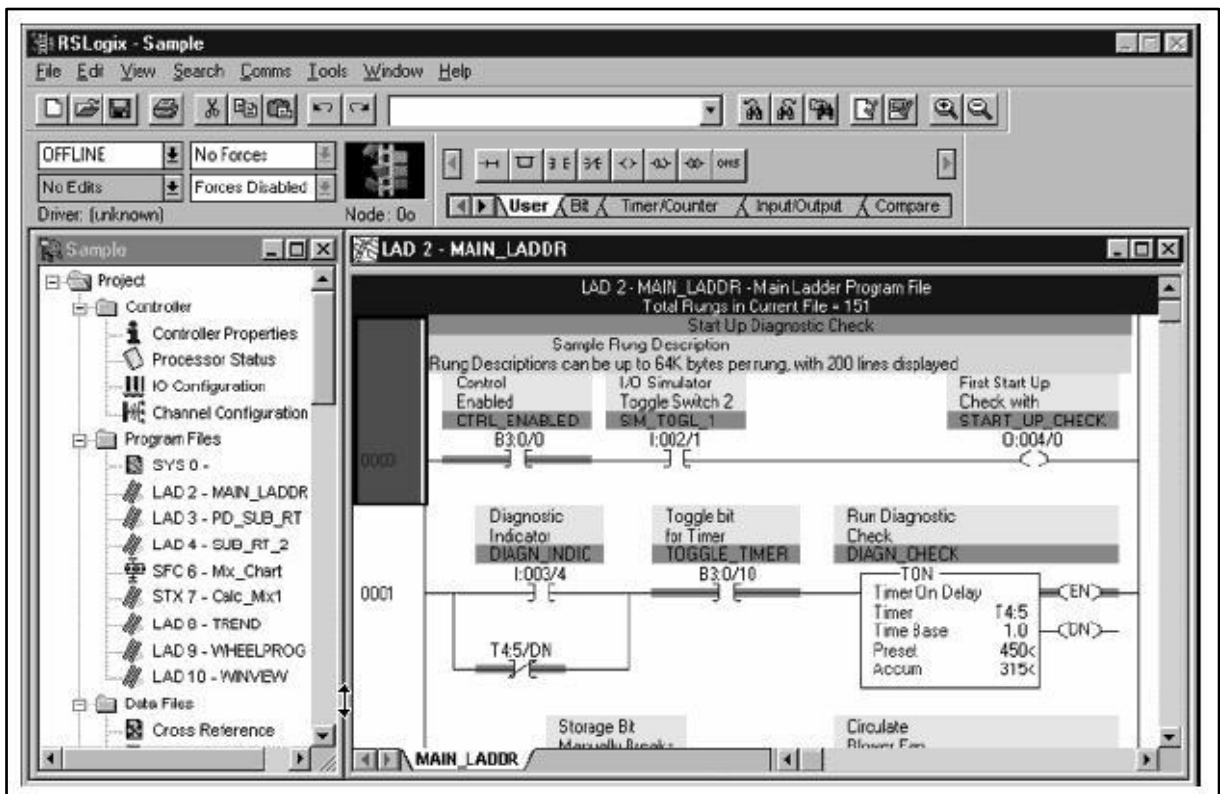


Figura 56 – Software de programação para CLP compilando um programa em LADDER.
 FONTE: Rockwell Automation Inc., 2004.

4.2.3.1 Painel Local

Devido às grandes distâncias envolvidas, CIC, CCL e unidade de processo, e com o intuito de facilitar as atividades operacionais, no local onde os compressores estão instalados (casa de compressores – junto à unidade de processo) existe um painel de controle. Este painel possui comunicação direta (utilizando protocolo MODBUS, conforme 2.9.7) apenas com o CLP de compressor, ou seja, é uma extensão no campo dos comandos exclusivamente do compressor.

Durante o procedimento de partida existem duas possibilidades da seleção de operação, remoto ou local. Para a condição remoto é possível realizar a partida exclusivamente via SDCD, no caso da seleção local, é possível utilizar o painel remoto (instalado na casa de compressores) para realizar o procedimento de partida, porém uma condição especial deve ser observada, para que o operador realize a ação de partida diretamente do campo é necessário que o console do SDCD libere a permissão para realizar a partida.

Esta condição de liberação do SDCD para partida representa duas importantes condições, a primeira, é a condição estabelecida no intertravamento (maiores informações no item 4.2.3.2) da máquina para realizar o procedimento de partida que consta de um conjunto de etapas obrigatórias pré-partida e a segunda é referente a segurança, ou seja, com o comando local o operador pode acompanhar cada uma das etapas pré-partida e avaliar possíveis irregularidades ou falhas.

Além disso, devido às instalações da unidade de processo ser aberta (sem delimitações ou barreiras físicas – requisitos normativos de segurança) pessoas estranhas à operação podem acabar tendo acesso ao painel local, mas ficam impossibilitadas de realizar qualquer ação, pois para acesso aos comandos é necessário conhecimento do console do SDCD.

4.2.3.2 Intertravamento e Procedimento de Partida

Para chegar ao momento único da partida de um equipamento complexo, de grande porte e estando integrado a um longo processo produtivo, muitas são as fases a serem vencidas até ser obtido sucesso ao final. Para a máquina de interesse nesta monografia, foram três grandes etapas, *loop test*, intertravamento e sequência de partida.

A fase de *loop test* consistiu na verificação da funcionalidade de todos os instrumentos, item 2.8.4, do sistema de compressão para garantir que os instrumentos fornecidos pelo fabricante da máquina estavam devidamente conectados ao controlador (CLP) de controle do compressor (exclusivo e redundante para cada uma dos dois compressores). O cabo de interligação, entre o instrumento e o CLP instalados na CCL, era de responsabilidade de fornecimento de outro conjunto de empresas – representando um ponto de atenção nas condições de interface, conforme é explicado no item 4.2.4 e também compartilhado por MORAES e CASTRUCCI (2007).

Além da condição de conexão das duas extremidades (campo e CLP), também eram realizados os testes funcionais destes instrumentos, garantido que todos os instrumentos estavam aptos e operacionais para a próxima etapa. Vale destacar que a grande maioria dos instrumentos empregados no compressor utiliza o protocolo HART, o qual foi melhor detalhado no item 2.9.6. Outras verificações envolvendo sinais analógicos também foram realizadas, pois os acionamentos das cargas auxiliares, como por exemplo, motores e aquecedores, são realizados utilizando sinais físicos entre o CLP e o centro de controle de motores (CCM). Uma informação importante sobre interfaces, conforme item 4.2.4, o fornecimento de todos os alimentadores de cargas elétricas (tensão alternada e contínua em todos os níveis atendendo todas as potências de cargas) é de responsabilidade de outro conjunto de empresas, diferente do fornecedor dos cabos de interligação para os instrumentos.

Em paralelo com a fase de *loop test* eram realizadas inicialmente verificações funcionais para em seguida serem realizados os testes de intertravamento entre a unidade de processo e o conjunto do compressor (principalmente envio e recebimento de comandos de liga e desliga), sendo que em relação a unidade, o conjunto de sinais de interesse representa apenas uma parte de todas as malhas e sistemas utilizados no processo – note-se a importância, novamente, do item 2.8.4.

A segunda etapa consistiu no teste de intertravamento, condições conforme item 2.8.3.3, dos sistemas de controle do compressor. Nesta etapa com todos os instrumentos operacionais e os comandos para as cargas auxiliares também operando, foi possível realizar a verificação completa de todos os eventos

constantes na matriz de causa e efeito desenvolvida pelo fabricante do compressor. Um exemplo deste tipo de matriz é apresentado na Figura 22.

Durante as verificações da matriz de cause e efeito foram utilizados equipamentos portáteis para a simulação do sinal HART originários no campo para o CLP, pois eram necessárias verificações com variação de condições, como por exemplo, variáveis de nível com valor 'muito muito baixo' (LAHH). Em relação aos acionamentos de cargas auxiliares, que em geral recebiam comandos do CLP originários como efeitos ou causas da matriz, foram acionados plenamente (operação normal) devido às condições de campo – alinhamento de utilidades como água e ar – estavam operacionais. Alguns sinais, após evidenciado a plena operacionalidade, foram 'forçados' devido a dificuldade e complicações operacionais, por exemplo é caso da purga do motor, mais detalhado no item 4.3.1, que possui tempo de execução próximo a uma hora, fato que impossibilita a continuidade de diversas outras verificações.

Antes de apresentar a última etapa é importante explicar e delimitar a condição da chamada partida, ou seja, para esta máquina de interesse a primeira partida consistiu no acionamento do motor principal – verificar operacionalidade na primeira energização em campo e sentido de giro - e verificação das condições essencialmente mecânicas da máquina após montagem em campo, também. A importância do sentido de giro do motor elétrico está diretamente ligado à implicações mecânicas no sistema de compressão. Para realizar esta partida, o sistema de compressão ficou totalmente aberto, ou seja, durante o giro não existira esforço de compressão devido à abertura total das válvulas.

A última etapa realizada antes da partida foi o procedimento de partida do equipamento – desenvolvido pelo fabricante. Nesta fase é avaliada a sequencia de eventos para realizar a partida, culminando na última ação, o comando de acionamento do motor principal. Durante este procedimento é realizada a validação do fluxograma de partida do equipamento e somente após a verificação pelo próprio fabricante é autorizada a partida, pois estão envolvidas questões de segurança operacional, pessoal e responsabilidades técnicas dos equipamentos.

O fluxograma contempla passo a passo todas as fases que devem ser realizadas pelo controlador e pelo operador em campo, garantindo que todas as condições da lógica de controle e de intertravamento estão plenamente satisfeitas, pois em determinadas etapa do fluxograma são solicitadas ações do operador no

painel local, dentro da casa de compressores, ações que é intertravada e não permite a continuidade do procedimento de partida.

Conforme descrito no item 2.8.3.3 e em concordância com BEGA (2003), diversas maneiras integradas de proteção devem ser consideradas e realizadas para que determinado sistema seja operado com segurança, sendo plenamente explicável tamanha procedimentação. A preocupação com o evento da primeira partida de uma máquina também é compartilhada em NÓBREGA (2011).

4.2.3.3 Sistema de Controle de Capacidade

Nos itens 2.10.1.2 e 4.2.1, foi possível verificar a forma de funcionamento do compressor alternativo e no item 4.1.1 foi apresentado e explicado o contexto produtivo da unidade de processo e em qual parte da produção é utilizado o compressor. É afirmando por NÓBREGA (2011), que uma característica operacional dos compressores alternativos é manter a vazão de compressão constante, considerando certo intervalo de pressão, desde que a rotação seja mantida constante.

Entretanto, para o processo produtivo, dependendo das condições físicas e químicas do processo operadas na unidade, o consumo de hidrogênio comprimido por meio do compressor alternativo varia de maneira que o equipamento precisa ser ajustado ou então pode funcionar de modo não desejado, o que implica na redução na eficiência da compressão e maior frequência na manutenção da máquina.

Buscando relacionar as informações de processo, funcionamento do equipamento e integração por meio da automação que surge o chamado controle de capacidade, que busca otimizar o controle do conjunto de compressão a medida que o consumo demandado pela unidade varia, de modo contínuo, permitindo operação da máquina apenas para atender a solicitação do processo e não desperdiçando volumes comprimidos, que apenas representam trabalho de compressão mas sem aproveitamento no processo.

O controle de capacidade consiste no controle automático das válvulas de sucção e descarga do compressor de maneira a entregar ao processo a vazão de gás solicitada, não realizando trabalho de compressão desnecessário. Este controle, durante a solicitação nominal de vazão, realiza o comando de abertura da válvula durante a sucção e fechamento no início da compressão, após o final do ciclo de compressão, o controlador realiza a abertura da válvula de descarga, enviando o

gás para o processo. Na condição da solicitação de menor vazão, o procedimento anterior praticamente é repetido, ou seja, para a admissão do gás a válvula abre e somente será fechada quando o volume de gás, solicitado pelo processo, estiver no cilindro, o ciclo de compressão é iniciado antes do fechamento da válvula de admissão, após a compressão a válvula de descarga é então aberta.

Todo este controle, em geral, é realizado por CLP que controla as variáveis e os comandos de abertura e fechamento das válvulas nos momentos corretos, este controlador, em geral, é desejável que tenha comunicação com a planta de controle de modo a realizar a integração das necessidades efetivas de processo versus o controle do equipamento. Outro ponto, que não pode ser minorado, é quanto ao sistema hidráulico utilizado na atuação da válvula, este sistema deve estar disponível, pronto para operar e operando corretamente assim que o conjunto mecânico iniciar o ciclo de compressão, desta forma, torna-se importantíssimo que este sistema de controle faça parte do intertravamento (explicado no item 2.8.3.3) do equipamento, pois representa um componente chave para o funcionamento do compressor. Para melhor exemplificar e contextualizar a condição de controle do sistema instalado no campo e a integração com sistemas de controle da unidade, a Figura 57, demonstra de forma esquemática os diversos integrantes do sistema, onde (1) é a instalação de campo, (2) o controlador ou CLP do sistema de controle de capacidade e (3) o SDCD representando o processo produtivo.

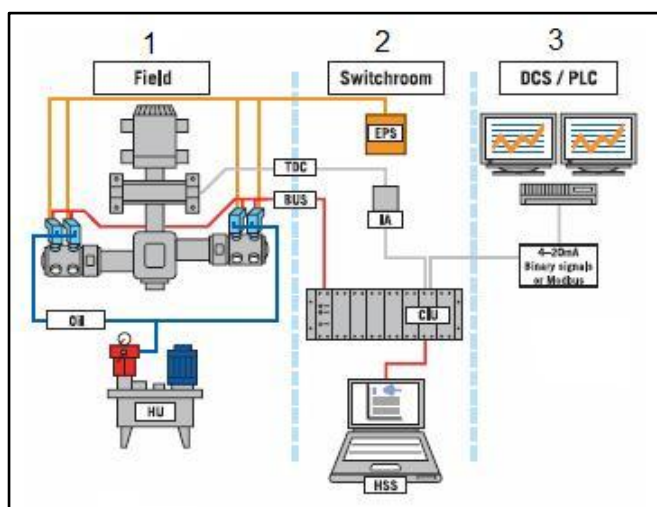


Figura 57 – Esquemático demonstrando o sistema de controle de capacidade integrado ao processo (SDCD ou DCS).

FONTE: Adaptado de Hoerbiger².

As válvulas, para este caso de controle de capacidade, são elementos internos ao cilindro de compressão e são submetidas á condições extremas de operação que envolvem altíssimas pressões e elevadas temperaturas, como explanado em 2.10.1.2 e 2.10.4, após compressão os volume do fluido é reduzido e a temperatura aumenta. A Figura 58 mostra alguns tipos destas válvulas empregadas em sistemas de compressão e qual são as diversas partes constituintes deste elemento.

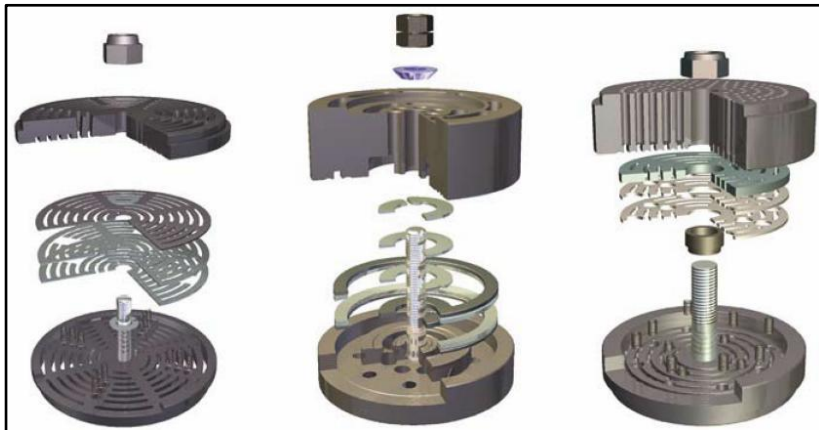


Figura 58 – Exemplos de válvulas e constituintes aplicadas em compressores.
FONTE: Hoerbiger¹.

É importante destacar que, em geral, válvulas para aplicações em compressores possuem acionamento mecânico, ou seja, para realizar o movimento de abertura e fechamento uma haste realiza esta tarefa, sendo que esta haste é acionada hidráulicamente por um sistema de controle que consegue obter precisão no controle mecânico da válvula devido ao sistema hidráulico utilizado. A próxima imagem, Figura 59, demonstra o conjunto completo de um sistema de controle de capacidade, no qual estão dispostos a válvula (semelhante a Figura 58), haste de comando, atuadores hidráulicos (logo acima da haste) e sistema de comunicação e controle.



Figura 59 – Exemplo de um sistema de controle de capacidade.
FONTE: Hoerbiger².

A imagem a seguir, Figura 60, demonstra duas aplicações reais dos sistemas de controle de capacidade em grandes compressores de fabricantes diferentes. Os sistemas de controle de capacidade estão indicados por círculos na cor vermelha.

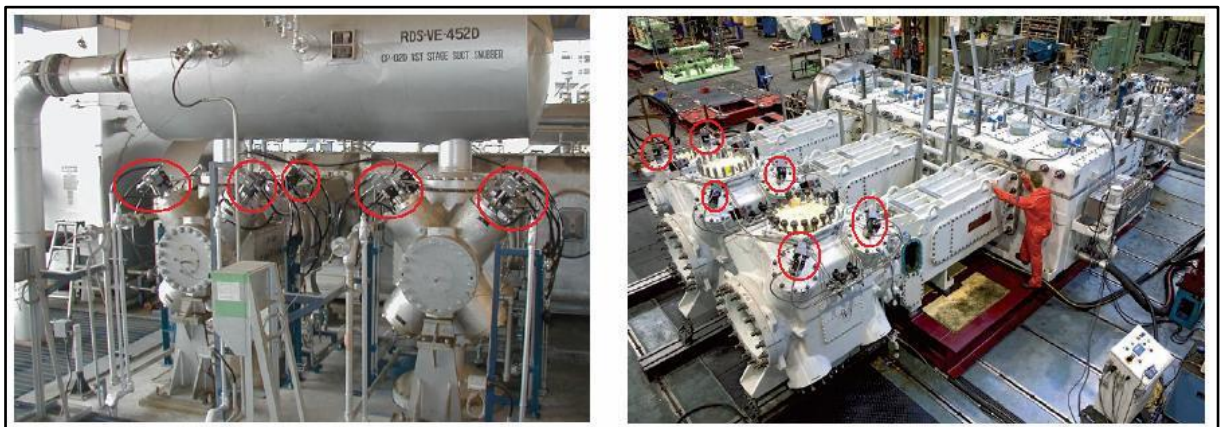


Figura 60 – Exemplos reais de aplicação do sistema de controle de capacidade por diferentes fabricantes.
FONTE: Adaptado de Hoerbiger².

4.2.4 Interfaces de Comissionamento

Para o desenvolvimento de um projeto complexo e grande porte, como por exemplo, as unidades de HDTI e UGH, existe a necessidade de inúmeros

profissionais das mais diversas áreas do conhecimento, além de uma grande força de trabalho para execução de todas as atividades.

A divisão das atividades para construção e comissionamento ficou a cargo de três grandes grupos de empresas, sendo a primeira responsável pela unidade de processo e interligações internas à unidade (equipamentos, instrumentos, painéis, tubulações, entre outros), a segunda, proveu toda a infraestrutura para os sistemas de alimentação e controle da planta (subestação – incluindo painéis elétricos e de comando, sala de controle e interligação com o sistema principal de força e dados das demais unidades de processo) e o terceiro, representado pelo fabricante do equipamento de compressão, fornecendo o acionador, conjunto de compressão e todos os demais sistemas auxiliares, de controle e instrumentação.

Realizar a integração e união dos integrantes e as informações destes três grandes grupos, minimizar os impactos gerados por divergências e lacunas de projeto, respeitar delimitações de escopo, implicando na garantia do serviço ou equipamento, e solucionar os problemas realmente é uma tarefa complexa. Porém, todas estas dificuldades necessitam as corretas soluções para que possam ser iniciados os testes funcionais (*loop test*, intertravamento etc.) e somente após conclusão de todas as verificações, passar para a fase de *start-up*. Forma semelhante de dividir em etapas as atividades de verificação e testes é compartilhada em MORAES e CASTRUCCI (2007).

4.3 MOTOR ELÉTRICO

A escolha do motor elétrico para acionamento do conjunto mecânico de compressão aconteceu motivada por dois fatores, possibilidade na utilização concomitante com a função de correção do fator de potência do sistema de potência e pela condição operacional favorável que o compressor alternativo oferece.

A primeira motivação é embasada no tamanho e porte do motor necessário a impulsionar a carga do compressor, ou seja, necessitando de potência muito elevada e com rotação relativamente baixa, o motor síncrono apresenta vantagens operacionais, construtivas eletricamente e possibilidades de aplicações complementares. Em relação a aplicação complementar, o motor síncrono opera com fator de potência unitário – fundamentações em 2.1.3 – e dependendo da forma de controle, do construtivo da máquina elétrica e qual a finalidade de aplicação, o motor pode ser utilizado na compensação de reativo do sistema.

Em especial, o motor deste compressor, inicialmente teria a dupla função – acionador do compressor e compensador síncrono – mas devido a divergências na fase final de projeto quanto ao custo final do equipamento resultaram pela escolha de uma máquina elétrica síncrona, mas que do modo como foi fornecida não é possível realizar a compensação de reativo conforme desejado inicialmente na concepção do projeto. Depois de realizadas as diversas fases até a partida, foi possível identificar que com modificações no sistema de controle do motor (revamp) é possível realizar compensação de reativo do sistema, porém em menor escala do que seria a outra máquina dimensionada na fase inicial do projeto.

Quanto ao sistema de excitação, *brushless*, para aplicações em áreas classificadas (item 2.4) e pelas vantagens de manutenção e operação (item 2.1.2) que este sistema de excitação implementa, a escolha deste sistema mostra-se muito fundamentada.

A segunda motivação é referenciada ao funcionamento do conjunto mecânico do compressor alternativo que possui como característica de desempenho operacional e construtiva o funcionamento em rotações constantes, porém neste aspecto de operação em rotações constantes versus o aspecto de variação no processo produtivo torna o controle de capacidade (item 4.2.3.3) um artifício fundamental para operacionalidade do equipamento. De qualquer forma, com a implementação e utilização do sistema de controle de capacidade é possível considerar que a rotação do conjunto de compressão é constante (em geral, 372 rpm no máximo, conforme 4.2.1) o que torna muito favorável a aplicação de um motor síncrono que como característica fundamental apresenta velocidade constante e proporcional a frequência da corrente de alimentação (conforme 2.1).

Seguindo a análise essencialmente elétrica do parâmetro de velocidade versus a frequência da corrente de alimentação, para a velocidade máxima concebida em compressor alternativo (372 rpm) a máquina elétrica apresenta dificuldades construtivas para estabelecer esta velocidade apenas com elementos elétricos em uma máquina síncrona, mas é possível claramente obter a velocidade de 360 rpm com a máquina síncrona.

Embasado neste fato e demais fundamentos de máquinas elétricas (teoria básica de máquinas síncronas no item 2.2) o projeto do motor elétrico resultou em um motor elétrico com potência elétrica de 5,8 MW, fator de potência unitário (máquina síncrona), tensão de alimentação em 13,8 kV, corrente nominal de

operação de 260 A, velocidade síncrona de 360 rpm o que implica diretamente o número de pólos (20 pólos), excitação do tipo *brushless*, motor apropriado para operação em áreas classificadas (certificação Ex-p, Zona 2 e Grupo IIC) e grau de proteção do invólucro IP55W.

4.3.1 Motor elétrico e Classificação de Áreas

Conforme explicado anteriormente na descrição do processo, item 3.3.5, a finalidade básica do equipamento consiste na compressão de hidrogênio para utilização no processo produtivo, este fato em si possui implicação direta para a classificação da área de toda a região onde está instalado o compressor, além das regiões próximas – dependendo do estudo de classificação de áreas realizado.

Considerando o motor elétrico, responsável pelo acionamento do conjunto mecânico, que está conectado diretamente ao eixo do compressor, é indiscutível que o local de instalação do motor é classificado, necessitando providências quando à proteção do equipamento. Seguindo o apresentado no item 2.4, a região de localização do equipamento é definida como Zona 2 e Grupo IIC, com isso, todos os dispositivos eletro-eletrônicos e demais dispositivos necessitam atender os requisitos desta classificação de área, incluindo certificação própria para aplicações destinadas a áreas classificadas.

Para atender a especificação da classificação de áreas, o motor elétrico possui proteção por pressurização (Ex-p), que consiste na pressurização do interior do invólucro visando evitar a entrada de gases de processo no interior do motor (presença de tensões perigosas ao ambiente externo ao invólucro quando em operação). É importante destacar que não apenas a pressurização interna do motor é suficiente para garantir segurança, é fundamental a realização da purga do motor, que consiste na passagem de gás inerte pelo invólucro para retirada de possíveis gases perigosos, conforme item 2.4.1.

A norma NBR IEC 60079-2 (2005) determina que o volume interno do invólucro seja trocado cinco vezes para garantir que concentrações perigosas de gases ou atmosferas explosivas sejam mantidas em níveis seguros e aceitáveis no interior do invólucro. Como solução para atender este requisito, uma linha de ar foi instalada desde o *header* até a casa de compressores onde estão localizados os compressores – conectados diretamente ao sistema de controle de purga do motor.

Em relação ao controle automático de purga, este sistema deve ser previamente certificado para que as condições exigidas em normas sejam totalmente atendidas devido às condições de segurança e legais para instalação do equipamento que atende os requisitos estipulados no estudo de classificação de áreas. Além da certificação, a condição operacional do equipamento também possui mais um nível de proteção e segurança, ou seja, o sistema de controle de purga é intertravado com no procedimento de partida da máquina, de maneira que caso a purga e a consequente pressurização do invólucro não for realizada, o equipamento não permite prosseguir nas etapas para partida, ressaltando mais uma vez a importância dos sistemas de segurança apresentados em 2.8.3.3. Para exemplificar a condição de funcionamento de um sistema de purga e o intertravamento – realizado por sinais enviados ao CLP que controla o compressor – a Figura 61 contém os principais elementos necessários a um sistema de purga e sinais disponibilizados para envio ao controlador (identificados no retângulo vermelho – localizado na parte central superior da figura).

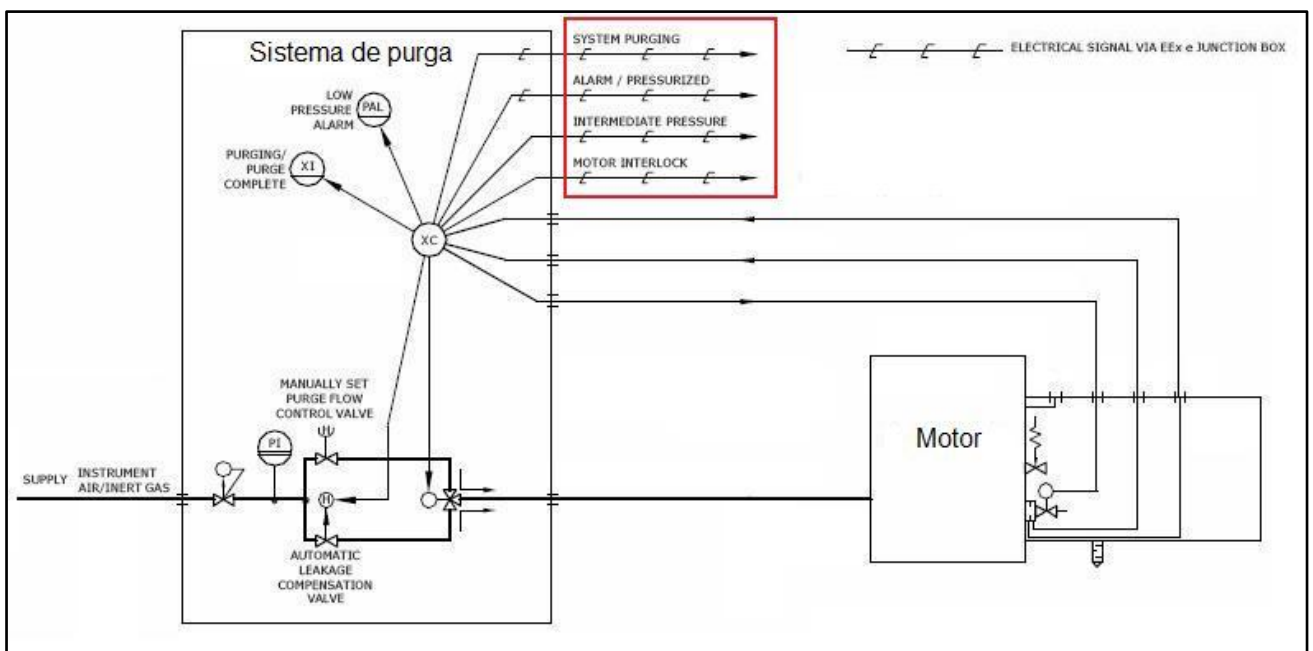


Figura 61 – Fluxograma de um sistema de purga aplicado a um motor – em vermelho sinais disponíveis para intertravamento.

FONTE: Adaptado de Expo², 2011.

Vale ressaltar que a pressurização do invólucro do motor deve ocorrer independentemente do tamanho da carcaça e da quantidade de caixas auxiliares possam existir fixadas no corpo do motor. E sobre as caixas auxiliares, necessárias para interconexão dos elementos internos a carcaça ao meio exterior, deve ser

relativamente tranquilo resolver esta dificuldade. Este fato destaca a importância das diversas etapas de um projeto, em especial para automação, MORAES e CASTRUCCI (2007) também compartilham esta consideração sobre a divisão em etapas e a importância de cada uma delas.

Em relação a proteção do invólucro, mais detalhada no item 2.4.2, referente ao motor, este apresenta grau de proteção IP55W que indica existe proteção contra poeira, com penetração de quantidades que não afetam a operação normal do equipamento; as partes perigosas do equipamento estão inaccessíveis a elementos 1 mm de diâmetro; em relação ao ingresso de água, o invólucro resiste a aplicação de jatos; é possível utilização do equipamento em condições ambientais específicas e medidas adicionais de proteção também estão presentes. Mesmo contando com todas estas proteções, o motor elétrico e o conjunto de compressão estão instalados em condições abrigadas das intempéries e que permitem ventilação adequada, na chamada casa de compressores, pois apenas os dois equipamentos estão instalados nesta localidade.

4.3.2 Cargas Auxiliares

Para o funcionamento de um grande e complexo equipamento, como é caso do compressor alternativo diversas sistemas auxiliares são necessários para que a operação, desempenho e funcionalidade do equipamento não sejam prejudicadas. Muitos dos sistemas são equipamentos estáticos (vasos, permutadores entre outros), tubulações e válvulas de segurança (do inglês *pressure safety valve* (PSV) em geral, válvula sem controle automático). Porém outros sistemas como bombas de lubrificação, aquecedores e bombas pressurizadoras necessitam de acionadores e sistemas de controle que gerenciem os acionamentos e desligamentos destas cargas.

Como explicado no tópico sobre intertravamento (2.8.3.3), para segurança e confiabilidade operacional os sistemas não apenas precisam ser desligados, muitas vezes sistemas críticos necessitam de acionamentos de outros dispositivos em paralelo ou de maneira auxiliar para realizarem tarefas imprescindíveis em determinadas situações de contingência. Um exemplo claro desta situação é o próprio sistema de lubrificação do compressor, tal sistema é de fundamental importância para o funcionamento correto do sistema mecânico, pois a falta de

lubrificação deste sistema pode acarretar danos irreversíveis à máquina e até mesmo a perda de funcionalidade total do equipamento.

Com a finalidade de garantir o pleno funcionamento das cargas auxiliares, motores elétricos do sistema de lubrificação e de pressurização do sistema de controle de capacidade e os diversos aquecedores existentes, os comandos saem diretamente do CLP que controla o compressor e são enviados, via par de condutores (fiado), para a respectiva gaveta do painel CCM. Visando garantir que estas cargas auxiliares estão em funcionamento, é retornado outro sinal, também fiado, de *status* da carga, confirmando que a carga foi acionada. É importante destacar que os aquecedores utilizados para aquecimento de óleo – distribuídos em diferentes pontos do conjunto mecânico de compressão – e o aquecedor destinado a água de refrigeração – empregado no pré-aquecimento da água para evitar diferença abruptas de temperatura entre a água e o cilindro de compressão que gera calor em quantidade considerável – também são cargas importantes no sistema de intertravamento do compressor, principalmente nos eventos antecedentes da partida e no período pós parada do equipamento.

Em relação ao intertravamento da máquina, caso ocorra o desligamento das cargas auxiliares, dependendo da carga, ocorre o imediato desligamento do acionador principal (motor elétrico principal) e imediatamente o CLP do compressor necessita realizar comandos e acionamentos para garantir a parada segura do equipamento, pois estando em regime normal de operação, caso ocorra este tipo de falha ou desligamento, o compressor estará realizando o ciclo de compressão normalmente. Tal evento também é intertravado com a unidade de processo, pois a parada do equipamento força atuações do SDCD e do SIS ou *programmable electronic system* (PES).

Ainda considerando a situação de controle que o SDCD exerce na planta de processo, para as cargas essencialmente elétricas, ou seja, para comandos de acionamentos, desligamentos e monitoração das cargas elétricas (gavetas do CCM, por exemplo) existe implementado um sistema de controle parecido com o SDCD, porém com atuação exclusiva nas cargas elétricas do CCM, esta arquitetura de controle é chamada de sistema de comando e monitoramento distribuído (SCMD).

Esta divisão na arquitetura do controle distribuído divide o controle e comando exclusivo para cargas de CCM (gavetas) e CDC (cubículos) em um sistema separado e exclusivo para as subestações. A arquitetura dos sistemas são

muito semelhantes – em ambos os sistemas os CLPs são duplos para redundância, as fonte de alimentação e cartões de I/Os, da mesma forma.

Para ilustrar melhor a condição da gaveta de um CCM destinada a uma determinada carga, a Figura 63, apresenta um painel com diversas cargas e uma gaveta, que está extraída da posição de operação, com os internos expostos para visualização dos internos que recebem comandos e da estrutura essencialmente elétrica.

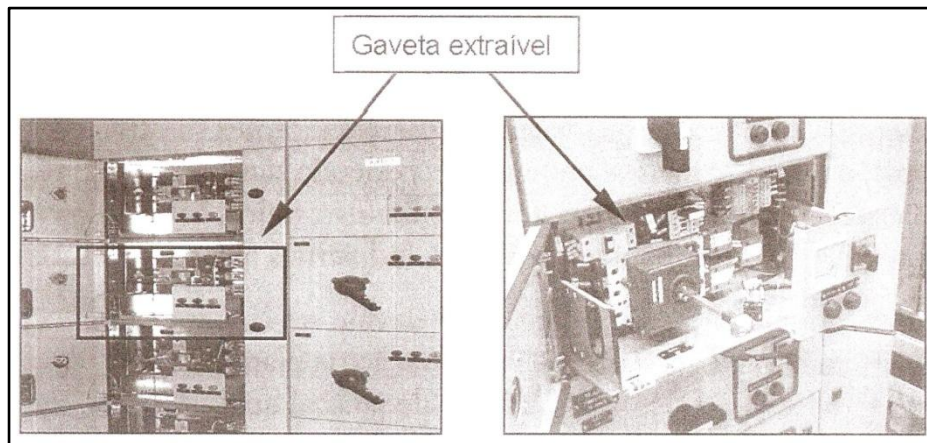


Figura 63 – Exemplo de CCM com gavetas extraíveis.
FONTE: MORAES e CASTRUCCI, 2007, p. 42.

4.3.3 Manobras Pré-partida do Motor Principal

Conforme explicado anteriormente, diversos testes e verificações (resistência de isolamento, valor de resistência ôhmica, entre outros) são realizados antes da primeira energização em campo do motor elétrico. Ainda assim, mesmo atendendo procedimentos existe a possibilidade de algo ocorrer de modo inoportuno e para minimizar a repercussão de eventos para as demais áreas operacionais são necessárias medidas de contenção.

O contexto do sistema em que o motor elétrico principal do compressor está inserido engloba basicamente três sistemas elétricos de potência, divididos conforme as classes de tensão: 230 kV, 69 kV e 13,8 kV, dispostos em diferentes arranjos.

O sistema de 230 kV é constituído em um arranjo de barra dupla com *bypass*, mais detalhado no item 2.5.1, contendo no total cinco disjuntores utilizados para formação deste arranjo. Estes disjuntores estão distribuídos da seguinte maneira: dois para recebimento de duas linhas independentes da Companhia

Paranaense de Energia Elétrica (COPEL) em 230 kV, outros dois instalados a montante dos dois transformadores, com potência de 50 MVA cada em condições normais de operação, e o último disjuntor é utilizado no *by-pass* entre as duas barras da subestação. As manobras nesta subestação são realizadas apenas pela COPEL.

A saída dos secundários dos dois transformadores da subestação anterior são interligados por meio de cabos até outra subestação – 69 kV. Esta subestação possui algumas particularidades: foi construída abrigada, possui apenas função de manobra do sistema e possui no total sete disjuntores isolados à SF6 (subestação do tipo isolada a gás ou *gás insulated substation* – GIS). Esta subestação está configurada no arranjo de barra dupla, detalhes no item 2.5.2, com dois disjuntores recebendo cabos provenientes do secundário dos transformadores de 230 / 69 kV, um disjuntor com a função de *by-pass* entre as duas barras do arranjo e os últimos quatro disjuntores estão instalados a montante do primário de quatro transformadores, metade com potência de 10 MVA e a outra metade com potência de 30 MVA, que rebaixam a tensão de 69 kV para 13,8 kV.

O secundário dos quatro transformadores são interligados a barras das quais derivam disjuntores para diversos consumidores, formando o arranjo de secundário seletivo concentrado, adequado para tensões de 13,8 kV e inferiores e melhor detalhado no item 2.5.4. Provenientes de duas barras diferentes deste arranjo, derivam dois disjuntores que alimentam na subestação local – subestação próxima a carga e a unidade de processo, destinada apenas às unidade de HDTI e UGH – que formam um arranjo de secundário seletivo distribuído, mais detalhes em 2.5.3.

Com estas explicações sobre o sistema e os respectivos arranjos, o contexto das manobras realizadas para partida do motor elétrico fica mais claro. Previamente a realização da manobra no campo, para cada uma das etapas a ser realizada nos sistema elétrico foram elaborados procedimentos específicos contendo o descritivo passo a passo, sistemas impactados, pessoas responsáveis em caso de emergência e forma de contingência e quais os impactos globais durante a manobra bem sucedida ou no caso de falha.

A subestação de 230 kV não sofreu nenhum tipo de alteração devido à condição de interligação ao SIN (Sistema Interligado Nacional), sendo operada apenas pela COPEL. É possível avaliar que realmente não existiria necessidade de manobras nesta subestação, pois uma vez garantido que o arranjo da subestação

mantém duas linhas de alimentação independentes e dois transformadores alimentados separadamente, as manobras referentes aos consumidores puderam ser realizadas na próxima subestação – 69 kV.

Na subestação de 69 kV (GIS) dos quatro disjuntores que alimentam os quatro transformadores, três deles (dois de 10 MVA e um de 30 MVA) foram conectados a uma das duas barras e permaneceram alimentando normalmente as cargas dos demais processos, enquanto o quarto disjuntor ficou conectado à outra barra do arranjo e alimentando exclusivamente o motor síncrono. O disjuntor de interligação das barras (*by-pass*), que opera normalmente fechado devido a condição de redundância do sistema de potência, permaneceu aberto durante a energização do motor para garantir o ‘ilhamento’ do motor do restante do sistema. A manobra de abertura deste disjuntor de *by-pass* foi a última manobra realizada antes do fechamento do disjuntor de alimentação do motor elétrico, pois depois de realizada esta abertura o restante de todo o sistema (todas as cargas elétricas de processo com exceção exclusiva do motor em teste) que está operacional perde a redundância de alimentação do sistema de potência.

Na subestação de 13,8 kV o sistema permaneceu alinhado com um dos dois transformadores (30 MVA) alimentando a um dos lados da barra do arranjo com secundário seletivo concentrado e com o disjuntor de interligação das barras do secundário aberto. Por final, localizado na subestação de área, o arranjo de secundário seletivo distribuído ficou com alimentação apenas por um dos lados da barra e com o *tie* aberto, sendo que as únicas deste arranjo são os dois compressores (um em cada lado da barra) e mais dois outros motores de indução com partida direta e potência de 2 MVA cada um deles. À época da primeira partida, estas outras duas cargas ainda não estavam operacionais, já na fase de partida do segundo compressor, estas cargas já estavam operacionais, mas para a fase de partida a carga ficou alimentada pelo lado oposto da barra em que estava conectado o motor elétrico do compressor.

4.3.4 Acionamento do Motor Principal

Neste item é apresentado o início de funcionamento do motor síncrono, logo após ser realizada a manobra descrita em 4.3.3 e todos os requisitos operacionais e de intertravamento estarem satisfeitos, para somente então o disjuntor principal de alimentação ser manobrado (fechado) e todo o sistema, desde o painel até os

enrolamentos, serem energizados com a tensão nominal. A Figura 64 apresenta o diagrama unifilar básico de ligação dos principais componentes para funcionamento do motor síncrono *brushless*.

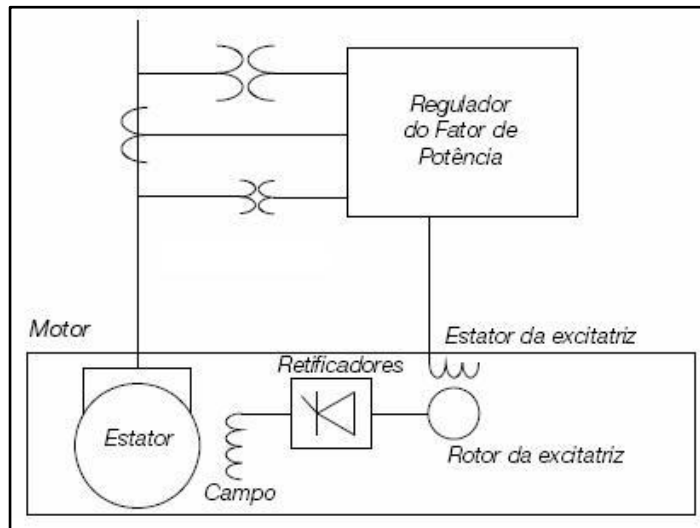


Figura 64 – Unifilar Básico de interligação dos elementos do motor síncrono *brushless*.

FONTE: Adaptado de ELETROMOTORES WEG⁵, 2012.

A principal forma de partida para motores elétricos deste tipo é a partida direta assíncrona, na qual o motor parte inicialmente como motor de indução (gaiola de esquilo). No momento de fechamento do disjuntor é aplicada nos enrolamentos do estator a tensão nominal (13,8 kV) e no rotor é induzida outra tensão, porém com a mesma frequência da tensão da armadura. Para que possa ser possível partir nos moldes do motor assíncrono são utilizados dois artifícios, o primeiro é o enrolamento amortecedor (detalhes na Figura 2) que consiste em barras que passam através das ranhuras nos pólos salientes e são curto-circuitadas nas extremidades do rotor e o segundo é utilização de uma resistência interligada ao rotor, a chamada resistência de partida ou de descarga. Para realizar a tarefa de inserir a resistência de partida, um tiristor (item 2.3) do circuito da excitatriz é disparado assim que a tensão induzida no rotor ultrapasse determinado valor (normalmente valores acima de 500 V, seguindo o funcionamento apresentado no Gráfico 2) a resistência é inserida com o circuito do rotor.

Com a aplicação da tensão na armadura e o comportamento do rotor, durante a partida, similar ao modo do rotor tipo gaiola de esquilo, o rotor inicia a rotação própria devido ao torque gerado (item 2.1.1) e conforme a velocidade vai aumentando a frequência da tensão induzida no rotor e no resistor de partida vai

diminuindo. Com o início do movimento de rotação do rotor, em conjunto e de modo solidário, a excitatriz inicia o giro e conseqüentemente iniciando a geração energia elétrica (inicialmente em corrente alternada) para alimentar o circuito retificador que supre energia para o controle de disparo de campo e para o próprio campo do rotor. Assim que o circuito de controle de disparo dos tiristores é alimentado, o *gate* do tiristor que realizou a inserção da resistência de partida passa a ser disparado pelo circuito de controle de disparo.

A partir do momento de alimentação do circuito de controle, este passa a monitorar a condição de escorregamento do rotor por meio do valor da frequência da tensão induzida, quando for alcançado determinado valor estabelecido, é realizada a aplicação de tensão em corrente contínua aos enrolamentos do rotor, fazendo o motor entrar em velocidade síncrona com a rede. Neste momento é caracterizado que o motor síncrono partiu e está em funcionamento em regime.

No momento de sincronização do motor elétrico é importante destacar que neste exato instante, para ocorrer o sincronismo, surge a aplicação do torque chamado *pull-in* torque, que consiste no torque máximo aplicado à carga inercial conectada ao eixo para atingir a velocidade de sincronismo para tensão e frequência nominais e excitação aplicada, consideração também partilhada na API 546 (2008). Na condição oposta está o torque de perda de sincronismo, *pull-out* torque, que consiste no esforço mecânico máximo desenvolvido pelo motor elétrico sem ocorrer a perda de sincronização, ou seja, para esforços mecânicos superiores a este valor dimensionado para a máquina, ocorre a perda elétrica de sincronismo do motor, consideração esta também partilhada na API 546 (2008).

Para garantir a aplicação da tensão ao rotor por meio do tiristor principal de controle e a retirada da resistência de partida, é instalado outro tiristor que força o desligamento do tiristor de inserção da resistência de partida. Além disso, no caso de ocorrência de algum evento que provoque perturbação à máquina elétrica, este mesmo tiristor garante a dissipação no resistor de partida e força o desligamento do tiristor principal, retirando a tensão contínua do rotor. Além desta proteção para garantir a entrada ou saída da resistência de partida, o enrolamento amortecedor, utilizado na partida como fechamento do curto-circuito da gaiola de esquilo, também serve para garantir estabilidade elétrica no caso de variações bruscas.

A Figura 65 apresenta o esquemático do circuito girante (excitatriz) de uma máquina elétrica síncrona *brushless*, é válido observar que o circuito de controle de

disparo é o responsável pelos momentos de disparo dos *Gates* dos tiristores, os diodos (marcados no quadrado vermelho – quadro maior localizado mais a direita da figura) realizam a retificação da tensão alternada gerada no rotor da excitatriz e esta mesma tensão retificada é utilizada na alimentação do circuito de controle e da alimentação do rotor. O tiristor marcado com quadrado azul (localizado na região central inferior da figura) é o auxiliar e o marcado em verde (região central superior da figura) é o tiristor principal, responsável pela aplicação da corrente contínua no rotor.

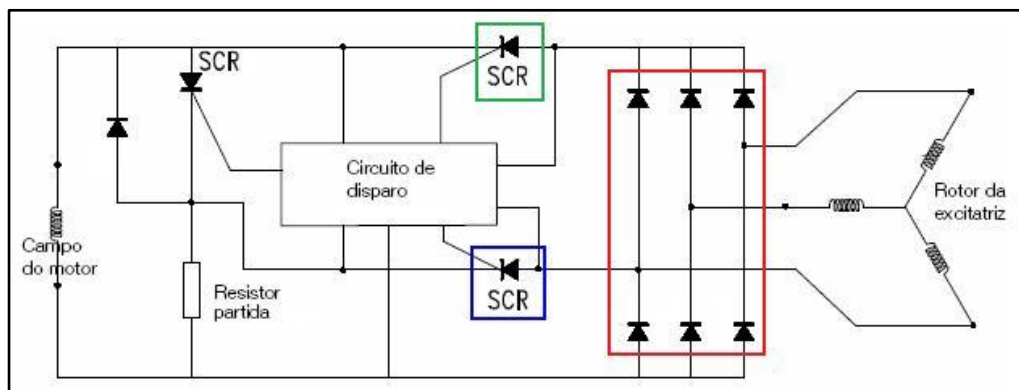


Figura 65 – Esquemático do circuito girante (excitatriz) para um motor elétrico. FONTE: Adaptado de ELETROMOTORES WEG⁵, 2012.

Com a partida do motor elétrico síncrono, conforme descrito anteriormente, torna-se necessário ser estabelecido controle sobre o sistema para que o motor possa operar de modo contínuo conforme ocorre variação na carga do eixo. À medida que variações de carga ocorrem eixo do motor (carga mecânica) é necessário que um sistema de controle monitore e atue no sistema de excitação, pois com o aumento de carga mecânica ocorre aumento na corrente de aradura que implica diretamente em nova regulação para a tensão para a excitatriz de maneira que o campo girante do rotor seja mantido síncrono com o do estator (mantendo sincronismo e o fator de potência, item 2.1.3).

O controlador precisará monitorar constantemente a corrente e a tensão do sistema – motor elétrico e alimentador – e realizar correções no valor da tensão aplicada ao campo da excitatriz, ou seja, controlar a tensão em corrente contínua que é aplicada à excitatriz. Este controle está diretamente ligado ao controle de fator de potência, pois conforme é realizada a regulação, é possível operar o motor de modo mais capacitivo ou mais reativo, por isso, estes módulos de controle também são chamados de reguladores de fator de potência. Como forma de ilustrar o

esquema de controle realizado por um sistema de regulação de tensão de campo, a Figura 66 apresenta os diversos blocos funcionais que um regulador pode ter, dependendo do fabricante, podem existir mais ou menos blocos funcionais e até mesmo o arranjo pode ser alterado.

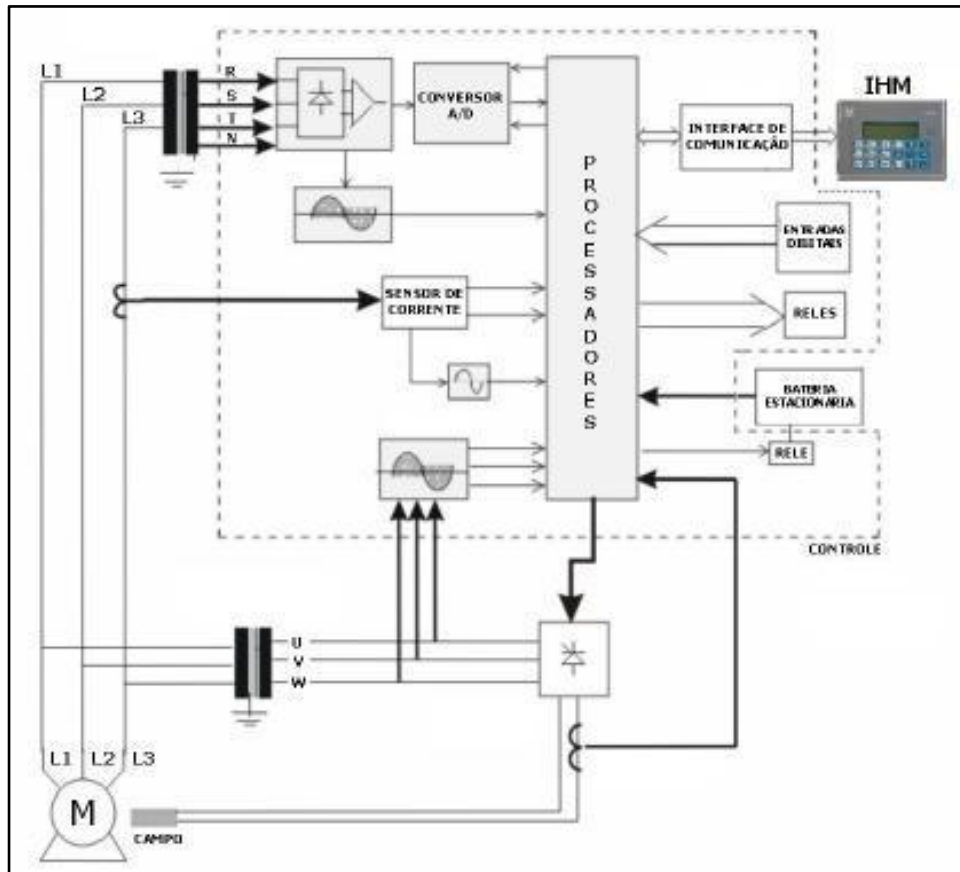


Figura 66 – Exemplo de esquemático funcional para um controlador de tensão de campo da excitatriz.

FONTE: Adaptado de Grameyer, 2007.

Além de todos os blocos funcionais do sistema de controle apresentados na Figura 66, é possível adicionar mais outro bloco funcional, o sinal de um encoder. O sinal deste dispositivo pode ser empregado para trazer mais uma variável de realimentação para o sistema de controle com informações de campo – informação de velocidade real do rotor – pois analisando a arquitetura de controle da Figura 66, apenas variáveis essencialmente elétricas são utilizadas, de modo que a informação da velocidade representará uma informação física (rotação) do motor.

4.3.5 Proteções para o Motor Principal

Considerando que o exposto no item 4.3.4 é referente apenas a partida do motor, torna-se necessário também apresentar a forma de proteção existente para o

motor síncrono. Conforme definido em 2.7, o sistema elétrico de potência necessita ter mecanismos para garantir a proteção dos equipamentos, sistemas e pessoas, para esta finalidade são implementadas técnicas de coordenação de proteção e utilização de dispositivos próprios para esta finalidade. No caso das proteções elétricas, normalmente, são utilizados relés digitais de proteção, pois estes dispositivos são muito similares aos CLPs e possuem opções funcionais muito parecidas, como por exemplo, comunicação em rede utilizando diferentes protocolos.

Para o caso em análise nesta monografia, é importante destacar algumas destas proteções, sendo que elas são empregadas tanto no sistema de proteção elétrica do motor e no sistema de controle da excitatriz, de modo individual e complementar. A maneira mais comum de representar as proteções em desenhos esquemáticos ou unifilares e na sinalização dos alarmes é utilizando a representação numérica padronizada, como por exemplo, as funções descritas na Tabela 1. Sistemas e equipamentos complexos, como estes apresentados nesta monografia, utilizam inúmeros tipos de proteção e variadas formas de coordenação de proteção, a seguir, são apresentadas as principais mais comuns funções que uma máquina elétrica síncrona possui. Em relação à proteção desempenhada pelo relé para o motor, são utilizadas as funções:

- 27 – subtensão: proteção destinada a atuação quando os valores da tensão de alimentação estão abaixo de valores pré estabelecidos;
- 49 – relé térmico: função destinada a limitação do aumento da temperatura nos enrolamentos do estator do motor, sendo que para esta função são necessários elementos detectores de temperatura (do inglês *resistance temperature detector* – RTD) instalados diretamente no interior dos enrolamentos e a partir de determinado valor de temperatura ocorre a atuação desta proteção;
- 50 (BF / GS) – sobrecorrente instantânea: função de atuação imediata à detecção de evento de sobrecorrente; para o sufixo BF a proteção também monitora a falha de disjuntor e para GS a monitoração ocorre para eventos de fuga de corrente à terra;
- 51 – sobrecorrente: no caso de ocorrer carga excedente à determinado valor estabelecido, ocorre a atuação;

- 55 – fator de potência: monitoramento do fator de potência da carga conforme intervalo de valores estabelecidos, caso o valor ultrapasse o intervalo superior ou inferior por certo tempo, a proteção atuará e
- 87 – proteção diferencial: atuação quando quaisquer das propriedades da corrente (módulo ou ângulo, por exemplo) apresentarem diferença entre dois pontos de medição (detalhes no item 2.7.1).

As funções apresentadas e descritas anteriormente são empregadas no relé que realiza a proteção direta do motor, porém no caso do sistema de excitação, ou melhor, no sistema de controle de tensão da excitação também existem proteções próprias e algumas redundantes ao relé de proteção do motor, nestes casos de dupla proteção é necessário existir coordenação e seletividade entre elas de maneira que o sistema possa ficar redundante mas seletivo. As funções empregadas para este sistema são:

- 40 – sobre e sub excitação de campo: atuação no caso do valor da corrente de campo apresentar valores anormais (elevação, queda ou ausência) ou então no caso da brusca variação da componente reativa da corrente do estator indicando aplicação indevida do campo da excitatriz;
- 48 – sequência incompleta: proteção que atua no caso da sequência de partida ou parada não seja completada dentro de um tempo determinado, sendo que no caso de atuação toda o sistema fica bloqueado para outra tentativa até que condições estabelecidas sejam normalizadas;
- 53 – excitação de campo: condição de monitoração da subida de tensão em corrente contínua do campo da excitatriz durante a partida ou ascensão até certo valor ajustado;
- 55 – fator de potência: mesma função anteriormente descrita, mas neste ponto é aplicada ao sistema de aplicação de campo de excitação do motor síncrono, para esta proteção é necessária a correta coordenação com a função do motor para evitar desligamentos ou funcionamentos indevidos ou incorretos e

- 58 – falha do retificador: função para monitorar o funcionamento do retificador do sistema de excitação de campo, em caso de falha nos componentes (diodos, por exemplo) ocorre a atuação desta proteção.

Em relação à proteção 50 GS, descrita anteriormente, é importante realizar um relato sobre a importância das terminações dos cabos. No caso de estudo analisado nesta monografia o motor principal é alimentado com tensão de 13,8 kV e o dimensionamento dos cabos para atender critérios de queda de tensão e corrente resultaram em dois cabos por fase com seção transversal de 300 mm² e para esta classe de tensão e bitola é necessário a utilização de muflas (2.6) para as conexões no motor e no painel (disjuntor).

Neste contexto, é de extrema importância que a execução deste dispositivo de terminação seja muito bem realizada e instalada, pois existe a possibilidade de durante o momento da partida ocorre uma pequena fuga de corrente que pode acabar sensibilizando o sistema de proteção e atuar a função de fuga à terra (50 GS), implicando em verificações de sistemas sem necessidade, busca de falsas faltas (curto-circuito) e elevação na temperatura dos enrolamentos do motor, no caso de um desligamento antes de finalizar a sequência completa de partida.

Quanto a comunicação destes eventos, é fundamental que sejam de maneira rápida devido a característica dos eventos elétricos (eventos rápidos e que necessitam ações imediatas). Para atender os requisitos dos equipamentos de uma subestação é utilizado o protocolo IEC 61850 (item 2.9.5) que emprega mensagens do tipo *manufacturing message specification* – MMS para comunicação, porém para a comunicação dos eventos relativos às funções descritas anteriormente são utilizadas as mensagens do tipo *generic object oriented* substation (GOOSE), que também constitui um sistema de mensagens, baseada no conceito de IEDs e que permite o envio de mensagens com prioridade e diretamente ao ponto endereçado na mensagem (controle *peer-to-peer*) permitindo transmissão direta ao destino. Estas explicações também são compartilhadas em SEL.

5 CONCLUSÕES

Depois de realizar o estudo detalhado das diversas áreas da automação industrial empregada no equipamento, compressor alternativo para hidrogênio e acionado por motor elétrico síncrono brushless, é possível afirmar que foram mapeadas as diversas áreas da automação utilizadas para operacionalizar este equipamento, ou seja, foi possível realizar o levantamento dos dispositivos e tecnologias de automação utilizadas no controle e comunicação do sistema.

Em conjunto com este levantamento, foram identificadas duas relações, na primeira, entre as funcionalidades da automação do equipamento com as necessidades do processo (intertravamento) e a segunda, a relação existente entre os conhecimentos fundamentais de funcionamento de dispositivos, equipamentos e redes de comunicação com a aplicação prática desenvolvida diretamente em campo, atividades que tinham como metas a montagem física dos elementos, teste funcionais e operacionalidade completa dos sistemas sozinho e integrado com as diretrizes operacionais da unidade de processo.

Em relação às atividades desenvolvidas em campo – prática – dois momentos foram cruciais para o êxito no desenvolvimento desta monografia, o primeiro diz respeito à participação ativa e prática das atividades de campo durante as fases de projeto, construção e montagem das unidades de processo e dos diversos equipamentos constituintes destas unidades. Durante estas fases iniciais foi possível estabelecer o convívio direto com o projeto em si, pesquisar normas pertinentes aos diversos assuntos, não apenas relativos à área de automação, mas também nas áreas de elétrica e instrumentação.

Também, de modo muito significativo, foi a contribuição obtida durante as atividades de comissionamento, fase na qual são iniciados os primeiros testes elétricos (elementos de potência) e eletrônicos (dispositivos de comunicação, rede, controle e instrumentos). Nestas fases de testes é quando são realizadas verificações de conformidade de projeto e neste momento, conforme surgem demandas, são solucionadas falhas e resolvidas divergências, a medida que são realizadas alterações os registros destas novas modificações necessitam ser atualizadas no projeto para que futuras equipes de manutenção possam acessar documentos fidedignos com a realidade das instalações.

Ainda constituindo o primeiro momento, logo após a finalização das verificações de comissionamento, segue a fase transição, o condicionamento, e culminando na partida (*start-up*). Neste ponto, vale realizar um pequeno parêntese e destacar que as atividades de condicionamento podem acabar se miscigenando com a fase de comissionamento, dependendo da área ou disciplina.

A fase de partida, que justamente foi a mais intensa de todas até então, representa o ápice de todas as etapas anteriores, pois todos os esforços realizados até este ponto são colocados à prova. Durante esta fase o desenvolvimento das atividades não depende apenas de equipes bem definidas ou grupos especializados em determinada área, esta fase é o marco de início das operações conjuntas, onde as diversas equipes ou pessoas envolvidas devem trabalhar de modo sincronizado e contemplando um objetivo final único. É neste período que todas as tarefas são determinadas para terem início em determinado horário, mas sabe-se que não existe um horário para encerramento, principalmente se tratando de indústria de processo contínuo. Para resumir a importância desta etapa, o *start-up*, considero necessário realizar uma citação de NÓBREGA (2011), que diz:

A partida de uma máquina nova requer mais cuidados que uma mais antiga. De qualquer maneira a partida [...] é uma etapa de risco, a qual, se negligenciada, poderá por muito trabalho a perder. (NÓBREGA, 2011, p. 278)

Para resumir o objetivo final da denominada partida ou *start-up*, é a etapa de conclusão das fases estáticas (sem produção) ou então, também, pode ser considerada como a fase de início da operação, o que não implica em um primeiro momento a existência de produção efetiva, muito pelo contrário, é justamente durante esta fase que todos, ou quase todos, os equipamentos e sistemas são testados com variáveis reais de processo. Nesta fase, praticamente todo o tipo de produto gerado é descartado, pois antes de obter o produto final especificado e alinhado para tanque, é necessário finalizar a sequência de verificações pós partida, aguardar determinado período para que ocorra a estabilização da unidade (condição principalmente físico-química do processo e física para alguns equipamentos) e realizar ajustes ou reparos, caso necessário, para somente então permitir aos químicos a validação de especificação do produto produzido.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS E REFLEXÕES

O segundo momento de fundamental importância corresponde à instrução teórica obtida durante o curso de especialização nas diversas disciplinas cursadas. Cada uma destas disciplinas cursadas mostrou-se plenamente aplicável na prática, sendo que em muitas ocasiões os temas abordados durante as aulas foram assuntos discutidos em campo na semana anterior.

Durante as aulas práticas também foi possível estabelecer plena correlação com as aplicações práticas, pois em algumas ocasiões, os experimentos apresentados em sala de aula possuíam correspondente semelhante instalados em campo na unidade de processo. Visando facilitar as explicações sobre a aplicabilidade e utilização dos conhecimentos técnicos no desenvolvimento das atividades em campo, a seguir estão apresentadas por disciplinas as aplicações encontradas em campo – tanto nas unidades de processo quanto no equipamento analisado.

5.1.1 Instrumentação

São de grande importância os conhecimentos sobre os elementos que compõem o fluxograma, pois possibilita a leitura e interpretação destes diagramas e mesmo parecendo um conhecimento muito básico e simples, é de fundamental importância no entendimento de diagramas complexos de processo das unidades, da mesma forma como é primordial para realizar outras atividades ligadas direta ou indiretamente ao processo, elétrica, automação ou instrumentação.

Vale destacar que em campo, para realização de *loop tests*, montagens ou quaisquer outras verificações de rede ou instrumentos o fluxograma ou P&ID, atualizado com as últimas modificações de projeto, é algo necessário e fundamental para realização das atividades. Nas atividades de campo, a possibilidade de interação com alguns técnicos essencialmente de campo, os quais possuem vasta experiência no chamado ‘chão de fábrica’, foi muito enriquecedora no entendimento dos conceitos teóricos diretamente aplicados na prática.

Outra grande vantagem obtida com esta disciplina, foi o entendimento das fundamentações sobre o funcionamento de certos instrumentos, o que permite entender como empregar medidores de determinada grandeza, podem indiretamente realizar a medida de outra. Outra fundamentação teórica muito

importante foram os conceitos de faixa de medição e zero vivo que são amplamente empregados em instrumentos que utilizam sinais analógicos.

5.1.2 SDCD

Os controladores disponíveis no laboratório são do mesmo modelo e fabricante dos empregados no controle das unidades de processo de vivencia profissional, com a diferença que para as unidades industriais está no número de controladores, fontes de alimentação (ambos devem possuir redundância) e quantidade de cartões de I/Os.

Foi de extrema valia e importância as aulas práticas, possibilitando maior convívio com a ferramenta de desenvolvimento, além da complementação teórica que durante as aulas ajudou no entendimento. Foi possível vivenciar que a ferramenta (controlador e *software* de desenvolvimento) é extremamente poderosa e plenamente funcional para aplicações em processos contínuos e que necessitam de confiabilidade.

5.1.3 Sistemas Sequenciais com CLPs

É incontestável que para aplicações industriais que necessitam controle (PID), robustez, confiabilidade, repetição, integração em rede, facilidade para programação, além de outras muitas vantagens, o CLP é o equipamento destinado para tarefa, com isso, o entendimento dos fundamentos de funcionamento é primordial da mesma forma que a linguagem de programação amplamente utilizada, LADDER.

Deve ser relatada a importância desta linguagem de programação durante o desenvolvimento das atividades de comissionamento do equipamento abordado nesta monografia, pois todo o teste de intertravamento, que foi realizado em conjunto com a equipe do fabricante (estrangeiro), foi realizado com acompanhamento *on-line* em uma estação conectada em rede ao CLP. Em conversa com os engenheiros da empresa fabricante do equipamento, foi relatado que este procedimento e a utilização da linguagem LADDER (acompanhamento com *forces* quando necessário) é procedimento realizado por eles em todo o mundo. Em conversa com outra equipe de outro fabricante de equipamentos, para avaliar a

aplicabilidade da utilização desta linguagem de programação, a resposta obtida foi idêntica aos primeiros.

A linguagem realmente demonstrou ser muito prática, de rápida assimilação para programas novos e de fácil entendimento durante a compilação, tanto é que durante os testes foram necessárias modificações em campo no acionamento de cargas auxiliares e a nova verificação de funcionalidade foi realizada em minutos.

5.1.4 Acionamentos Elétricos

Auxiliou na melhorar a compreensão de diagramas esquemáticos, na aplicação das funções disponíveis em conversores de frequência e na elucidação e dúvidas quanto ao funcionamento de equipamentos acionados por meio de dispositivos de potência eletrônicos.

Quanto ao acionamento de cargas auxiliares, relativas ao compressor apresentado nesta monografia, e demais cargas de médio e pequeno porte presentes na unidade de processo, foi de grande ajuda em melhor a compreensão de alguns detalhes específicos de determinados esquemas de ligação.

No aspecto do equipamento central desta monografia, compressor acionado por motor elétrico síncrono com excitação *brushless*, foi importante para compreensão dos parâmetros construtivos e análise de gráficos.

5.1.5 Fundamentos de Controle

Inicialmente muito importante para revisar os conhecimentos matemáticos de controle e expandir, em alguns aspectos aprofundar, os fundamentos de controle. O mais interessante foi a possibilidade de expansão dos horizontes quanto à muitas informações de controle, para determinado equipamento, que ficam guardadas e escondidas nos manuais do fabricantes sem utilização na solução de dificuldades de funcionamento.

Foi possível evidenciar este fato quando durante uma pesquisa em um manual de equipamento, quando foram encontradas muitas informações de controle (malha de controle e função de transferência) que até então eram consideradas como segredos industriais, mas que não são devido à aplicabilidade destas informações nos ajustes de funcionamento do equipamento.

Em posse destas informações de controle é possível utilizar um programa de simulação, por exemplo, Matlab, para verificar o comportamento do sistema, quais os impactos na alteração de parâmetros físicos e definir formas mais eficientes de operação. Neste ponto vale destacar que a solução dos sistemas matemáticos referentes a um equipamento, representa o ajuste fino para uma condição operacional, porém, muitas vezes no chamado 'chão de fábrica' existe o paradigma do tipo 'não mexa no que está funcionando', mesmo que o funcionamento esteja muito aquém do esperado.

5.1.6 *Foundation Fieldbus*

Tecnologia muito atual e representa aplicação plena e direta nas unidades de processo referenciadas nesta monografia. Os conhecimentos adquiridos facilitaram o entendimento das funcionalidade e das conexões físicas realizadas em campo, pois com o entendimento da forma funcional deste tipo de rede ficou mais claro a separação entre a aplicação das diversas outras tecnologias existentes em uma unidade processo.

5.1.7 Sintonia de Controladores

Os conhecimentos adquiridos permitiram identificar diversas malhas de controle (proporcional, integral, derivativa e configurações mistas), identificar variáveis a serem controladas para garantir estabilidade do sistema e conhecer técnicas para obter a função de transferência de um malha contendo elementos com características desconhecidas.

Possibilitou o entendimento das diversas pequenas malhas que compõem uma unidade de processo, de maneira que estabelecido o conhecimento das malhas formadoras do processo, foi mais fácil compreender o conjunto global formado pelo funcionamento conjunto das diversas malhas.

5.1.8 Redes

É inegável que a grande maioria das aplicações desenvolvidas atualmente possuem interface de rede e que grande parte das instalações são conectadas em rede ou estão migrando para este tipo de arquitetura integrada. O embasamento teórico foi fundamental para o melhor entendimento das formas de comunicação

entre os diversos sistemas e em conjunto com os conhecimentos de *Foundation Fieldbus* e Sintonia de Controladores foi possível entender a integração realizada entre os diversos dispositivos de automação.

No caso apresentado nesta monografia, o assunto redes é plenamente aplicável, pois os sistemas de controle das unidades (por exemplo, SDCDs) estão interligados em rede, da mesma forma que os controladores de equipamentos individuais, no caso do conjunto de compressão, também estão interligados.

5.1.9 Metodologia de Pesquisa

Os conhecimentos apresentados permitiram a elaboração desta monografia seguindo os padrões estabelecidos pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), além de representar a adequação aos moldes e requisitos científicos para desenvolvimento de pesquisa.

Também possibilitou o esclarecimento de diversas dúvidas latentes e permitiu a desmistificação de alguns paradigmas sobre a forma do desenvolvimento de pesquisas científicas. Outro fato de relevância contribuição foi quanto ao emprego do melhor tipo de pesquisa de acordo com os dados e conteúdos disponíveis, visando atender o tema proposto.

5.1.10 Tópicos Especiais

Muitos dos temas abordados nas diversas apresentações tiveram aplicação técnica, profissional e com conteúdo muito denso e atual. Apresentou a possibilidade de aprendizado com a experiência do palestrante, que muitas vezes enriquecia ainda mais o conteúdo técnico com exemplos enfrentados em campo.

Também devem ter destaque especial as palestras dos profissionais com atuação nacional e internacional e que compartilharam a experiência de longos anos de vida profissional, procuraram estabelecer um panorama do cenário profissional atual dos engenheiros nas grandes companhias e no desenvolvimento do país como das próprias empresas e quais serão as tendências, perspectivas e oportunidade que podem surgir para os próximos anos.

5.1.11 Considerações Finais

Mesmo já tendo realizadas inúmeras as considerações que durante o desenvolvimento desta monografia, ainda cabe destacar o ponto realmente fundamental para que fosse obtido êxito neste desenvolvimento, a integração realizada entre todos os conteúdos teóricos com a oportunidade prática de vivenciar, ou melhor, estar imerso, dentro de um projeto tão complexo, grande e desafiador que foi a construção, comissionamento e *start-up* das diversas unidades de refino.

Com absoluta certeza o sucesso final de uma empreitada dessas não é obtido sozinho, apenas o conjunto de pessoas extremamente capacitadas, preparadas, com disposição e força de vontade consegue seguir em diante e chegar até o heróico final.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Pedro Urbano de; ALEXANDRIA, Auzuir Ripardo de. **‘Redes industriais: aplicações em sistemas de controle distribuído : protocolos industriais, aplicações SCADA’**. 2ª ed. ver. e ampl. São Paulo: Ensino Profissional, 2009.

Asea Brown Boveri – ABB¹. **‘System 800xA AC 800m Control and I/O Overview’**. Zurich, Switzerland, 2012. Disponível em: < [http://www05.abb.com/global/scot/scot343.nsf/veritydisplay/f0ee41263daf4cbfc12579df0054d998/\\$file/3BSE047351_F_en_System_800xA_5.1_AC_800M_Control_and_I_O_Overview.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot343.nsf/veritydisplay/f0ee41263daf4cbfc12579df0054d998/$file/3BSE047351_F_en_System_800xA_5.1_AC_800M_Control_and_I_O_Overview.pdf) >. Acesso em: 13 ago. 2012.

Asea Brown Boveri – ABB². **‘System 800xA System Introduction’ – Reaching new levels of productivity with System 800xA..** Zurich, Switzerland, 2012. Disponível em: < [http://www05.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/897988864966cdedc12579df0054dce6/\\$file/3BUS095072_L_C_en_System_800xA_System_Introduction.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot296.nsf/veritydisplay/897988864966cdedc12579df0054dce6/$file/3BUS095072_L_C_en_System_800xA_System_Introduction.pdf)>. Acesso em: 13 ago. 2012.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – **API Std 546**. Brushless Synchronous Machines – 500 kV and Larger. Washington, D.C., United States of America, 2008.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – **API Std 618**. Reciprocating Compressors for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services. Washington, D.C., United States of America, 2007.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS International. **ASTM – D613**: Standard Test for Cetane Number of Diesel Fuel Oil. West Conshohocken, PA, United States of America, 2000.

ANP¹ – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: **Refino e Processamento do Gás Natural**. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/?pg=15699&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1339956068613> >. Acesso em: 12 abr. 2012.

ANP² – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: **Esquema de Produção no Refino de Petróleo**. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/?pg=7854&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1339964441626> >. Acesso em: 13 abr. 2012.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – 2012**. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/?pg=60983> >. Acesso em: 13 abr. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60079-0**: Atmosferas explosivas Parte 0: Equipamentos – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60079-2**: Atmosferas explosivas Parte 2: Proteção de equipamentos por invólucro pressurizado. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60079-10-1**: Atmosferas explosivas Parte 10-1: Classificação de áreas – atmosferas explosivas de gás. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60079-14**: Atmosferas explosivas Parte 14: Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60529**: Graus de Proteção para invólucros de equipamentos elétricos (Código IP). Rio de Janeiro, 2005.

AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de potência**. São Paulo: Prentice Hall, 2000.

BARBI, Ivo. **Teoria fundamental do motor de indução**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1985.

BEGA, Egídio Alberto (organizador) *et al.*. **INSTRUMENTAÇÃO INDUSTRIAL**. Rio de Janeiro: Interciência:IBP (Instituto Brasileiro de Petróleo), 2003.

BRASIL. Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. **Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira**. Presidência da República, Casa Civil, Brasília, DF, 13 de janeiro de 2005. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm >. Acesso em: 25 abr. 2012.

BRASIL. Resolução ANP nº 4, de 02 de fevereiro de 2010. **Estabelecimento do percentual mínimo, em volume, obrigatório de 5% de biodiesel ao óleo diesel**. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo, Brasília, DF, 02 de fevereiro de 2010. Disponível em: <<http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/res> >

olucoes_anp/2010/fevereiro/ranp%204%20-202010.xml?f=templates\$fn=document-frame.htm\$3.0\$q=\$x>. Acesso em: 25 abr. 2012.

BRASIL. Resolução ANP nº 42, de 16 de dezembro de 2009. **Especificações do óleo diesel de uso rodoviário**. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo, Brasília, DF, DOU 17.12.2009. Disponível em: < http://nxt.anp.gov.br/NXT/gateway.dll/leg/resolucoes_anp/2009/dezembro/ranp%2042%20-202009.xml>. Acesso em: 28 jun. 2012.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 315, de 29 de outubro de 2002. **Instituição das etapas do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE**. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, Brasília, DF, 29 de outubro de 2002. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=337>>. Acesso em: 22 abr. 2012.

BRASIL, Nilo Indio do; ARAÚJO, Maria Adelina Santos; SOUSA, Elisabeth Cristina Molina de. **Processamento de Gás: petróleo e seus derivados, processamento primário, processos de refino, petroquímica, meio ambiente**. – [Reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CALLARI, Roberto. **Produção de óleo diesel a partir do gás natural: estudo da viabilidade técnico-econômica para a instalação de uma planta GL (Gas-to-Liquids) no Brasil**. 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Engenharia) – EP / FEA / IEE / IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CHEVRON¹ U.S.A. INC. (Chevron). **Diesel Fuels Technical Review**. California, United States of America, Chevron [2012]. Disponível em: <http://www.chevronwithtechron.com/products/documents/Diesel_Fuel_Tech_Review.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2012.

CHEVRON² U.S.A. INC. (Chevron). **Motor Gasolines Technical Review**. California, United States of America, Chevron [2012]. Disponível em: < http://www.chevronwithtechron.com/products/documents/69083_MotorGas_Tech_Review.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2012.

CLARK, Harrison K.. **Proteção de Sistemas Elétricos de potência**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria: Eletrobrás, 1979.

COMER, Douglas E.. **Redes de computadores e Internet**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

Confab Industrial S.A. (Tenaris S.A. Internacional) – catálogo '**Petroleum, Petrochemical and Gas**'. Pindamonhangaba, São Paulo. Disponível em: <<http://www.tenaris.com/shared/documents/files/CB76.pdf>>. Acesso em: 23 maio 2012.

COSTA, Ênio Cruz da. **Compressores**. São Paulo: Edgard Blücher, 1978.

CRUZ, Flávio Eduardo da. **Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo: avaliação exérgica e custo de produção**. 2010. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010 – edição revisada.

Dresser-Rand Group Inc. . '**Process Reciprocating Compressors**'. 2009. Houston, Texas, United States of America. Disponível em:< <http://www.dresser-rand.com/literature/recip/85170-Process-Recip.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2012.

Eletromotores WEG¹ S.A. – artigo '**Motores Síncronos**'. Jaraguá do Sul: WEG, [19--]. Disponível em: <<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motor-sincrono-sem-escovas11568846-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2011.

Eletromotores WEG² S.A. – catálogo '**Motores Síncronos**'. Jaraguá do Sul: WEG, [19--]. Disponível em: < <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motor-sincrono-644-catalogo-portugues-br.pdf> >. Acesso em: 15 nov. 2011.

Eletromotores WEG³ S.A. – curso '**Motores elétricos assíncronos de alta tensão**'. Jaraguá do Sul: WEG, [19--]. Disponível em: < <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-curso-motores-eletricos-assincrono-de-alta-tensao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2012.

Eletromotores WEG⁴ SA. – catálogo '**Motores Síncrono – soluções industriais**'. Jaraguá do Sul: WEG, [20--]. Disponível em: < <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motor-sincrono-5005369-catalogo-portugues-br.pdf> >. Acesso em: 22 fev. 2012.

Eletromotores WEG⁵ SA. – catálogo '**Motores Síncrono – Linha S – sem escovas - Horizontais**'. Jaraguá do Sul: WEG, 2012. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motor-sincrono-sem-escovas-11568846-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2012.

Elliot Group – Elliot¹. '**Axial Compressor Upgrades**'. Jeannette, Pennsylvania, United States of America. 2010. Disponível em: < <http://www.elliott-turbo.com/Files/Admin/Literature/Elliott%20Literature%202012/Axial%20Compressor%20Upgrades.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

Elliot Group – Elliot². '**Multi-Stage Centrifugal Compressors**'. Jeannette, Pennsylvania, United States of America. 2010. Disponível em: < <http://www.elliott-turbo.com/Files/Admin/Literature/Elliott%20Literature%202012/compressor%20bulletin.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

Expo Technologies Ltd.- Expo¹. '**D758 MiniPurge Manual ML 434**'. 2011. Surrey, United Kingdom. Disponível em: < <http://www.expoworldwide.com/purge-pressurization/motor-purge/d758/>>. Acesso em: 21 jun. 2012.

Expo Technologies Ltd. – Expo². '**D771 MiniPurge Manual ML 435**'. 2011. Surrey, United Kingdom. Disponível em: < <http://www.expoworldwide.com/purge-pressurization/motor-purge/d771/>>. Acesso em: 22 jun. 2012.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles Jr.; KUSKO, Alexandre. **Máquinas elétricas – conversão eletromecânica da energia – processos, dispositivos e sistemas**. Rio de Janeiro: Makron Books, 1975.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles Jr.; UMANS, Stephen D. . **Máquinas elétricas – com introdução à eletrônica de potência**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GEORGINI, Marcelo. **Automação Aplicada – Descrição e Implementação de Sistemas Seqüenciais com PLCs**. São Paulo: Érica, 2000.

GOMES, Daniel Ribeiro. **Estudos de solicitações elétricas em pontes retificadoras rotativas para excita trizes 'brushless'**. 2010. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010 – edição revisada.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2010.

Grameyer Equipamentos Eletrônicos Ltda. '**Regulador de Fator de Potência**'. Schroeder: Grameyer, 2007. Disponível em < <http://www.grameyer.com.br/2009/script/download/GRMP03GIP.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

HELFRICK, Albert D.; COOPER, William D. . '**Instrumentação Eletrônica Moderna e Técnicas de Medição**'. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1994.

Hoerbiger¹ Holding AG. '**Compressor valves – Engineered for better efficiency and reliability**'. Zug, Switzerland. Disponível em: < http://www.hoerbiger.com/upload/file/valves_overview_service_en.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2012.

Hoerbiger² Holding AG. '**Experience real capacity control and energy saving with HydroCOM**'. Zug, Switzerland. Disponível em: < http://www.hoerbiger.com/upload/file/hydrocom_en.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2012.

HOUAISS, Antônio. VILLAR, Mauro de Sales. **Dicionário Houaiss da Língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

Honeywell International Inc. – Honeywell. '**Honeywell Basic Controller - Specification and Technical Data**'. 1985. Disponível em:< <http://hpsregional.honeywell.com/NR/rdonlyres/7384482F-1BC4-4178-8DDC-D10143B14349/46617/CB1002.pdf>>. Acesso em: 7 ago. 2012.

HOWDEN THOMASSEN COMPRESSORS. '**The Howden Thomassen FFP™ – Oil free and virtually friction- free: the piston that flows on a film of process gas**'. Rheden, The Netherlands. 2012. Disponível em: < <http://www.thomassen.com/uploads/fm/downloads/FFP.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2012.

HOWDEN THOMASSEN COMPRESSORS. '**High Power, Heavy-Duty Reciprocating Compressors**'. Rheden, The Netherlands. 2011. Disponível em: < http://www.thomassen.com/uploads/fm/downloads/HTC_Recip_Comp_brochure.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2012.

IBRAHIM, Dogan. ***Microcontroller Based Applied Digital Control***. West Sussex, England: John Wiley and Sons Ltd, 2006.

IGARASHI, Gilberto. **Estudo da IEC 61850 e o seu impacto no sistema de automação de subestações**. 2007. 67f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – **IEC TR 61850-1**. Technical Report – Communication networks and systems in substations – Part 1: Introduction and overview. Geneva, Switzerland, 2003.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - **IEEE Std C37.2**: Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms and Contact Designations. New York, United States of America, 2008.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - **IEEE Std 141**: Recommended Practice for Electrical Power Distribution for Industrial Plants. New York, United States of America, 1993.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - **IEEE Std 241**: Recommended Practice for Electric Power Systems in Commercial Buildings. New York, United States of America, 1993.

INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION – ISA – **ISA-5.1**: Instrumentation Symbols and Identification. Research Triangle Park, NC, United States of America, 2009.

Invensys Inc. '**Tricon**'. Plano, Texas, United States of America, 2012. Disponível em: < http://iom.invensys.com/BR/Pages/triconex_tricon.aspx>. Acesso em: 08 jul. 2012.

JORDÃO, Dácio de Miranda. **Manual de instalações elétricas em indústrias químicas, petroquímicas e de petróleo**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

KAKUDA, Cláudio Massaki. **TCP/IP sobre LANE e o seu impacto prático na Rede Local**. 2006. 83f. Dissertação de Mestrado – Física Computacional do Instituto de Física de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

LASCALA, Thelma Lopes da Silva. **Externalidades da substituição do diesel pelo etanol no transporte público urbano da região metropolitana de São Paulo**. 2011. 269 f. Tese de Doutorado – Programa de Pós Graduação em Energia – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LINDE AG – The Linde Group. *Hydrogen Recovery by Pressure Swing Adsorption*, Munich, Germany, [2012]. Disponível em: < http://www.linde-engineering.com.cn/en/process_plants/adsorption_plants/hydrogen_recovery_pressure_swing_adsorption>. Acesso em: 23 maio 2012.

MAMEDE¹, João Filho. **Instalações elétricas industriais**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MAMEDE², João Filho. **Manual de equipamentos elétricos, volume 1**. Rio de Janeiro: LTC, 1993.

MARIANO, Jacqueline Barboza. **Impactos Ambientais do refino de petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

MARQUES, Luiz Felipe; LOPES, Elisa; LEITÓLES, Fernanda. Repar segura fornecimento e deixa parte do Paraná sem diesel. **Gazeta do Povo**, Curitiba, 09 de março de 2012. Economia, p. 9.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de Automação Industrial**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 49: Hazardous Chemical Data**. Miami, FL, United States of America, 1991.

NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION¹. Washington, DC. **Hydrogen Production Overview**. Disponível em: <http://www.fchea.org/core/import/PDFs/factsheets/Hydrogen_Production_From_Coal_NEW.pdf>. Acesso em: 2 maio 2012.

NATIONAL HYDROGEN ASSOCIATION². Washington, DC. **Renewable Hydrogen Production Using Eletrolysis**. Disponível em: <http://www.fchea.org/core/import/PDFs/factsheets/Renewable_Hydrogen_Production_Using_Electrolysis_NEW.pdf>. Acesso em: maio 2012.

NEIVA, Jucy. **Conheça o petróleo**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Expressão e Cultura, 1993.

NÓBREGA, Paulo Roberto Leite. **Compressores: manutenção de compressores alternativos e centrífugos**. Rio de Janeiro: Synergia: IBP, 2011.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 2000.

OLIVA, Olney Moraes; MATTOS, André Guilherme; BABUGIA, Ailton Fernando. **Processos especiais: hidrefino, tratamento de coque, nafta craqueada e instáveis para produção de diesel – unidades de geração de hidrogênio (UGH e PSA)**. Rio de Janeiro: PETROBRAS ABAST, 2010.

Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras: **Quem somos : Nossa História**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/nossa-historia/>>. Acesso em: 2 maio 2012.

Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras Distribuidora – BR. **Diesel S-50 – Manual técnico do produto**. Rio de Janeiro – RJ. Disponível em: <http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/4aded20049872f088c6e8f9bc7540b9f/Diesel+S-50_Manual.pdf?MOD=AJPERES>. Acesso em: 5 maio 2012.

Prysmian Energia Cabos e Sistemas do Brasil – Prysmian. 2012. **‘Soluções Inovadoras para Transmissão e distribuição de energia’**. Disponível em: <http://www.prysmian.com.br/about-us/Knowledgex_technologyx_solutions/innovative_solutions.html>. Acesso em: 11 jul. 2012.

Rockwell Automation Inc. **‘Guia de Seleção do Sistema de Controladores Programáveis CLP-5’**. Milwaukee, WI, United States of America. 2004. Disponível em: <<http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sg/1785-sg001-pt-p.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2012.

SOUSA, Rafael Vieira de. **CAN (Controller Area network): uma abordagem para automação e controle na área agrícola**. 2002. 94p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2004.

UOP LLC – Universal Oil Products a Honeywell International Inc.. *UOP’s Plybed PSA stees the industry for H₂ purification and recovery*, [2011]. Disponível em: <http://www.uop.com/products/equipment/hydrogen_separation/pressure_swing_adso_rption>. Acesso em: 9 fev. 2012.

Schweitzer Engineering Laboratories, Brasil Ltda. – SEL. **‘Questões Relacionadas com Aplicação de Rede Ethernet em Subestações’**. Campinas: SEL. Disponível em: <http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/615.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2012.

YAMAGUCHI, Marcos Yukio. **Sincronização das bases de tempo de CLPs distribuídos numa rede de automação de processo industrial**. 2006. 142p. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. São Paulo, 2006.