

Universidade Federal do Ceará
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



André Pimentel Moreira

Controle de Vazão de Biogás com Baixa Pressão para
Produção Descentralizada de Eletricidade

Fortaleza
Outubro de 2011

André Pimentel Moreira

**Controle de Vazão de Biogás com Baixa Pressão para
Produção Descentralizada de Eletricidade**

Dissertação submetida à Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Paulo Cesar M. de Carvalho, Dr.

Fortaleza, Outubro de 2011.

Controle de Vazão de Biogás com Baixa Pressão para Produção Descentralizada de Eletricidade

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Energias Renováveis e Sistemas Elétricos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

Prof. Paulo Cesar Marques de Carvalho, Dr.
Orientador

Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Paulo Cesar Marques de Carvalho, Dr.
Presidente

Alberto Willian Mascarenhas, Dr.

Ricardo Silva Thé Pontes, Dr.

Sérgio Daher, Dr.

Dedicatória

Dedico este trabalho a toda minha família, em especial, aos meus pais José Almir (in memorium) e Ernestina, aos meus irmãos Andréia e Júnior, que sempre estiveram ao meu lado me incentivando a transpor todos os desafios pessoais e profissionais, aos meus filhos Sabrina e Matheus por todo amor e carinho, aos meus tios José Otoni (Tuti), Ernesto Pimentel (Tuca), Roberto e Conceição pelos conselhos e ensinamentos.

Agradecimentos

Agradecimento especial ao meu orientador Professor Paulo Carvalho e a Professora Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis, pela amizade, dedicação, atenção, paciência e apoio durante a elaboração deste trabalho.

Ao Banco do Nordeste pelo apoio financeiro para a instalação da Planta de Produção de Biogás do Laboratório de Energias Alternativas da UFC.

À Recolast Ambiental pela doação do biodigestor tubular.

À Lubnor (Petrobrás) por realizar a análise química do biogás produzido no Laboratório de Energias Alternativas da UFC.

A todos os colegas do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do Ceará - SENAI-CE, especial os amigos Tarcisio Bastos e Mônica Machado, que sempre acreditaram no meu trabalho.

Aos colegas do Departamento de Indústria do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Geraldo Ramalho, José Renato, Cláudio Sá, Evaldo Mota, Clayton Ricarte e Agamenon Gois, pelo incentivo e colaboração.

A minha namorada Danielle e aos amigos Nuno Monteiro e Eduardo Macário, que com amor, carinho, dedicação, paciência sempre estiveram ao meu lado.

Aos amigos da Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará - UFC, Manuel Rangel, Sigefredo, Luis Carlos pelo companheirismo e colaboração nas revisões e sugestões de melhoria desse trabalho.

Moreira, A. P. "Controle de Vazão de Biogás com Baixa Pressão para Produção Descentralizada de Eletricidade". Universidade Federal do Ceará - UFC, 2011, 153p.

A presente dissertação propõe a implementação de um sistema de aquisição de dados, controle e monitoramento de uma planta de geração de energia elétrica acionada por biogás. Foi realizado o estudo experimental das estratégias de modelagem, identificação e controle aplicado ao controle de vazão da planta de biogás do Laboratório de Energias Alternativas - LEA da Universidade Federal do Ceará - UFC. Foi utilizado e testado para o controle de vazão de biogás o controlador PI paralelo, além de realizar a comparação com o controle existente (controle centrífugo) do conjunto motor/gerador. Para verificar a resposta do gerador movido a biogás, foi inserido uma carga correspondente a 60% da potência nominal. O sistema proposto reduziu a intervenção humana no ajuste de vazão da válvula de expansão. Os resultados demonstraram que o tempo de resposta para estabilidade após a introdução do controlador PI ao controlador original permitiu a redução do tempo de resposta para estabilidade em no mínimo 20% mostrando uma resposta satisfatória e boa estabilidade para a transição da gasolina para o biogás, com amplitude de 10 Hz e 8 segundos para estabilização do sistema sem carga. A ação foi considerada viável para automatizar o processo de partida do conjunto motor/gerador.

Palavras-chave: Biogás. Biodigestores. Algoritmo PI. Controle de Vazão. Sistema de Monitoramento.

Moreira, A. P. "Low Pressure Biogas Flow Control for Decentralized Electricity Production". Federal University of Ceará - UFC, 2011, 153p.

The present dissertation proposes the implementation of a data acquisition system, control and monitoring of a electricity generation plant powered by biogas. The experimental study of the modelling strategies, identification and control was done applied to flow control of the biogas plant of the Renewable Energy Laboratory - LEA at the Federal University of Ceará - UFC. To control the biogas flow a parallel PI controller was used and tested, and the controller was used to perform the comparison with the existing control (centrifugal control) of the gen-set. To check the response of the gen-set powered by biogas, a load corresponding of 60% of the nominal power was used. The proposed system reduced the human intervention in flow setting of the expansion valve. The results showed that the stability response time after the introduction of the PI controller to the original controller allowed the reduction of the response time for at least 20% showing a satisfactory response and a stability for the transition from gasoline to biogas, with 10 Hz amplitude and 8 seconds for the system stabilization with load. This action was considered feasible to automate the process of starting up of the gen-set.

Keywords: Biogas. Digesters. PI algorithm. Control Flow. Monitoring System.

Sumário

Resumo	v
Lista de Tabelas	xi
Lista de Figuras	xii
Lista de Abreviaturas	xv
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.1.1 Sistemas Centralizados de Geração Elétrica no Brasil	3
1.1.2 Fontes Alternativas e Sistemas Descentralizados	7
1.1.2.1 Panorama Internacional	7
1.1.2.2 Panorama no Brasil	10
1.1.3 Dificuldades na Geração Descentralizada	13
1.2 Motivação	14
1.2.1 Redução da Poluição Ambiental	14
1.2.2 Custos de Manutenção e Produção de Eletricidade	15
1.2.3 Disponibilidade de Biomassa no Brasil	16
1.2.4 Considerações	18
1.3 Metodologia	19
1.4 Objetivos	19
1.5 Estrutura da Dissertação	20
2 Biodigestores	22
2.1 Contextualização	22
2.1.1 Biomassa	24
2.1.2 Biodigestor	25

2.1.3	Modelos de Biodigestores	28
2.1.3.1	Modelo Indiano	29
2.1.3.2	Modelo Chinês	30
2.1.3.3	Modelo Tubular Solar	33
2.1.3.4	Matéria-Prima do Biodigestor	35
2.1.4	Biogás	37
2.1.4.1	Panorama do Consumo da Biomassa/Biogás	40
2.1.4.2	Perspectivas para o Uso de Biodigestores	42
3	Identificação e Métodos de Controle de Sistemas	44
3.1	Controle	44
3.1.1	Formas de Controle	45
3.1.1.1	Malha de Controle <i>Feedback</i>	46
3.1.1.2	Malha de Controle <i>Feedforward</i>	48
3.1.1.3	Controladores <i>Feedback ON-OFF</i>	48
3.2	Identificação de Sistemas	50
3.3	Controlador Centrífugo	50
3.4	Algoritmo de Controle PID	52
3.4.1	Variações do Controle PID	55
3.4.1.1	PID Ideal	55
3.4.1.2	PID Paralelo	56
3.5	Sintonia Para Controladores PID	57
3.6	Controle de Vazão	59
3.6.1	Modelamento da Equação de Bernoulli	60
3.7	Controlador Lógico Programável	64
3.7.1	Estrutura do CLP	65
3.7.2	Memória do CLP	65
3.7.3	Linguagens de Programação	66
3.7.3.1	Norma IEC 61131-3	67
3.7.4	Interfaces de Comunicação dos CLP	68
3.7.4.1	Módulos de Entradas e Saídas Digitais	68
3.7.4.2	Módulos de Entradas e Saídas Analógicas	70
3.7.4.3	Módulo PID	71
3.7.4.4	Módulos de Interface de Rede	73
3.7.5	Protocolos de comunicação	77

3.8	<i>Softwares</i> Supervisórios	79
3.8.1	Supervisórios <i>SCADA</i>	82
3.8.2	Estimadores de Mínimos Quadrados	83
3.8.3	Estimadores de Mínimos Quadrados Recursivo	84
4	Planta de Produção de Biogás e Eletricidade	87
4.1	Planta de Biogás	87
4.2	Conjunto Motor/Gerador	90
4.3	Controlador Lógico Programável	91
4.4	Atuador	91
4.5	Sensores	93
4.5.1	Sensor de Temperatura	93
4.5.2	Sensores de Pressão	94
4.5.3	Sensores de Vazão	95
4.6	Biodigestor	96
4.6.1	Etapas de Instalação do Biodigestor	96
4.6.2	Carga do Biodigestor	101
4.7	Controle e Monitoramento da Planta de Biogás	104
4.8	Dinâmica do Sistema de Controle	109
5	Ensaio e Resultados	111
5.1	Ensaio	111
5.1.1	Análise do Biogás do LEA	111
5.1.2	Dinâmica das Variáveis do Processo	111
5.1.3	Dinâmica de Partida do Conjunto Motor/Gerador	115
5.1.4	Controlador Centrífugo com Gasolina	115
5.1.5	Controlador Centrífugo com Biogás	117
5.1.6	Controlador Centrífugo e PI com Biogás	119
5.1.6.1	Definição dos parâmetros PI	119
5.1.7	Controlador PI com Biogás	123
6	Conclusões	125
6.1	Trabalhos Futuros	127
	Apêndice	129

A Projetos e Artigos Publicados	129
Referências Bibliográficas	130

Lista de Tabelas

1.1	Unidades Geradoras do Nordeste (16).	6
2.1	Proporção de água na matéria seca para biodigestores (56).	35
2.2	Estimativa de Quantidade x Fontes (55).	36
2.3	Equivalência do biogás (0-60% de CH_4) (48).	38
3.1	Sintonia de Ziegler e Nichols para degrau unitário (64).	58
3.2	Sintonia de Ziegler e Nichols baseada em K_{cr} e P_{cr} (64).	60
3.3	Exemplo de Espaços de Memória dos CLP's (84).	66
3.4	Especificação da comunicação serial RS232 (83).	76
3.5	Especificação da comunicação serial RS422 (83).	76
3.6	Especificação da comunicação serial RS485 (83).	77
3.7	Principais características entre os níveis de rede (83).	79
4.1	Características do conjunto motor/gerador B4T-5000 Bio (90).	91
4.2	Características da válvula Modelo TR24-SR-T US	92
4.3	Características do sensor de temperatura TN2531	93
4.4	Características do sensor de pressão PG2457	94
4.5	Características do sensor de vazão SD5000	96
4.6	Cálculo do volume de carga (49).	102
5.1	Sistema sem Aplicação das Cargas na Partida com Gasolina.	116
5.2	Sistema com Aplicação das Cargas com Gasolina.	117
5.3	Sistema controlador centrífugo com biogás com ajuste manual.	118
5.4	Sistema com Aplicação das Cargas com biogás.	118
5.5	Aplicação das Cargas com Controladores Simultâneos.	123

Lista de Figuras

1.1	Mapa de integração eletroenergética do Brasil (22).	12
2.1	Ciclo da biomassa e biodigestor (49).	27
2.2	Biodigestor modelo indiano (48).	30
2.3	Biodigestor modelo chinês (48).	32
2.4	Biodigestor Modelo Tubular Solar (55).	34
2.5	Modelo simplificado de obtenção de biogás (56).	39
2.6	Perfil da matriz energética brasileira em 2009 (61).	41
3.1	Controle de <i>feedback</i> em um processo (adaptado de (66)).	47
3.2	Controle <i>feedforward</i> em um processo (adaptado de (66)).	49
3.3	Controle de <i>feedback ON-OFF</i> (66).	49
3.4	Sistema de Controle de Velocidade (64).	51
3.5	Esquema do PID ISA (adaptado de (78)).	56
3.6	Esquema do PID Paralelo (adaptado de (78)).	56
3.7	Resposta ao degrau unitário em malha aberta (64).	58
3.8	Curva de resposta em forma S (64).	58
3.9	Sistema de malha fechada com controlador proporcional (64)..	59
3.10	Oscilação sustentada com período P_{cr} (64).	59
3.11	Interface de Entradas e Saídas (84).	69
3.12	Configuração de Entrada NPN (83).	70
3.13	Configuração de Entrada PNP (83).	70
3.14	Diagrama PID com raiz quadrada (83).	72
3.15	Rede de comunicação (83).	74
3.16	Níveis de Rede (83).	78
4.1	Integração e produtos dos centros de pesquisa.	88

4.2	Unidade de controle de vazão da planta de biogás.	89
4.3	Motor/Gerador modelo B4T-5000	90
4.4	Controlador lógico programável e expansões.	92
4.5	Válvula proporcional de controle de vazão.	92
4.6	Sensor de temperatura TN2531	93
4.7	Sensor de pressão PG2457	94
4.8	Sensor de vazão SD 5000	95
4.9	Localização do biodigestor no LEA - UFC	97
4.10	Dimensões do biodigestor modelo 4500 (em metros).	97
4.11	Sucatas encontradas na escavação	98
4.12	Trincheira para instalação do biodigestor	98
4.13	Trincheira modelada com as placas pré-moldadas de cimento	99
4.14	Instalação da manta geotextil.	99
4.15	Teste de vazamentos do biodigestor	100
4.16	Biodigestor semi enterrado	100
4.17	Caixa de entrada do biodigestor.	101
4.18	Caixa de saída do biodigestor.	101
4.19	Borbulhador da planta de biogás do LEA.	102
4.20	Queimador da planta de biogás do LEA.	102
4.21	Abastecimento da caixa de entrada	102
4.22	Transporte do esterco.	103
4.23	Animais confinados da Capril Said.	103
4.24	Biodigestor com biogás.	104
4.25	Sistema de monitoramento da planta de biogás.	105
4.26	Tela de abertura/identificação do usuário.	106
4.27	Tela de menu.	106
4.28	Tela do motor e gerador.	107
4.29	Tela de relatório de frequência.	107
4.30	Tela de pressão/vazão.	108
4.31	Tela de vazão de gás.	108
4.32	Tela de acionamento de cargas.	109
4.33	Instalação do sensor indutivo.	110
5.1	Composição do biogás - LEA.	112
5.2	Composição do biogás, conforme (41).	112

5.3	Curva de resposta pressão e vazão.	113
5.4	Curva de resposta frequência e pressão.	113
5.5	Curva de resposta temperatura e vazão.	113
5.6	Curva de consumo (m ³) do motor/gerador	114
5.7	Curva de frequência sem a aplicação da carga	115
5.8	Curva de frequência do controlador centrífugo com gasolina . .	116
5.9	Curva da frequência com ajuste manual do biogás.	117
5.10	Curva de frequência do controlador centrífugo com biogás. . .	119
5.11	Curva de resposta frequência e vazão.	120
5.12	Curva da vazão real e vazão estimada pelo MQR.	120
5.13	PID paralelo <i>Matlab-Simulink</i> [®]	121
5.14	Resposta do PID paralelo ao degrau.	121
5.15	Parametrização do bloco PID paralelo.	122
5.16	Curva de frequência dos controladores simultâneos com biogás.	122
5.17	Curva de frequência do controlador PI com biogás.	124

Lista de Abreviaturas

LEA	<i>Laboratório de Energias Alternativas</i>
PCH	<i>Pequenas Centrais Hidrelétricas</i>
CGH	<i>Centrais Geradoras Hidrelétricas</i>
UNICA	<i>União da Indústria de Cana-de-Açúcar</i>
SINERGIA	<i>Sindicato dos Eletricitários</i>
ST	<i>Sólidos Totais</i>
SV	<i>Sólidos Voláteis</i>
DQO	<i>Demanda Química de Oxigênio</i>
IPqM	<i>Instituto de Pesquisas da Marinha do Brasil</i>
CEAM	<i>Companhia Energética do Amazonas</i>
ENE	<i>Estratégia Nacional para Energia</i>
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
IICA	<i>Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura</i>
REN21	<i>Renewable Energy and Policy Network for the 21st</i>
ESALQ	<i>Escola Superior Agrícola Luiz Queiroz</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MMI	<i>Man Machine Interface</i>
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
MIS	<i>Memória Intermediária de Saída</i>
CLP	<i>Controlador Lógico Programável</i>
ISA	<i>Industry Standard Architecture</i>
PID	<i>Proporcional-Integral-Derivativo</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

A disponibilidade de energia elétrica é bastante desigual no mundo. A grande maioria da população mundial vive em áreas onde o atendimento é precário. Parte dela habita em áreas isoladas onde o atendimento por meio da extensão da rede convencional é impossível por motivos naturais, como distância, dificuldade de acesso, localização dentro de reservas ambientais, áreas insulares ou montanhosas, clima rigoroso (1).

O setor elétrico nacional apresenta perfil bastante peculiar e distinto, pois é predominado pela geração hidroelétrica, constituída de usinas e reservatórios de grande porte. As usinas estão localizadas em diferentes bacias hidrográficas, entretanto, há uma forte interdependência entre elas. Em uma mesma bacia há usinas hidroelétricas de diferentes empresas. Como o fluxo de água é variável e depende do nível pluviométrico anual, usinas térmicas operam de forma complementar.

Com o aumento do consumo de energia, aliado aos poucos investimentos realizados no setor, por conta da situação deficitária das contas externas, o fornecimento de eletricidade ficou comprometido, uma vez que não foi possível realizar uma expansão necessária do setor que acompanhasse a expansão da demanda por energia (2) e (3). Além disso, o aumento da intensidade de uso de energia elétrica na indústria brasileira, em virtude do processo de

modernização (3) e (4), e do uso residencial (5), que pode ser comparado em muitos aspectos com os padrões observados em países desenvolvidos como Áustria, Dinamarca, Alemanha, Holanda e Estados Unidos (6), se tornou um problema difícil de solucionar sem uma ação incisiva de planejamento de longo prazo e investimentos.

No início de 1995, o setor elétrico brasileiro vivia uma situação de quase falência, com obras paradas e falta de investimentos. Nada menos que 56 obras em usinas geradoras tinham sido interrompidas em todo o País. O setor elétrico estava diante de uma grave crise, com riscos de déficit de energia crescentes que poderiam comprometer o pleno atendimento de mercado e, conseqüentemente, inviabilizar o desenvolvimento econômico do País. Predominava a presença do Estado nesse setor vital da economia. As tarifas estavam fora da realidade. Os recursos eram insuficientes para cobrir os custos e financiar a expansão e a melhoria da oferta de energia para as famílias de consumidores e para as empresas. O Governo Federal começou então a fazer mudanças, inadiáveis naquela época, dentre elas aumentar a oferta de energia por meio do incentivo a novos investimentos, especialmente os do setor privado e diversificar a origem da geração de energia no País, fortemente baseada nas usinas hidrelétricas (7).

Sob esse contexto, o Governo Brasileiro decidiu implementar diversas mudanças no setor elétrico. O processo de privatização das empresas de distribuição de energia elétrica teve início em 1995. Em 1996, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com vistas a monitorar e homogeneizar as atividades do setor (8).

O Governo Federal lançou em novembro de 2003 o desafio de acabar com a exclusão elétrica no país. Foi o Programa "Luz Para Todos", que teve a meta de levar energia elétrica para mais de 10 milhões de pessoas do meio rural até o ano de 2008, onde a previsão de investimentos foi de R\$ 20 bilhões.

Nesse programa, o Governo Federal participaria com R\$ 14,3 bilhões provenientes de fundos setoriais de energia e o restante seria partilhado entre governos estaduais e as empresas de energia elétrica. No balanço divulgado de 2009, após oito anos do programa mostra que 90% da meta de 2010, que é de 2,6 milhões de famílias atendidas, foi alcançada e desde sua criação até

novembro de 2010, mais de 13 milhões de pessoas foram beneficiadas com luz elétrica nas suas casas. A expectativa do programa foi de que até abril de 2011 a previsão seriam integralmente cumprida, mas o programa foi novamente prorrogado, agora para ser finalizado em 2011, para possibilitar que as obras contratadas até outubro de 2010 sejam realizadas (9).

Nos estados da Bahia, Pará, Maranhão e Minas Gerais foram feitas mais de 1 milhão de ligações elétricas, sendo o estado baiano o que apresentou o maior número de pessoas atendidas (2,13 milhões). Do total de R\$ 14,3 bilhões para o programa, foram liberados R\$ 9,2 bilhões (9).

O mapa da exclusão elétrica no país, em 2010, revela que as famílias sem acesso à energia estão majoritariamente nas localidades de menor Índice de Desenvolvimento Humano e nas famílias de baixa renda. Cerca de 90% destas famílias têm renda inferior a três salários mínimos e 80% estão no meio rural (9).

1.1.1 Sistemas Centralizados de Geração Elétrica no Brasil

As empresas de distribuição de energia elétrica foram estruturadas sob a forma de monopólios e passaram a ser reguladas com o objetivo de se evitar exploração monopolista dos consumidores, resguardando, contudo, uma remuneração adequada para os investidores (10).

Até 1999, o Brasil possuía vários sistemas elétricos desconectados, o que impossibilitava uma operação eficiente das bacias hidrográficas regionais e da transmissão de energia elétrica entre as principais usinas geradoras, por outro lado, existia uma concentração de demanda em localidades industrializadas distantes das centrais de geração de energia elétrica. Estas características foram imperativas para a implantação de um sistema de transmissão de longa distância. Com o objetivo de ampliar a confiabilidade, otimizar os recursos energéticos e homogeneizar mercados foi criado o Sistema Interligado Nacional - SIN, o qual é responsável por mais de 95% do fornecimento nacional. Sua operação é coordenada e controlada pelo Operador Nacional do Sistema

Elétrico - ONS.

Em termos de uso final, a energia elétrica é o principal componente da matriz energética brasileira, sendo responsável por cerca de 39%, enquanto os derivados de petróleo contribuem com 31% e as outras fontes (nuclear, carvão, biomassa, eólica, solar), são responsáveis por apenas 30% (11). Segundo (12), no período de 1994 a 2001, as usinas usaram mais água para gerar energia do que receberam de chuvas. De 1991 a 2001, o consumo de eletricidade cresceu 4,1% e a capacidade de produção 3,3%, em média, ao ano. A defasagem entre o crescimento da oferta e da demanda é superior a 10% nessa década.

De acordo com dados do Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica - BIG/ANEEL, a capacidade instalada total do sistema elétrico brasileiro em Dezembro 2009, englobando as unidades geradoras do Sistema Interligado Nacional - SIN e também aquelas instaladas nos sistemas isolados, bem como a autoprodução (geração de energia elétrica instalada no local do consumo) era de cerca de 112.500 MW (13). A hidroeletricidade, historicamente predominante na matriz brasileira, representava, no final de 2009, 71% da capacidade, com 165 empreendimentos com potência de 74.484,24 MW, contra 73% em 2008. A queda foi superada pela expansão de todas as outras fontes, com exceção da termonuclear, que caiu de 1,96% para 1,89%. As demais fontes de geração termoelétricas, tiveram a sua participação aumentada de 22,18% para 23,59% do total, divididos entre 1.313 usinas com capacidade de 25.081,35 MW. A geração por pequenas centrais hidrelétricas (PCH), cuja capacidade instalada é superior a 1 MW e inferior a 30 MW e centrais geradoras (CGH), que possui potencial hidráulico igual ou inferior a 1 MW, subiu de 2,54% para 2,94% em 2009, na comparação com o ano anterior, enquanto a geração eólica subiu de 0,33% para 0,57% (14).

O sistema centralizado implementado diretamente após a criação da Eletrobrás, não era apenas considerado como o modelo mais eficiente em termos técnicos e econômicos, mas também se ajustava ao modelo de crescimento impulsionado pelo estado que prevaleceu no Brasil, quando o país fez a transição de uma economia agrícola de exportação para uma economia industrializada. O Brasil também desenvolveu um sistema de subsídio de tarifas, que visava

baratear a energia elétrica para as indústrias, repassando o custo residual aos domicílios dos consumidores e a outras empresas fora do setor industrial.

A maior parte da capacidade instalada é composta por usinas hidrelétricas, que se distribuem em 12 diferentes bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país de maior atratividade econômica. São os casos das bacias dos rios Tocantins, São Francisco, Paranaíba, Grande, Paraná, Tietê, Paranapanema, Iguaçu, Uruguai e Jacuí onde se concentram as maiores centrais hidrelétricas.

Pouco menos de 60% da capacidade hidrelétrica instalada no Brasil está na Bacia do Rio Paraná. Outras bacias importantes são a do São Francisco e a do Tocantins, com 16% e 12%, respectivamente, da capacidade instalada no País. As bacias com menor potência instalada são as do Atlântico Norte/Nordeste e Amazonas, que somam apenas 1,5% da capacidade instalada no Brasil (15), que deve aumentar, até 2019, a capacidade com a implantação das hidrelétricas de Belo Monte (PA), Ferreira Gomes (AP), Santo Antonio (AP), Jirau (RO), Rondon II (RO), Santo Antonio (RO).

Segundo (14) a operação da primeira unidade da Usina Hidrelétrica de Belo Monte, que será a terceira maior do mundo, está prevista para Fevereiro de 2015. A capacidade total instalada da usina será de 11.233,1 MW, com garantia assegurada de 4,571 mil MW médios. A usina vai operar a fio d'água. Isso significa que a geração vai variar de acordo com a quantidade de água do Rio Xingu a cada período do ano. A UHE Belo Monte vai integrar o Sistema Interligado Nacional (SIN) e, com isso, sua energia vai contribuir para expansão da oferta em todo o País (14).

A expansão, segundo (14) , ocorre também em outras regiões com a implantação das hidrelétricas de Colider (MT), Dardanelos (MT), Mauá (PR), Garibaldi (SC), Passo São João (RS), São José (RS), São Domingos (MS) e Simplício (RJ/MG) no período de 2011 a 2019.

Na Bacia do São Francisco, destaca-se a sub-bacia 49 (rios São Francisco, Moxotó e outros), onde estão localizadas as usinas hidrelétricas de Xingó e Paulo Afonso IV, que somam juntas 5.624 MW de potência instalada (16).

Na Tabela 1.1 é mostrado as unidades geradoras de energia elétrica do

Nordeste que se destacam.

Tabela 1.1: Unidades Geradoras do Nordeste (16).

Unidade Geradora	Potência Instalada	Local
Apolônio Sales (Moxotó)	400.000 kW	Delmiro Gouveia/AL
Paulo Afonso I	180.001 kW	Paulo Afonso/BA
Paulo AfonsoII	443.000 kW	Paulo Afonso/BA
Paulo Afonso III	794.200 kW	Paulo Afonso/BA
Paulo Afonso IV	2.462.400 kW	Paulo Afonso/BA
Piloto	2.000 kW	Paulo Afonso/BA
Pedra	160.000 kW	Jequié/BA
Sobradinho	1.050.300 kW	Sobradinho/BA
Xingó	3.162.000 kW	Divisa AL/SE
Araras	4.000 kW	Varjota/CE
Boa Esperança	237.300 kW	Guadalupe/PI
Camaçari	346.803 kW	Dias D´Ávila/BA
Coremas	3.520 kW	Coremas/PB
Funil	30.000 kW	Ubaitaba/BA
Luiz Gonzaga	1.479.600 kW	Luiz Gonzaga/PE

O Sistema Elétrico Brasileiro adotado, caracteriza-se pelo aproveitamento do potencial hidrológico que em combinação com as características de relevo possibilitam a utilização de usinas hidrelétricas, as quais são hoje responsáveis por cerca de 80% da potência elétrica disponibilizada ao país (11). Este tipo de produção de energia elétrica necessita de grandes investimentos, com enormes instalações e longas linhas interligadas de distribuição que, em muitos países, opera com o regime de monopólio resultante da necessidade de expandir a rede elétrica ao maior número de clientes possível.

Através dos dados publicado no Balanço Energético Nacional (BEN) de 2009 do Ministério de Minas e Energia, pode-se concluir que tanto a oferta quanto a demanda de energia elétrica cresceu nos últimos anos, porém a demanda esteve bem próxima da oferta. Em 2008, a diferença entre a oferta e a demanda foi apenas 13,6%. Isto significa que o Brasil não tinha grande excedente de energia elétrica, sendo portanto necessário diversificar a matriz energética, além de descentralizar e incentivar a geração de energia elétrica através de fontes alternativas no País.

1.1.2 Fontes Alternativas e Sistemas Descentralizados

1.1.2.1 Panorama Internacional

O fornecimento de energia elétrica em comunidades rurais isoladas e áreas remotas tem sido um constante desafio, principalmente nos países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, devido às enormes disparidades econômicas e sociais e, muitas vezes, às dimensões geográficas desses países. Há algum tempo, os sistemas de suprimento de energia alternativa descentralizados, utilizando recursos renováveis, têm sido empregados no atendimento a comunidades mais isoladas. Vários tipos desses sistemas têm sido estudados, mostrando-se economicamente viáveis em muitos países.

- Estados Unidos

Segundo país que mais investiu em energias renováveis em 2009 (US\$ 18,6 bilhões), possui a maior capacidade instalada total, com 53,4 GW provenientes de fontes renováveis, dos quais 31,9 GW de energia eólica. É líder no consumo e produção de etanol (47 bilhões de litros) e apresenta meta de elevar tal número para 136 bilhões de litros até 2022 (17).

- Alemanha

A Alemanha, por exemplo, provou como o uso das fontes renováveis pode ser útil ao Estado, à população e ao meio-ambiente. O país é responsável por cerca de um terço de toda a energia eólica instalada no mundo, representando metade da potência gerada em toda a Europa. O investimento em tecnologia também permitiu aos germânicos se destacarem na utilização de combustíveis de origem vegetal (biomassa). Na última revisão da Lei de Renováveis, datada de 2004, as metas de participação das renováveis na matriz alemã foram revistas para 12,5% em 2010 e 20% em 2020. O país é o atual líder mundial em termos de capacidade instalada em energia solar (7,7 GW) e terceiro maior em energia eólica (25,7 GW). Possui 29% de sua matriz de energia elétrica baseada em fontes renováveis, com 36,2 GW instalados até 2009 (17).

- Espanha

Apesar de uma matriz energética fundamentada na energia hidrelétrica, a Espanha iniciou o desenvolvimento de energias renováveis apenas após a crise do petróleo dos anos 70. Este desenvolvimento foi motivado principalmente pela necessidade de diversificação e descentralização da matriz elétrica e para reduzir a dependência de importações de energia.

Em 2000, foi criado o Plano para a Promoção de Energias Renováveis na Espanha, que previa a participação de 12% das fontes renováveis na matriz energética e 29,4% na geração elétrica até 2010. Dividido em duas fases, primeiro de 2000 a 2006, em seguida de 2006 a 2010, o plano foi responsável por uma considerável expansão da geração eólica no país, apesar de não ser específico sobre a duração do apoio ao sistema tarifário.

- China

Liderou os investimentos em energias renováveis em 2009 com US\$ 32,6 bilhões, atingindo 52,5 GW de capacidade instalada, dos quais 26 GW provenientes da fonte eólica, devendo alcançar entre 100 e 150 GW instalados até 2020. Principal produtor de painéis fotovoltaicos do planeta, com mais de 50 empresas atuando no setor (17).

- Reino Unido

Apesar de gerar a maior parte de sua energia a partir de térmicas a carvão e gás natural e usinas nucleares, o Reino Unido possui o melhor potencial de energia eólica da Europa. O ainda baixo aproveitamento das renováveis não se deveu à falta de apoio político e sim a esquemas de incentivo inadequados. O primeiro deles aconteceu em 1989, quando o *Electricity Act* (Lei da Eletricidade) privatizou o setor elétrico e ofereceu apoio à geração renovável, e também à geração nuclear, pela *Non-Fossil-Fuel Obligation* (NFFO) ou Obrigação de Combustíveis Não-Fósseis. Em 2007 foram instalados 427 MW e o Reino Unido tem uma capacidade instalada em energia eólica de 2.389 MW, a nona maior do mundo. A meta do governo para a energia renovável é

uma participação de 15% na matriz elétrica em 2015, aumentando para 20% em 2020 (18).

- Índia

Grande produtor de energia elétrica através de energia eólica (10,9 GW) e também em PCHs (2,5 GW). Com relação à energia solar fotovoltaica (FV), o país apresenta metas ambiciosas de instalar 20 GW até 2022 (17).

A capacidade instalada da Índia de geração de energia elétrica foi de 123.901 MW, em 31 de Janeiro de 2006. As fontes que contribuíram para essa geração foi hidro, térmico, nuclear e renováveis que correspondem a 26,0%, 66,4%, 2,7% e 4,9%, respectivamente. Considerando que cerca de 20% das 593.732 aldeias ainda estão para serem eletrificadas, apenas cerca de 44,0% das famílias rurais têm acesso à eletricidade fornecida. A previsão do governo da Índia é eletrificar vilarejos remanescentes e todas as casas até 2012. O foco deste programa é, principalmente, a implantação do projeto de gaseificação de biomassa de energia e de projetos de micro hidrelétricas (19).

- França

Embora não seja um dos maiores produtores de energia elétrica com a utilização de energias renováveis, apresenta 4,5 GW de energia eólica instalados e apresenta metas relevantes para a participação das fontes renováveis em sua matriz de energia elétrica em 10% até 2020, e consumo total de biocombustíveis também em 10% até 2020 (17).

- Portugal

A Resolução do Conselho de Ministros n.º 54/2010 estabelece que Portugal deve assegurar a posição entre os cinco líderes europeus ao nível dos objetivos em matéria de energias renováveis em 2020. Foi aprovada a Resolução do Conselho de Ministros n.º 29/2010, de 15 de Abril, que aprova a Estratégia Nacional para a Energia 2020 (ENE 2020). A ENE 2020 tem como principais objetivos reduzir a dependência energética do País, garantir o cumprimento dos compromissos assumidos por Portugal no contexto

das políticas europeias de combate às alterações climáticas, reduzir em 25% o saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes renováveis.

A presente resolução determina um conjunto de medidas que visam criar um enquadramento para a atividade de miniprodução descentralizada de energia, de modo que esta forma de produção de energia, à semelhança da microgeração, constitua um significativo contributo para o cumprimento das metas estabelecidas na ENE 2020.

Entre as diversas medidas que compõem a resolução deve destacar-se o lançamento de programas específicos de miniprodução para permitir que determinadas entidades como as escolas, os mercados abastecedores, o setor público estatal, as autarquias, as instituições particulares de solidariedade social, possam produzir energia de forma descentralizada, e que esta forma de produção de energia atinja, progressivamente, uma quota de produção de 500 MW até 2020 (20).

- Japão

País pioneiro e dos mais voltados à promoção de eficiência energética, também apresentava, em 2009, 12,9 GW provenientes de fontes renováveis, com destaque para Biomassa (3,1 GW) e Solar FV (1,7 GW) (17).

- Coreia do Sul

Até 2009 não apresentava grande destaque na utilização de energia descentralizada com fontes renováveis em sua matriz energética, mas foi um dos países a dedicar maior parcela de seu pacote de recuperação à crise económica para investimentos verdes. Possui metas para energia eólica (2,25 GW) e solar (1,3 GW) até 2011 (17).

1.1.2.2 Panorama no Brasil

O setor elétrico do Brasil conta com grandes usinas hidrelétricas responsáveis pela geração da eletricidade consumida pelas regiões mais desenvolvidas

do país. Porém para atender a demanda de regiões distantes dos grandes centros, como as comunidades isoladas da Região Norte, a relação custo benefício torna-se desvantajosa devido ao transporte da energia. Com este cenário, a geração descentralizada torna-se uma alternativa.

O sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro é dividido em 2 subsistemas: o interligado e o isolado. O sistema interligado tem uma capacidade instalada de 109.343 MW e é eminentemente hídrico, formado principalmente por grandes centrais hidrelétricas e, mais recentemente, por centrais térmicas à gás, que atendem a grande maioria do território nacional correspondendo a 98% do mercado consumidor. O sistema importa energia elétrica, principalmente do Paraguai, que é o detentor da metade da capacidade de Itaipú, em torno de 8.170 MW, e conta com 84.494 km de linha de transmissão. O sistema isolado, que abrange a região da Amazônia legal, é composto por vários sistemas de geração, transmissão e de distribuição, não conectados entre si, atendendo os principais centros consumidores, com grandes e pequenas unidades de geração à diesel, ou a óleo combustíveis. Corresponde a 2% do mercado nacional, tem uma potência instalada de 2.953 MW, com 2.608 km de linhas de transmissão e importa 200 MW da Venezuela. (21). Na Figura 1.1 é mostrado o mapa de integração eletroenergética do Brasil (22).

Do ponto de vista econômico, as comunidades isoladas se caracterizam pela baixa renda e pouco consumo de energia, se constituindo em mercados pouco atrativos para as concessionárias face aos grandes investimentos necessários para o atendimento sem perspectivas de retorno financeiro. Para atendimento destas comunidades, a utilização de sistemas isolados que gerem energia a partir de fontes renováveis tem se tornado uma solução viável. Estes podem ser do tipo individual, onde cada unidade consumidora possui um gerador independente; ou centralizado, onde as unidades consumidoras são atendidas por meio de uma mini-rede de distribuição. Os sistemas centralizados são mais robustos do que os individuais por serem mais facilmente controlados, além de terem custos de operação e manutenção reduzidos. São geralmente compostos de fontes renováveis diferentes, e por isto, chamados de sistemas híbridos. Combinam as características complementares das fontes, aproveitando as peculiaridades de cada fonte utilizada. (23).

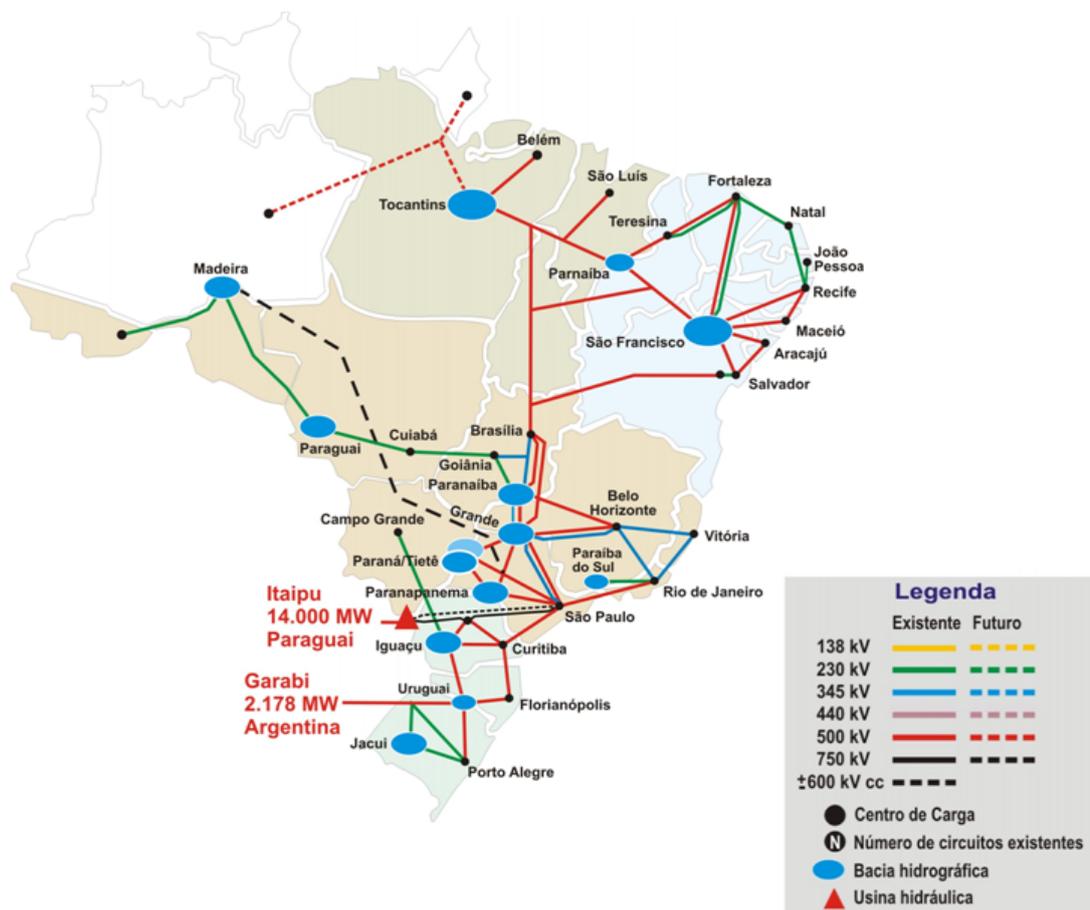


Figura 1.1: Mapa de integração eletroenergética do Brasil (22).

Por ocasião do lançamento do Programa Luz para Todos instituído pelo Decreto n.º 4.873, de 11 de novembro de 2003, alterado pelo Decreto n.º 6.442, de 25/04/2008. A meta de levar energia elétrica para mais de 10 milhões de pessoas do meio rural até o ano de 2008 foi atingida em maio de 2009.

Até a implantação do programa, o mapa da exclusão elétrica no país revelava que as famílias sem acesso à energia estavam majoritariamente nas localidades de menor Índice de Desenvolvimento Humano e nas camadas de baixa renda.

Os Sistemas Isolados são predominantemente abastecidos por usinas térmicas movidas a óleo diesel e óleo combustível embora também abriguem pe-

quenas centrais hidrelétricas (PCH), centrais geradoras hidrelétricas (CGH) e termelétricas movidas a biomassa. Estão localizados principalmente nos Estados de Amazonas, Roraima, Acre, Amapá e Rondônia. São assim denominados por não estarem interligados ao SIN e por não permitirem o intercâmbio de energia elétrica com outras regiões, em função das peculiaridades geográficas da região em que estão instalados. Segundo dados da Eletrobrás, esses sistemas atendem a uma área de 45% do território brasileiro e a cerca de 3% da população nacional e aproximadamente 1,3 milhão de consumidores espalhados por 380 localidades. Em 2008, respondiam por 3,4% da energia elétrica produzida no país. Os sistemas isolados de maior porte suprem as capitais Rio Branco (AC), Macapá (AP), Manaus (AM) e Porto Velho (RO) e o estado de Roraima (com exceção da capital Boa Vista e seus arredores, abastecidos pela Venezuela). Manaus tem o maior deles, com 50% do mercado total dos sistemas isolados(15).

De acordo com o Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), em Julho de 2011 existem 410 termelétricas movidas a biomassa no país, que correspondem a um total de 8,3 mil kW instalados. Do total de usinas relacionadas, 14 são abastecidas por biogás (70.022 kW)(24).

1.1.3 Dificuldades na Geração Descentralizada

Uma das dificuldades para a implantação de sistemas de geração descentralizados com redes ou individuais consiste na falta de uma regulamentação específica que garanta a qualidade do atendimento (25).

Para implantação de pequenas unidades geradoras de energia, o custo de implantação é um aspecto relevante. No sistema de geração de eletricidade com o biogás, quando são utilizadas pressões elevadas, como as citadas por (26), utiliza-se, obrigatoriamente, equipamentos e peças mais resistentes, que são normalmente onerosas, acarretando dificuldade à implantação de sistemas de pequeno porte em regiões isoladas e com população com baixa renda.

Portanto, são necessários estudos sobre a utilização de equipamento de menor porte, como por exemplo o sistema de controle de vazão do biogás

com baixa pressão a fim de viabilizar sua utilização em propriedades rurais e agroindústrias produtoras de biogás, fazendo com que o produtor agregue valor a seus produtos agrícolas.

1.2 Motivação

1.2.1 Redução da Poluição Ambiental

A produção de energias renováveis e eficiência energética são hoje reconhecidas como áreas de pesquisas mais discutidas no meio acadêmico. Os esforços científicos e desenvolvimento tecnológico, nos últimos 20 anos, desencadeiam ações direcionadas à necessidade de práticas sustentáveis de aproveitamento da natureza e a consequente redução sensível no custo da energia final obtida a partir destas fontes.

De acordo com (27), vários estudos têm demonstrado que gerenciar a poluição urbana e industrial concentrando-se no tratamento *end-of-pipe*, ou seja, utilizando-se de métodos corretivos, em muitos dos casos não é só custoso como também insustentável. Experiências dos Estados Unidos e outros países desenvolvidos têm demonstrado que, a longo prazo, a prevenção da poluição através da minimização de resíduos e de uma produção de energia com tecnologias mais limpas e eficientes, é mais sensata tanto na relação custo-benefício, como também para o próprio meio ambiente, se comparando com as técnicas tradicionais.

O aproveitamento energético do biogás reduz a emissão de metano para a atmosfera, contribuindo para a redução do efeito estufa. De acordo com estimativa da EPA (*United States Environmental Protection Agency*), o gás metano (CH_4) é responsável por 23% do aquecimento global. Sua contribuição só não é maior que a do gás carbônico (CO_2) responsável por 70% do total.

Em Portugal, as normas relativas aos aterros sanitários impõem, hoje em dia, a drenagem, a extração, o aproveitamento e, caso este não seja possível, a queima do biogás, em particular porque o metano é um gás que também

contribui para o efeito estufa, com um impacto 20 vezes superior ao gás carbônico. Desta forma, o biogás gerado nos aterros sanitários deve ser drenado e queimado para minimização dos efeitos causados pelo seu lançamento na atmosfera (28).

As fontes renováveis de energia: solar, eólica, geotérmica, biomassa, dos oceanos e pequenas centrais hidroelétricas (PCH), caracterizam-se por impactos ambientais muito menores que o uso dos combustíveis fósseis.

1.2.2 Custos de Manutenção e Produção de Eletricidade

A elevação crescente dos preços do petróleo torna-se cara a utilização de combustíveis líquidos de natureza fóssil nas regiões rurais para produção de eletricidade. A utilização de energia elétrica no meio rural também enfrenta problemas, especificamente em países como o Brasil, onde as distâncias são muito grandes, fazendo com que os preços dos materiais elevem sobremaneira o investimento das redes de eletrificação.

Segundo (29), os altos custos das redes de distribuição rural são um dos principais motivos para os baixos índices de eletrificação rural no Brasil e, portanto, a redução dos custos de construção de redes é uma condição essencial para prover energia às regiões rurais vastas e com baixa densidade demográfica.

Outra questão importante é a manutenção corretiva da rede elétrica, que também aumenta o custo operacional dessa, em regiões remotas (30). Paralelamente, o planejamento energético brasileiro foi feito de forma centralizada durante décadas, gerando dependência das áreas rurais em relação aos centros de decisão. Contudo, a proximidade do território brasileiro da linha do Equador, região de alta produção de biomassa e de vocação pecuária e agrícola, abre as possibilidades de complementação desta matriz energética com a produção de biogás a partir de biomassa originada de detritos agropecuários para energizar o meio rural brasileiro.

O estudo desenvolvido por (31), em 2003, avaliou o potencial de produção de energia elétrica através do biogás, na região do meio oeste catarinense,

concluiu que o consumo médio de energia nas propriedades foi de (600 a 1.800 kWh/mês). Tomando como base apenas a criação de suínos, (produção média de 50 m^3 de biogás/dia), teoricamente a capacidade de gerar eletricidade por propriedade era aproximadamente 2.160 kWh/mês. Com esta produção, as propriedades poderiam se tornar auto-suficientes em energia elétrica, adotando um sistema que seria capaz de gerar 25 KVA/h de potência elétrica. Segundo estimativas nesse ano, o empreendimento passaria ser viável economicamente quando a propriedade possuísse capacidade de produção de 200 m^3 /dia de gás, o que geraria uma produção aproximada de 300 kVAh/dia.

Um estudo realizado do custo de geração de energia elétrica através do sistema de gaseificação do caroço de açaí na região amazônica, mostrou que o custo foi de R\$ 0,23 / kWh, o que representa quase um terço do custo de geração de energia a partir de uma planta a diesel e que o custo do kWh cobrado na zona rural pela Companhia Energética do Amazonas - CEAM foi de R\$ 0,20, é pouco inferior ao custo encontrado para o sistema de gaseificação testado. Considerando os níveis elevados de aumentos tarifários que vem se verificando se pode afirmar que a tecnologia de gaseificação, nas condições postas, se apresentava como uma alternativa extremamente competitiva (32).

1.2.3 Disponibilidade de Biomassa no Brasil

Os sistemas modernos de bioenergia são importantes contribuintes para sistemas energéticos sustentáveis e desenvolvimento sustentável. A biomassa é uma opção atrativa para a mitigação das mudanças climáticas no setor energético porque é relativamente barata e pode ser utilizada para produzir eletricidade, assim como combustíveis líquidos, gasosos e sólidos refinados (33).

Nas regiões Norte e Nordeste, segundo dados da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), foram moídas 64 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2008/2009, correspondente a 11% do total do País e apresentou sua maior produção, ao longo do período analisado, na safra de 2007/2008 com 64,6 milhões de toneladas e a menor produção foi observada na safra de 1993/94, com 34,1 milhões de toneladas. O potencial teórico total da região

está estimado em 120,3 MW(34).

Em 2009, a colheita de babaçu na região Nordeste que ocorre nos estados do Maranhão, Piauí e Bahia foram de 102.777 ton, 5.250 ton e 335 ton respectivamente, apresentando a maior produção em 1987 com 161.600 ton de amêndoas, equivalentes a 81% da produção nacional (no total o Brasil apresentou uma produção de 197.396 ton)(35).

A região Nordeste é a grande produtora de castanha de caju (em casca). O maior produtor é o Ceará, onde de acordo com o sindicato das indústrias de beneficiamento de castanha de caju - SINDICAJU, registrou, na safra de 2009/2010, a produção de 104.421 mil toneladas de castanha de caju, seguido pelo estado do Rio Grande do Norte com 48.918 ton e Piauí com 42.963 ton. O potencial da casca de castanha de caju é estimado em 12,76 MW, com ênfase para o Norte Cearense (3,08 MW)(36).

Os mais importantes resíduos gerados pela atividade biológica são os do gado bovino, suíno, caprino e ovino, que são criações relevantes e justificariam seu aproveitamento energético. A criação de caprinos é um sistema produtivo praticado no Brasil e que está concentrado no semi-árido nordestino, cerca de 90% do rebanho nacional está na região Nordeste. Outras criações em destaque no Nordeste e que justificam seu aproveitamento energético são: bovino 13,8%, Equino 25%, suíno 16,5%, ovino 57% e galinhas 19,3% (35).

A instalação de usinas de produção de energia em aterros, também chamadas de Unidades de Reciclagem Energética de Resíduos Sólidos Urbanos (UREs), já é realidade em vários países do mundo. Já existem em funcionamento cerca de 700 delas ao redor do globo, enquanto ainda não há nenhuma em funcionamento no Brasil (37). Um estudo da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) listou as cidades brasileiras com mais de 500 mil habitantes e mostrou que o país produziu 57 milhões de toneladas de resíduos sólidos somente em 2009.

O lixo das 300 maiores cidades brasileiras poderia produzir 15% da energia elétrica total consumida no país. A estimativa consta no Plano Decenal de Produção de Energia 2008/2017 e considera todo o lixo recolhido nestes municípios (13). Segundo o coordenador de Energia e Comunicações da Se-

cretaria estadual de Infraestrutura (Seinfra) do Governo do Estado do Ceará, a possibilidade de produção de energia através do lixo nos atuais aterros espalhados pelo Estado no Ceará é estimada de 10 a 12 (MW) de energia (o suficiente para atender 25 mil habitantes)(37).

1.2.4 Considerações

No Brasil, a elevada população e sua concentração em grandes centros urbanos e a expressiva produção agropecuária e agroindustrial indicam um potencial significativo de produção de biogás no interior do País através dos materiais orgânicos e excrementos animais. O alcance de um programa de substituição de fontes de energia por biogás pode ser avaliado tomando-se a produção dos 7,2 milhões de biodigestores instalados na China até dezembro 1979, que tem um valor energético equivalente a cinco "Itaipus" ou 48 milhões de toneladas de carvão mineral (38).

O Brasil dispõe de condições climáticas favoráveis para explorar a energia derivada dos dejetos animais e restos de cultura e dispensar o gás de bujão e o combustível líquido (querosene, gasolina, óleo diesel) para o homem urbano (ou rural) aliviando, com isso, o país de uma significativa parcela de importação de derivados do petróleo. Os resultados apresentados numa pesquisa, revelam um potencial de produção de biogás superior a 50 milhões de m^3 CH_4 por dia (39).

Como foi citado anteriormente, o Governo Federal está implantando o projeto de expansão de oferta de energia elétrica que será finalizado em 2019. Porém, caso o país consiga nos próximos anos atingir um nível de crescimento econômico acima da média recente, provavelmente a oferta de energia elétrica será praticamente igual a demanda, já que a instalação de novas hidrelétricas demanda vários anos para sua conclusão.

Desta forma, para que o Brasil promova políticas públicas baseadas na sustentabilidade é importante diversificar sua matriz energética e ampliar o uso de outras fontes de energia renovável abundantes no país, como por exemplo o biogás.

1.3 Metodologia

A presente dissertação encontra-se inserida em um contexto pouco explorado no Brasil. Envolve diversos conceitos, como aspectos técnicos de engenharia agrônômica, química, elétrica, mecânica e automação, além de aspectos econômicos e sócio-ambientais da implantação de uma planta de produção de biogás através de biodigestor em regiões remotas.

O presente estudo foi conduzido, primeiramente, mediante investigação do estado da arte mundial sobre tecnologias de produção de biogás (biodigestores) e matéria prima utilizada. Em seguida, foi realizada a instalação da planta de produção de biogás com biodigestor tipo tubular com sistema automatizado e possibilidade de implementação de outras formas de controle. Posteriormente realizou-se, em campo, uma validação teórico-experimental do controle Proporcional-Integral (PI) do controlador lógico programável (CLP), além de comparar com o controle centrífugo existente no conjunto motor/gerador, sendo colocadas duas cargas diferentes no gerador de eletricidade movido a biogás para verificar a resposta do sistema. Por fim, foram efetuadas coletas de dados através de sensores e sistemas de aquisição, para realizar análises em diversos âmbitos a fim de validar as simulações realizadas.

1.4 Objetivos

O custo de implantação de um sistema de controle de vazão, que segundo (40), é a terceira grandeza mais medida nos processos industriais, está relacionado com o tamanho dos componentes. A robustez dos equipamentos depende das variáveis do processo, ou seja, pressões e vazões elevadas interferem diretamente nos custos de implantação de uma unidade geradora de eletricidade que utiliza biogás.

A presente dissertação tem como objetivo realizar o controle de vazão de biogás e monitoramento do processo, assim como estabelecer a melhor estratégia de controle PI aplicadas ao controle de vazão de uma planta de biogás

com baixa pressão do Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver o controle e sistema de supervisão da planta de biogás do Laboratório de Energias Alternativas da UFC.
- Avaliar o comportamento do controlador PI Paralelo comparado ao controle existente no conjunto motor/gerador em relação a variação de carga;
- Possibilitar futuras estratégias de identificação e controle em estudo, permitindo a validação dos resultados obtidos em ambiente de simulação, avaliando seu desempenho na presença de dificuldades encontradas na prática (ruídos, incertezas de modelagem, variações paramétricas);

1.5 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação apresenta a implementação do sistema de aquisição de dados, controle e monitoramento, assim como o estudo experimental das estratégias de modelagem, identificação e controle PID aplicadas ao controle de vazão da planta de biogás do Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará.

A Dissertação está organizado de acordo com os seguintes capítulos: além desta introdução, que aborda os aspectos gerais sobre os sistemas centralizados e descentralizados de energia, biomassa, motivação, os objetivos e a metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho, no capítulo 2 é feito um panorama sobre os tipos e as aplicações dos biodigestores, no capítulo 3 é abordada a teoria de controle, técnicas utilizadas na identificação de sistemas, as configurações de algoritmos de controle PID e os principais sistemas de supervisão. No capítulo 4 são descritas as etapas de instalação do biodigestor, o desenvolvimento das telas do sistema de supervisão, simulações, ensaios de controle e automação realizados na planta de produção de biogás do Laboratório de Energias Alternativas - LEA com a análise do comportamento dos controladores e o melhor ajuste de controle da vazão de

biogás com baixa pressão para o funcionamento do gerador. No capítulo 5 são descritos os resultados de simulações e experimentos realizados. Finalmente no capítulo 6 são apresentados as conclusões, contribuições e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Biodigestores

Neste capítulo são apresentados aspectos e conceitos básicos sobre biomassa, biogás e os tipos de biodigestores. Serão apresentados também as principais aplicações, vantagens e desvantagens dos modelos mais utilizados na produção de biogás.

2.1 Contextualização

O meio ambiente e seus recursos naturais limitados são uma preocupação crescente, não apenas no Brasil mas em todo o Mundo. Hoje ouve-se falar quase que diariamente sobre o aquecimento global, a importância da redução de emissões CO_2 associados com as alterações climáticas, chuva ácida e suas consequências. O problema de maior importância causado pelo uso da energia é o efeito estufa, que pode ser definido como o aumento da temperatura média da Terra em consequência do aumento da concentração atmosférica de alguns gases tais como o gás carbônico (CO_2), os clorofluorcarbonos (CFC_s), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e outros. Estes gases são conhecidos como gases do efeito estufa. São gases que capturam parte da radiação infravermelha que a Terra devolve para o espaço provocando o aumento da temperatura atmosférica com decorrentes mudanças climáticas.

O consumo de combustíveis fósseis responde pela maior parte da poluição ambiental. Para (27), 95% de todos os óxidos de enxofre e de nitrogênio,

assim como o dióxido de carbono (CO_2) (maior causador do efeito estufa), de origem antropogênica são produtos da combustão de combustíveis fósseis. No caso do monóxido de carbono (CO) e dos compostos orgânicos voláteis, a porcentagem é aproximadamente 70%. Por estas razões o acréscimo no consumo de energia tem um impacto ambiental tão grande.

As fontes alternativas de energia despertam interesse no mundo todo, devido ao fato de seu uso ser ambientalmente correto, e no Brasil isso não poderia ser diferente, pois sua matriz energética é composta de 43,9% com energia renovável, segundo dados do Ministério de Minas e Energia de 2010. Grande parte dessa energia vem de hidroelétricas que precisam de rios perenes para viabilizar sua construção. A região semi-árida brasileira, no entanto, conta apenas com o rio São Francisco com essa característica. Nesse caso, a energia utilizada no abastecimento dessa região brasileira precisa ser transportada a grandes distâncias através de linhas de transmissão, gerando custos de implantação e manutenção dessas redes. Por outro lado, outras fontes renováveis de energia como a solar, eólica e biomassa estão presentes no semi-árido, logo um caminho a ser seguido para um desenvolvimento sustentável dessa região é promover a pesquisa e a disseminação destes meios alternativos e descentralizados de energia. Pensando assim, avaliar o potencial energético de biomassa exclusiva do semi-árido pode trazer benefícios econômicos, ambientais e energéticos à região.

Segundo (41), os problemas epidemiológicos constatados no meio rural estão relacionados com os agentes causadores de infecções dentro das propriedades. A prevenção dos fatores que contribuem para sua ocorrência, protegem os animais contra o risco de infecções e o público contra zoonoses, ou outros riscos sanitários provocados pelo lançamento de resíduos no ambiente.

O acúmulo de dejetos pode criar um ambiente propício para ploriferação de vetores transmissores de doenças. Do ponto de vista sanitário, os dípteros são considerados os insetos mais importantes. Contudo, os pernilongos e borrachudos são hematófagos, podendo veicular doenças como a malária, a febre amarela ou a filariose.

As moscas domésticas (*Musca domestica*) e varejeiras (*Chrysomya spp*) são vetores de febre tifóide, disenteria, poliomielite, entre outras doenças.

Criadas em ambiente úmido contendo esterco e palhas ou resíduos de rações, a mosca de estábulos ou mutuca (*Stomoxys Calcitrans*), machos e fêmeas, sugam sangue dos animais. A ocorrência desses dípteros pode determinar a perda de sangue e a redução no ganho de peso dos animais, além da transmissão de doenças aos animais e às pessoas, como a anemia infecciosa dos equinos, carbúnculo hemático, e várias formas de tripassonomoses.

2.1.1 Biomassa

A Biomassa é um material constituído por substâncias de origem orgânica. Tais como: resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais, domésticos, municipais, etc. Estes materiais contêm energia química provinda da transformação energética da radiação solar. Essa energia química pode ser liberada diretamente por combustão, ou convertida através de algum processo em outras fontes energéticas mais adequadas, para um fim qualquer desejado, tal como biogás, álcool e o carvão vegetal. Aproveitando aproximadamente 1% do total da radiação solar incidente sobre a terra. Em uma pesquisa (42) estimou, em 1985, que anualmente sejam produzidas, pelo processo de fotossíntese, cerca de 61 mil GWh, ou seja, mais que 10 vezes a energia global consumida por ano no planeta. O total de energia existente na cobertura vegetal da Terra, incluindo-se as florestas tropicais e temperadas, as savanas e campos, é estimado como sendo cerca de 100 vezes o consumo mundial de energia ao longo de um ano. Naturalmente só uma parte desta quantidade pode ser utilizada para atender às necessidades humanas, porém estes números servem para dar uma idéia da importância que tem o potencial energético da biomassa (43).

A energia oriunda da biomassa pode ser classificada de diversas maneiras, entretanto deve-se reconhecer que aos fluxos de energia de biomassa são associados os biocombustíveis os quais, por sua vez, podem ser apresentados em três grupos principais, de acordo com a origem da matéria que os constitui. Dessa forma, existem os combustíveis de plantação não florestal (agrocombustíveis), biocombustíveis da madeira (dendrocombustíveis), e os resíduos urbanos (43).

Segundo (43) a energia acumulada na biomassa está na forma de energia química, sendo necessárias reações químicas para a sua liberação, podendo então ser usada para realização de trabalho útil, que pode ser a produção de calor. Em muitas situações específicas, o emprego da biomassa requer uma conversão para uma melhor adequação do seu uso ou transporte, devido principalmente a natureza sólida da biomassa.

Pode-se citar como exemplo a utilização da energia da biomassa em motores de combustão interna, pois a matéria-prima deve sofrer processos de conversão que a transformam em combustível gasoso ou líquido para serem usados nos motores.

2.1.2 Biodigestor

Segundo (44), a origem do biodigestor é bastante antiga, os povos essencialmente agrícolas como no caso os hindus, já utilizavam esse método de decomposição, mas foram os chineses que trouxeram esta tecnologia rudimentar até os dias de hoje.

Em 1806, na Inglaterra, Humphry Davy identificou um gás rico em carbono e dióxido de carbono, resultante da decomposição de dejetos animais em lugares úmidos. Ao que parece, apenas em 1857, em Bombaim, Índia, foi construída a primeira instalação operacional destinada a produzir gás combustível, para um hospital de hansenianos. Nessa mesma época, pesquisadores como Fisher e Schrader, na Alemanha e Grayon, na França, entre outros, estabeleceram as bases teóricas e experimentais da biodigestão anaeróbia. Posteriormente, em 1890, Donald Cameron projetou uma fossa séptica para a cidade de Exeter, Inglaterra, sendo o gás produzido utilizado para iluminação pública.

Inegavelmente, a pesquisa e desenvolvimento de biodigestores se desenvolveram muito na Índia, onde, em 1939, o Instituto Indiano de Pesquisa Agrícola, em Kanpur, desenvolveu a primeira usina de gás de esterco. O sucesso obtido animou os indianos a continuarem as pesquisas, formando o Gobar Gás Institute (1950). Tais pesquisas resultaram em grande difusão da metodologia de biodigestores como forma de tratar os dejetos animais, obter

biogás e ainda conservar o efeito fertilizante do produto final. Foi esse trabalho pioneiro, realizado na região de Ajitmal (norte da Índia), que permitiu a construção de quase meio milhão de unidades de biodigestão no interior daquele país.

No Brasil os biodigestores rurais tiveram maior desenvolvimento na década de 80 quando contaram com grande apoio dos Ministérios da Agricultura e de Minas e Energia. Cerca de 8.000 unidades, principalmente os modelos chinês e indiano, além de alguns de plástico tinham sido construídos até 1988, dos quais 75% estavam funcionando adequadamente (45).

Ainda que inexistissem dados precisos quanto ao número de biodigestores no país, a Emater calculou que em 1984 este número era de 3.000 biodigestores, principalmente do modelo Indiano utilizado para biodigestão de dejetos de bovinos. De acordo com (46), utilizando os dados do Levantamento Agropecuário Catarinense (2002-2003) e considerando somente produtores com mais de 50 cabeças de suínos (7.158 suinocultores), verificou-se que 0,08% deles possuíam biodigestores e 99,2% esterqueiras.

Um projeto experimental na Bahia usou o esterco de 100 caprinos, 50 kg por dia, em um biodigestor de lona de PVC. A produção de biogás foi de 3 m^3 /dia. O Nordeste brasileiro tem um efetivo aproximado de 17.140.000 caprinos e ovinos, a produção de dejetos desse rebanho é de aproximadamente 3.120.000 ton/ano que pode produzir anualmente através do biogás 1.032 GWh (47).

Em um estudo realizado pela Universidade Federal do Ceará no município de Pentecoste no estado do Ceará, constatou que o investimento para a construção do biodigestor foi de R\$ 3.277,00. Os resultados demonstraram que 1 m^3 de biogás produzido à partir de esterco de caprino equivale a 0,75 L de gasolina o suficiente para substituir cerca de 30% do volume de gasolina consumido para a irrigação de 1 (um) hectare (47).

Segundo (48), os biodigestores rurais são importantes para o saneamento rural, pois o processo de digestão anaeróbia promove a redução da carga orgânica convertendo o carbono presente na matéria orgânica em CH_4 que é utilizado como combustível, redução dos sólidos e também a redução de

microrganismos patogênicos presentes nos efluentes. Além de estimularem a reciclagem da matéria orgânica e de nutrientes, possibilitam a higienização das instalações para criação de animais, promovendo o tratamento de seus dejetos, proporcionando diminuição de moscas e odores.

Conforme (49), é mostrado na Figura 2.1 o ciclo do processo de obtenção do biogás e biofertilizante com a utilização dos biodigestores. O processo é iniciado com a seleção da biomassa e adicionado com água. Após ser misturado é colocada no biodigestor para iniciar o processo de fermentação.

Através da utilização dessas fontes, obtêm-se os alimentos, que são transformados, após o beneficiamento, em resíduos e reutilizados como biomassa.

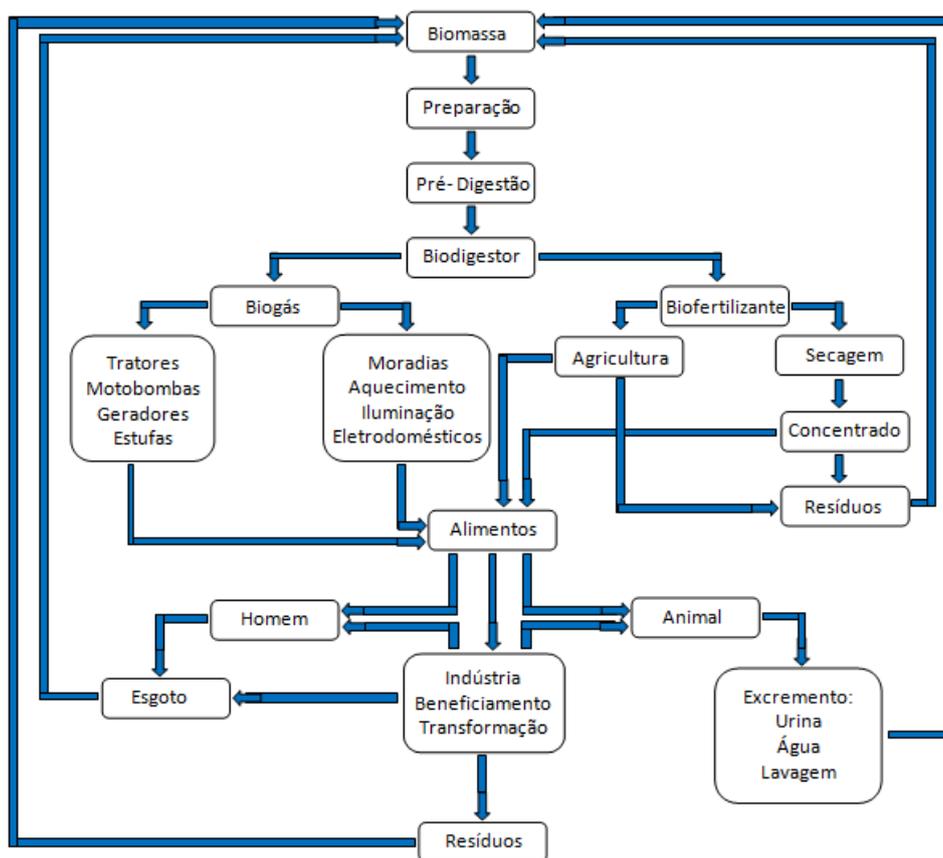


Figura 2.1: Ciclo da biomassa e biodigestor (49).

2.1.3 Modelos de Biodigestores

Os biodigestores podem ser encontrados em diversos modelos (indiano, chinês, tubular) cada qual com suas vantagens e desvantagens e características próprias de operação. Entretanto, existem dois tipos básicos de biodigestores classificados de acordo com a frequência de operação: os biodigestores em "batelada" e os biodigestores "contínuos".

Chama-se de biodigestores em batelada aqueles que operam de forma descontínua: o processo de biodigestão se dá por cargas que são inseridas no compartimento de fermentação. Este processo é utilizado quando, por algum motivo, não é possível a alimentação do biodigestor com matéria orgânica diariamente, ou, quando o consumo de biogás é baixo, não exigindo uma produção diária do biogás.

Nos biodigestores em batelada a matéria orgânica é inserida toda de uma só vez e então ele é fechado hermeticamente (de forma a não permitir a entrada de oxigênio) até que ocorra o processo de digestão anaeróbia. O biodigestor será aberto novamente só quando a produção de biogás cair, indicando que a matéria orgânica já foi decomposta e que pode ser feita a retirada da matéria restante, o biofertilizante, para, caso seja necessário, ser inserida nova carga de matéria orgânica.

Já os biodigestores de operação contínua operam com cargas diárias de matéria orgânica que se movimenta por meio de carga hidráulica dentro do biodigestor devendo a matéria orgânica, portanto, ser diluída e até mesmo triturada para evitar entupimentos e formação de crostas no interior do biodigestor.

Entre os modelos de biodigestores rurais simplificados mais utilizados distinguem-se os seguintes tipos principais: biodigestor com campânula flutuante (modelo indiano), biodigestor com cúpula fixa (modelo chinês) e biodigestor tubular solar.

2.1.3.1 Modelo Indiano

Este modelo de biodigestor caracteriza-se por possuir uma campânula como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação, ou em um selo d'água externo, e uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras. A função da parede divisória faz com que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação. O modelo indiano possui pressão de operação constante, ou seja, à medida que o volume de gás produzido não é consumido de imediato, o gasômetro tende a deslocar-se verticalmente, aumentando o volume deste, portanto, mantendo a pressão no interior deste constante. O fato de o gasômetro estar disposto ou sobre o substrato ou sobre o selo d'água, reduz as perdas durante o processo de produção do gás. O resíduo a ser utilizado para alimentar o biodigestor indiano, deverá apresentar uma concentração de sólidos totais (ST) não superior a 8%, para facilitar a circulação do resíduo pelo interior da câmara de fermentação e evitar entupimentos dos canos de entrada e saída do material. O abastecimento também deverá ser contínuo, ou seja, geralmente é alimentado por dejetos bovinos e/ou suínos, que apresentam uma certa regularidade no fornecimento de dejetos. Do ponto de vista construtivo, apresenta-se de fácil construção, contudo o gasômetro de metal pode encarecer o custo final, e também à distância da propriedade pode dificultar e encarecer o transporte inviabilizando a implantação deste modelo de biodigestor. Na Figura 2.2 é mostrado o biodigestor modelo indiano (48).

O biodigestor do tipo indiano apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens

- O digestor do modelo indiano é construído enterrado no solo e, como a temperatura do solo é pouco variável, o processo de fermentação que ocorre em seu interior tem a vantagem de sofrer pouca variação de temperatura. A temperatura elevada favorece a ação das bactérias (responsáveis pelo processo de fermentação anaeróbica) e a sua queda provoca uma menor produção de biogás;
-

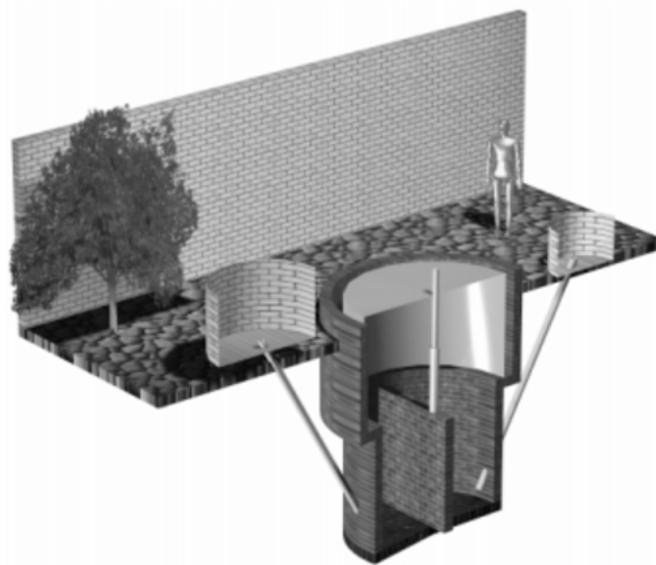


Figura 2.2: Biodigestor modelo indiano (48).

- Ocupa pouco espaço do terreno porque sua maior extensão é vertical;
- Em termos de custos, sendo as paredes de seu digestor construídas dentro do solo, o modelo dispensa o uso de reforços, tais com cintas de concreto, o que reduz custos.

Desvantagens

- Quando a campânula for de metal, ela está sujeita ao problema de corrosão. Para evitá-lo, recomenda-se fazer uma boa pintura com um antioxidante, com por exemplo, o zarcão;
- O custo da campânula, que o modelo chinês não tem;
- O sistema de comunicação entre a caixa de carga e o digestor, sendo feito através de tubos, pode ocorrer entupimentos;
- Escavação em regiões semi-áridas devido ao solo pedregoso.

2.1.3.2 Modelo Chinês

O modelo chinês apresenta baixo custo de construção, não possui partes

móveis, não possui partes metálicas que podem ser oxidadas e portanto são mais duráveis. Estes biodigestores são construídos enterrados e ocupam pouco espaço fora do solo, portanto mais protegidos contra as variações climáticas da superfície, principalmente em regiões que apresentam baixas temperaturas no inverno. Em sua construção, geralmente ocupam mão-de-obra e materiais locais. A cúpula de armazenamento do gás do modelo chinês muitas vezes apresenta vazamento, devido à porosidade dos materiais de construção geralmente utilizados e ao aparecimento de fissuras.

Quando estes vazamentos ocorrem, são muito difíceis de serem detectados e consertados, pois estes vazamentos as vezes não aparecem em testes de carga simples mas só quando o biodigestor está em funcionamento. Muitas vezes são sob condições de variação de pressão que as fissuras se propagam e ocorrem os vazamentos.

Estes biodigestores não apresentam descarga automática, possuem portanto um manejo complicado. O biodigestor de cúpula fixa somente deve ser recomendado para locais onde a mão-de-obra de construção seja supervisionada por técnicos com muita experiência em matéria de biodigestores e algum conhecimento de hidrostática. Seus usuários devem ser assessorados com regularidade durante um longo período, até que saibam realmente operá-los. Na Figura 2.3, pode ser visto um biodigestor modelo chinês (48).

O interior desse biodigestor compreende a câmara de digestão (cerca de 2/3 da altura) e o depósito de gás ou gasômetro (terço superior). Originalmente esse modelo recebia uma única carga para digestão, que só era retirada com a exaustão da produção de biogás. para evitar esse inconveniente, ao modelo foi adaptado um alimentador diário de massa orgânica e uma saída para biofertilizante, passando a produzir biogás continuamente.

O biodigestor do tipo chinês apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens

- Este modelo tem um custo mais barato em relação aos outros, pois a cúpula é feita de alvenaria;
-

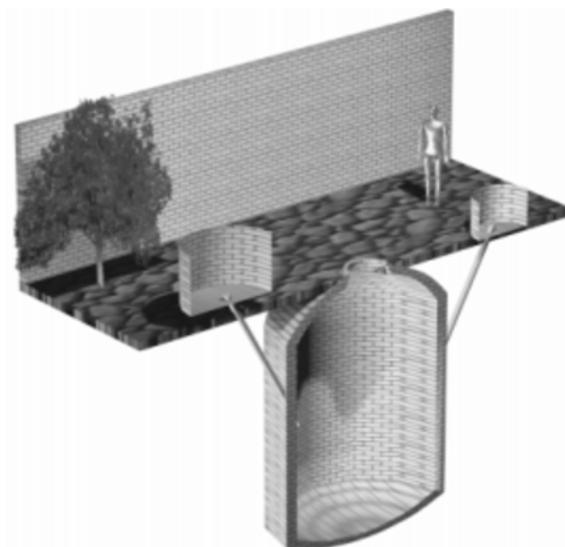


Figura 2.3: Biodigestor modelo chinês (48).

- O biodigestor chinês é o que ocupa menos espaço na superfície do solo, pois é completamente enterrado no solo (tanto o digestor, como o gasômetro);
- Sofre pouca variação de temperatura.

Desvantagens

- O sistema de comunicação entre a caixa de carga e o digestor sendo feito através de tubos, está sujeito a entupimentos;
- Tem limitação ao tipo de solo. Sua construção em solos superficiais não é indicada;
- Não é um biodigestor próprio para acúmulo de gás, devido a sua construção de cúpula fixa (a área de reserva de gás é menor). É um modelo mais indicado na produção de biofertilizante;
- Suscetível a problemas de estanquidade;
- Ocorrência de oscilações de pressão de gás que às vezes são muito altas para ser suportadas pela estrutura ou pelos equipamentos a gás
- Não pode ser deslocado para outro lugar.

2.1.3.3 Modelo Tubular Solar

Os biodigestores tubulares, conhecidos também como digestores *plug-flow* (seu nome em inglês) ou de fluxo em pistão, geralmente possuem uma relação largura e comprimento igual ou superior a 1:5. A biomassa tem entrada contínua em uma das extremidades do biodigestor, passa através do mesmo e é descarregada na outra extremidade, na mesma sequência em que entrou. O fluxo se processa como um êmbolo, sem misturas longitudinais. As partículas mantêm sua identidade e permanecem no tanque por um período igual ao tempo de retenção hidráulica. Para garantir isso, os biodigestores são longos, com uma elevada relação comprimento-largura, na qual a dispersão longitudinal é mínima (50).

O primeiro registro do uso de biodigestores tubulares foi na República da África do Sul, em 1957, operando a 35°C, com tempo de retenção hidráulica de 40 dias e cargas orgânicas de 3,4 kg de sólidos totais por m^3 . Nos Estados Unidos, o sistema foi intensamente estudado por pesquisadores da Universidade de Cornell, liderados por William Jewell (51).

Segundo (52), os biodigestores tubulares são cilíndricos, construídos abaixo do nível do solo e operam com tempos de retenção de mais de 15 dias. Nos Estados Unidos, admite-se o uso deste tipo de digestores apenas para dejetos de bovinocultura-de-leite, operando com teores de sólidos entre 11% e 13%.

Segundo (53), no Brasil, na região oeste do Paraná, os biodigestores tubulares passaram a ser utilizados no início da década de 80, e foram adaptados às condições locais por Johann Reichl. Após anos de experimentação prática com este modelo, foram incorporadas uma série de inovações para aumentar sua eficiência. Ainda (53) cita como vantagens do biodigestor tubular tipo Reichl, também conhecido como biodigestor solar de manta plástica, o baixo custo de implantação, a utilização eficiente da energia solar, captada pela manta plástica negra e incorporada na biomassa pelo agitador cinético.

Atualmente, biodigestores que utilizam a lona de PVC como gasômetro são os mais usados para o processamento de dejetos de suínos. Produtores de suínos do Paraná se associaram para, em conjunto, aplicar a tecnologia de produção de biogás e biofertilizante, buscando auto-suficiência energética.

Quando manejado adequadamente, esse biodigestor pode produzir biogás com uma eficiência de produção variando entre 0,35 a 0,60 m^3 de biogás por m^3 de biomassa. Para uma produção economicamente aceitável de biogás o manejo dos dejetos na unidade produtora de suínos deve buscar obter a maior concentração possível de Sólidos Voláteis e evitar o desperdício de água (54). Na Figura 2.4 é mostrado um biodigestor do tipo tubular solar (55).

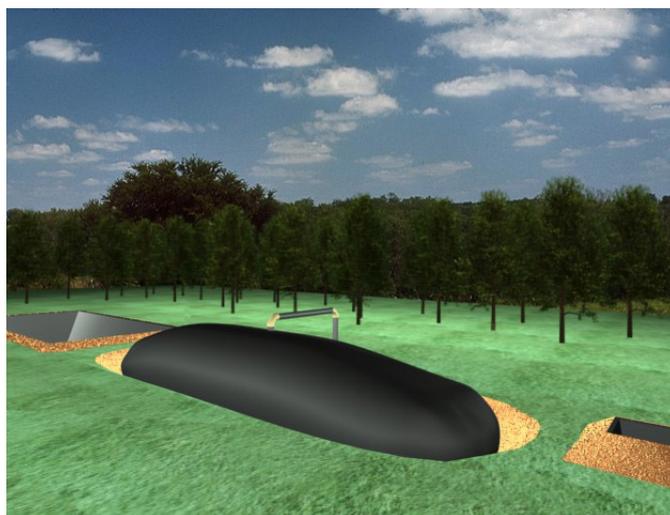


Figura 2.4: Biodigestor Modelo Tubular Solar (55).

O biodigestor do tipo tubular solar apresenta as seguintes vantagens e desvantagens:

Vantagens

- Produção contínua de biofertilizante e biogás;
- Redução de odores e insetos;
- Fácil instalação e manutenção;
- Permite a transferência do local de instalação.

Desvantagens

- Investimento inicial em mão-de-obra operacional;

- Produção de biogás altamente dependente das condições climáticas;
- Escavação em solos pedregosos;
- Possibilidade de perfuração da lona plástica.

2.1.3.4 Matéria-Prima do Biodigestor

A quantidade de gás produzida por dia, varia de acordo com a matéria-prima utilizada, temperatura interna, proporção de substrato/água e pH e principalmente, com a capacidade do biodigestor.

A mistura de água é variável de acordo com o material (fresco ou seco) e o seu tipo. De um modo geral, para os resíduos agrícolas verdes a relação é de 1:1. Já para os esterco animais, varia de acordo com a espécie e o estado (fresco ou seco). Uma maior concentração de massa prejudica a ação bacteriana e a liberação do biogás, uma pequena concentração (massa muito diluída em água) apresenta problemas de temperaturas baixas e diminui a ação bacteriana. Conforme (56), a Tabela 2.1 é mostrado os valores das proporções de água na matéria seca de alguns dejetos.

Tabela 2.1: Proporção de água na matéria seca para biodigestores (56).

Dejetos	Mat.Seca/Peso	Água	Biogás por m^3 /Mat.seco
Bovinos	16,50%	100%	270 m^3
Suínos	19,00%	130%	560 m^3
Equínos	24,29%	193%	260 m^3
Ovínos	34,5%	317%	250 m^3
Caprinos	34,80%	321%	285 m^3
Aves	19%	130%	280 m^3
Humanos	18%	118%	270 m^3
Aguapé	10,00%	21%	100/600 m^3

O cálculo do volume do biodigestor pode ser determinado através da quantidade de material orgânico diário disponível e do seu potencial gerador de biogás ou a partir da previsão do consumo diário de biogás. Cada material tem um potencial gerador no estado verde ou seco, tendo-se o conhecimento dos sólidos totais (ST) ou dos sólidos voláteis (SV) do material disponível,

também é possível fazer uma previsão do gás gerado e do volume necessário do biodigestor. Alguns autores usam a taxa de Demanda Química de Oxigênio (DQO) apresentada pelo material a ser utilizado.

Segundo (41), o volume do biodigestor é calculado através do produto da carga diária pelo período, em dias, de retenção da matéria orgânica para fermentação, conforme a Equação 2.1.

$$VB = (VC)X(TRH) \quad (2.1)$$

Sendo:

- VB - Volume do Biodigestor (*litros*);
- VC - Carga/dia (dejetos + água) (litros/dia);
- TRH - tempo de retenção hidráulica (dias).

O tempo de retenção necessário para a degradação da matéria orgânica (varia de 20 a 50 dias). O volume em m^3 pode ser encontrado dividindo o volume do biodigestor por 1000.

De acordo com as estimativas da Reclast Ambiental, fabricante do biodigestor, a quantidade de fontes para realizar a carga da unidade de biodigestão modelo 4500 é dada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Estimativa de Quantidade x Fontes (55).

Modelo	Fonte	Quantidade
Tubular 4500	Bovinos	7
Tubular 4500	Suínos	15
Tubular 4500	Frangos	750
Tubular 4500	Humanos	15

O esgoto comunitário o vinhoto ou vinhaças das usinas e destilarias sucro-alcooleiras, os aguapés dos grandes barramentos hídricos, aterros de grande porte, são materiais altamente promissores, tendo em vista os respectivos volumes disponíveis, o custo da matéria-prima praticamente zero e a alta produtividade. De acordo com (55), somente o rebanho suíno brasileiro (38 milhões de cabeças) é capaz de produzir, por mês, 7,2 bilhões de litros de dejetos líquidos. Considerando os valores considerados na Tabela 2.1 e um

tempo de retenção de 20 dias, seria possível produzir 6,24 milhões de m^3 de biogás e aproximadamente 8,9 milhões de KWh.

2.1.4 Biogás

O biogás é uma mistura de gases resultante da decomposição de matéria orgânica, pela ação de bactérias anaeróbias (na ausência de oxigênio). O biogás é composto principalmente por metano (CH_4), que é o principal elemento representando cerca de 60 a 80 % na composição do total de mistura e dióxido de carbono (CO_2), encontrando-se ainda em menores proporções gás sulfídrico e nitrogênio. Inicialmente, o termo biogás estava associado aos diversos nomes atribuídos a ele, como: gás dos pântanos, gás de aterro, gás de digestor e gás da fermentação. Atualmente, o termo refere-se, de forma geral, àquele gás formado a partir da degradação anaeróbia da matéria orgânica.

O metano é um gás incolor, altamente combustível, queimado com chama azul lilás, sem deixar fuligem e com um mínimo de poluição, que é o ideal para redução do efeito estufa. Em função da porcentagem com que o metano participa na composição do biogás, o poder calorífico deste pode variar de 5.000 a 7.000 kcal por metro cúbico. Esse poder calorífico pode chegar a 12.000 kcal por metro cúbico uma vez eliminado todo o gás carbônico da mistura. A matéria-prima usada na produção do biogás é de origem orgânica, são aproveitados materiais como esterco (humano e de animais), palhas, bagaço de vegetais e lixo. Essa fonte energética pode ser utilizada como combustível para fogões, motores e na geração de energia elétrica. Na Tabela 2.3 é mostrado os valores de equivalência do biogás com outros combustíveis.

Diversos países têm pesquisas com digestão anaeróbica e muitos deles já produzem comercialmente o biogás. Na Europa essa produção é difundida por várias razões. A produção de biogás é economicamente viável, as instalações têm operação simples e são facilmente montadas, eletricidade e calor podem ser gerados sem emissão de dióxido de carbono, a emissão de metano é reduzida, pois evita o armazenamento de dejetos dos animais e melhora a qualidade do biofertilizante. Essas são algumas vantagens que têm levado os europeus para a produção do biogás (57).

Tabela 2.3: Equivalência do biogás (0-60% de CH_4) (48).

Biogás m^3	Equivalência/Combustível
1,0	0,61 litros de gasolina
1,0	0,55 litros de diesel
1,0	0,57 litros de querosene
1,0	0,45 kg de gás liquefeito
1,0	0,79 litros de álcool combustível
1,0	1,538 kg de lenha (10% de umidade)
1,0	1,428 kwh

A Inglaterra e a Alemanha são os países de maior representatividade, onde 39% e 35%, respectivamente, suas participações na produção total de biogás. Baseado na produção total de resíduos possíveis de serem processados para produção de biogás desses países, teoricamente a produção de biogás em 2020 deve ser aproximadamente de 756×10^9 MJ. A França seguida da Alemanha e Inglaterra, são os países que terão a maior produção de biogás da União Européia (58).

Nos países da América Latina, Argentina, Peru, Brasil, Chile e México, a implementação de unidades de biogás está apenas começando. As construções são simples semelhantes às unidades produtoras da Ásia, com um volume de $2-10 m^3$ (59).

Artificialmente a produção de biogás ocorre através de um equipamento, o biodigestor anaeróbico. O próprio metano não possui cheiro, cor ou sabor, mas os outros gases apresentam odor desagradável. O biogás é uma fonte energética renovável, por essa razão é considerado um bicomcombustível. De acordo com (60), na Figura 2.5 é apresentado o modelo simplificado do processo de obtenção do biogás e adubo fertilizante com o esterco de animais.

Embora a digestão dos compostos orgânicos possa ocorrer num ambiente aeróbico, com a presença de oxigênio, a digestão anaeróbica, sem oxigênio livre é a que faculta uma boa produção de biogás. Nesses dois processos as bactérias atuantes necessitam para se desenvolver e exercer a importante ação metabólica. As do meio aeróbio retiram o oxigênio diretamente do ar, enquanto as do meio anaeróbio retiram da própria matéria orgânica. Esta atuação bacteriana é de grande importância para eficiência da conversão

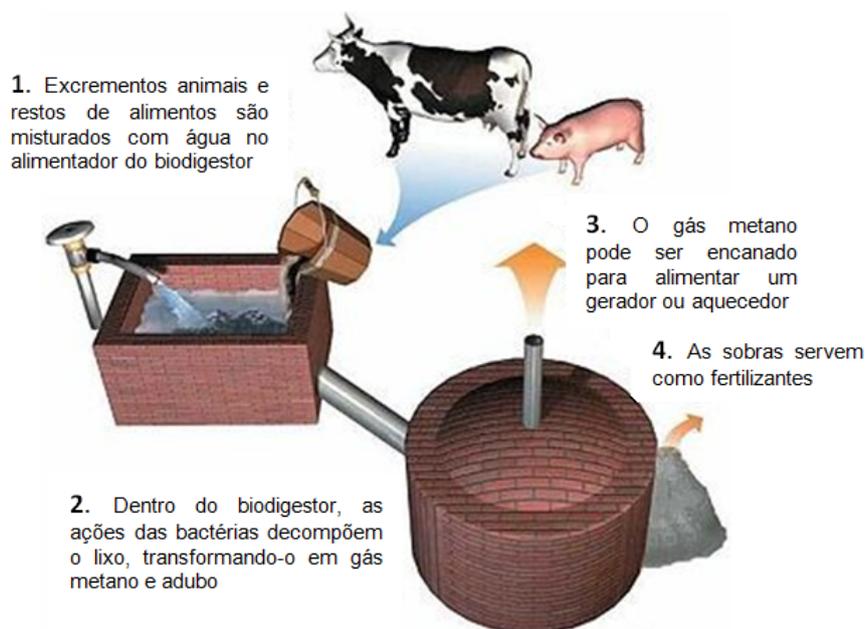


Figura 2.5: Modelo simplificado de obtenção de biogás (56).

como também para maior pureza do gás (teor de metano).

A digestão anaeróbica (DA) é o meio mais eficiente de gerar energia a partir de resíduos, com teores de matéria seca inferior a 30% (de preferência no intervalo 5-12,5%), tais como estrumes, lodo de esgoto, comida e outros resíduos orgânicos molhados. A tecnologia básica de DA envolve fermentação anaeróbica da matéria-prima resíduos orgânicos húmidos para produzir o metano e o dióxido de carbono, com o metano que está sendo utilizado para aquecimento, geração de eletricidade ou como combustível nos transportes.

A biodigestão anaeróbica se processa sequencialmente em três fases. O primeiro estágio acontece a desestruturação do material orgânico ainda cru, pela ação de bactérias denominadas psidofilicas, que agem preferencialmente à temperatura de 16°C. Há uma despolimerização de gorduras, carboidratos, celulose e proteínas, com a transformação do material orgânico insolúvel e complexo em material solúvel e produtos simples (monômeros). Na segunda fase denominada acidofílica ou simplesmente acidófila, agem bactérias saprofíticas que, ao metabolizarem os monômeros da fase anterior produzem

ácidos orgânicos como o propiônico, acético, láctico, fórmico, alguns acetatos e a liberação de CO_2 e água. Na fase seguinte, gaseificante ou metanogênica, os ácidos formados são metabolizados por bactérias metanogênicas como *sarcina methanica*, *methanococcus mazei*, *methanobacterium sochnenni* e *methanobacter omilianskii*.

A digestão ocorre em um recipiente fechado (digestor) aquecido, onde bactérias fermentam a matéria orgânica. Temperaturas baixas (menos de $15^\circ C$), bem como sua oscilação são desfavoráveis para o processo de digestivo, chegando paralisá-lo. O metanogênico pode se desenvolver satisfatoriamente em duas faixas de temperatura: a mesófila, entre $25^\circ C$ a $45^\circ C$ e a termófila, entre $55^\circ C$ a $65^\circ C$. No Norte e Nordeste do país, a faixa termófila ocorre naturalmente, que é um fator favorável para produção de biogás e geração de eletricidade através da sua utilização.

Em países com temperaturas baixas o aquecimento do digestor é derivado de uma caldeira a metano ou de calor recuperado de um sistema de motor a gás. A temperatura do tanque de digestão, pode ser aumentada para o intervalo de mesófilos ($30-35^\circ C$), onde a matéria-prima permanece em do digestor tipicamente por 15 a 30 dias, ou dentro da faixa termofílica ($55-65^\circ C$), onde o tempo de residência é normalmente 12 a 15 dias. Os sistemas termofílicos de digestão oferecem maior produção de metano, mas exigem tecnologia mais cara, maior entrada de energia e um maior grau de monitoramento. Normalmente, cerca de 30 a 60% da massa da matéria-prima de biomassa são convertidos em biogás (metano e dióxido de carbono).

2.1.4.1 Panorama do Consumo da Biomassa/Biogás

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo (15).

De acordo com os dados preliminares do Balanço Energético Nacional - BEN, documento produzido pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, a oferta de energia não renovável no país sofreu redução de quase 6% entre 2008 e 2009. As fontes renováveis apresentaram queda dez vezes menor (0,6%), o que contribuiu para um perfil ainda mais renovável da matriz nacional. As fontes renováveis (produtos da cana-de-açúcar, hidreletricidade, biomassa) responderam por 47,3% de toda a energia da matriz energética brasileira em 2009 (61). Em 2009, a participação da biomassa na matriz energética brasileira foi de 13,9% (Figura 2.6).

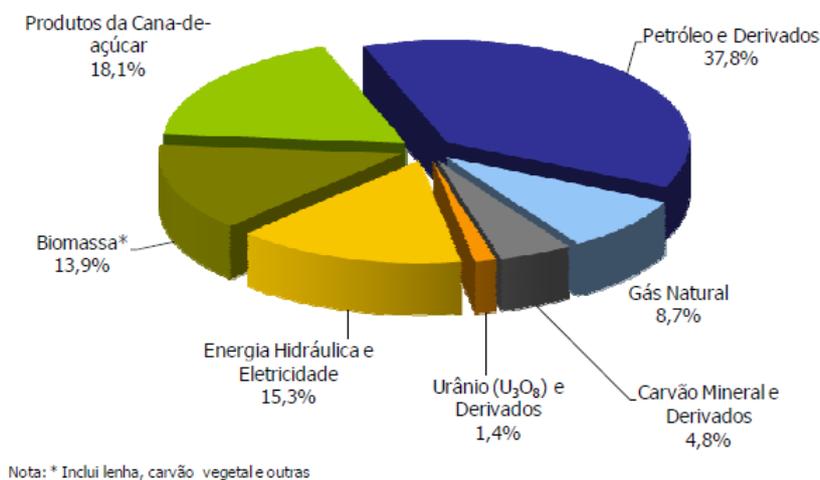


Figura 2.6: Perfil da matriz energética brasileira em 2009 (61).

A quantidade estimada de biomassa existente na Terra é da ordem de 1,8 trilhão de toneladas. Este volume, quando confrontado com o grau de eficiência das usinas em operação no mundo no ano de 2005, aponta para uma capacidade de geração de 11 mil TWh por ano no longo prazo ou mais da metade do total de energia elétrica produzida em 2007, que foi de 19,89 mil TWh, segundo o estudo da *Statistical Review of World Energy*, publicado em junho de 2008 pela BP Global (*Beyond Petroleum*, nova denominação da *British Petroleum*).

2.1.4.2 Perspectivas para o Uso de Biodigestores

Com a divulgação do Plano Nacional de Energia 2030, pode-se ter um referencial da produção e consumo para os próximos anos. O Plano conclui que: em 2005 as energias denominadas como outras (que incluem os resíduos agrícolas, industriais e urbanos) representaram 2% do consumo energético do país, sendo que em 2030 representarão 3%; o consumo energético do setor agropecuário que em 2005 representou 5% do total do país, irá ter a mesma representatividade em 2030; as fontes primárias (excetuando-se a cana-de-açúcar) terão um crescimento de 4% na matriz energética entre 2005-2030; o Brasil conseguirá manter um grau relativamente baixo de dependência externa de energia, custos competitivos de produção de energia e níveis de emissões de gases (um dos mais baixos do mundo) praticamente inalterados (62).

As crises dos derivados de petróleo (fornecimento e preço) e da energia hidroelétrica (construção e preço do kW) vem ensejando estudos para o aproveitamento de resíduos, até há pouco tempo considerados inaproveitáveis ou mesmos poluentes para geração de energia através de biodigestores. O uso de biodigestores no meio rural nordestino pode contribuir para combater o processo de desertificação, assegurando um desenvolvimento sustentável para o semi-árido. O biogás produzido pode ser usado em substituição à lenha para cocção de alimentos em fornos eficientes. Adicionalmente, o biogás pode ser usado como combustível na geração de energia elétrica, elevando os índices de eletrificação da região.

Em 2008, uma parceria entre a Itaipu Binacional, Companhia Paranaense de Energia (Copel) e produtores rurais de São Miguel do Iguaçu, no Paraná, permitiu a produção de energia elétrica a partir de dejetos suínos. A eletricidade gerada é usada pelas propriedades e o excedente é vendido à Copel. Cada suíno produz 10 litros de dejetos por dia e cada mil litros rende 1.360 litros de biogás, que geram 0,4 kWh de energia. Só na região, são 3 mil suínos. Chamado Programa de Geração Distribuída com Saneamento Ambiental, ele permite a utilização do material orgânico resultante da criação de suínos, evitando o seu lançamento em rios e em reservatórios como o da usina hidre-

létrica de Itaipu. Os resíduos são transformados, por meio de biodigestores, em biogás, combustível usado na produção de energia elétrica. Por decisão da Aneel, a potência instalada máxima dos empreendimentos incluídos no programa têm 300 kVA (quilovolt-ampere), que equivale a 270 quilowatts (kW). Esta potência é suficiente para abastecer 60 unidades consumidoras residenciais com consumo mensal médio de 150 kW.

Segundo Airton Kunz, a novidade que pode ajudar neste avanço, é a regulamentação da geração distribuída a partir do biogás e sua comercialização em todo o país, realizada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), em dezembro passado. Pela Resolução Normativa 390 (63), qualquer distribuidora de energia elétrica pode fazer chamadas públicas para comprar eletricidade produzida por biodigestores, que agora poderão fornecer para a linha de distribuição, em vez de somente consumir. Isso permitirá que pequenos geradores de energia elétrica tenham ganhos a partir do biogás, abrindo oportunidades econômicas para o produto no meio rural.

Ainda, tem se verificado que na atual conjuntura existe uma grande margem para o desenvolvimento de melhorias no aproveitamento da biomassa através de biodigestores. Este incremento na eficiência do processo de conversão energética da biomassa pode ser encontrado principalmente com o uso de tecnologias de automação e controle. Variáveis como vazão, pressão, temperatura e umidade do biogás necessitam ser monitoradas, visando um uso mais eficiente tanto para geração de calor como para geração de eletricidade.

Capítulo 3

Identificação e Métodos de Controle de Sistemas

No presente capítulo são abordadas a teoria de controle, técnicas utilizadas na identificação de sistemas, métodos de sintonia de algoritmos de controle PID, controle de vazão e os principais sistemas de supervisão e controle.

3.1 Controle

O conceito de controle é originário do francês "contrerole", como também do latim medieval "contrarotulus", que significava, contralista, isto é, segundo exemplar do catálogo dos contribuintes, com base no qual se verificava a operação do cobrador de tributos, designando um segundo registro, organizado para verificar o primeiro. O aparecimento do termo na língua portuguesa deu-se em 1922, significando o ato ou efeito de controlar; monitorar, fiscalizar.

Segundo (64), o primeiro trabalho significativo de controle foi o de James Watt, que construiu no século XVIII, um controlador centrífugo para controle de velocidade de uma máquina a vapor. Em 1922 Nicolas Minorsky, trabalhou em controladores automáticos para pilotar navios e mostrou como poderia determinar a sua estabilidade a partir da representação do sistema

através de equações diferenciais.

Hoje se percebe a aplicação de controle em todos os aparelhos e equipamentos que nos rodeia: máquinas de lavar, elevadores, automóveis, satélites, aviões, aquecedor de ambiente e outros processos (40).

Ultimamente, o tema do controle tornou-se importante no cotidiano após a incorporação da computação. O controle de processo industrial foi originalmente feito manualmente pelos operadores. Seus sensores foram o sentido da visão, tato, e de som, tornando o processo totalmente dependente do operador. Para manter um processo dentro dos limites estabelecidos para a variável controlada, o operador poderia ajustar um dispositivo de controle simples. A instrumentação e controle evoluíram lentamente ao longo dos anos, a indústria encontrou uma necessidade para melhorar suas linhas de produção, tornando-as mais precisas e mais consistentes para medidas mais rigorosas alavancadas pela competitividade e abertura do livre comércio. O primeiro impulso real para desenvolver novos instrumentos e sistemas de controle veio com a revolução industrial, e com a Primeira e Segunda Guerras Mundiais.

Os sistemas de controle de processo, aplicados a grande parte da indústria de transformação têm a influência direta sobre a qualidade de um produto acabado. Isso envolve a manipulação de muitas variáveis, a fim de conseguir o controle automático e ideal. O número de variáveis manipuladas depende do produto que está sendo fabricado. Normalmente, mais de uma variável é monitorada e controlada. As variáveis mais encontradas na indústria de transformação são: pressão, temperatura, nível, vazão, condutividade, viscosidade e peso.

3.1.1 Formas de Controle

Os sistemas de controle podem ser divididos em malha aberta e malha fechada. O sistema em malha aberta consiste em aplicar um sinal pré-determinado, esperando-se que ao final de um determinado tempo a variável controlada atinja um determinado valor. Ou seja, o sistema de controle em malha aberta é aquele o qual a ação de controle é independente da saída.

Portanto a saída não tem efeito na ação de controle. Neste caso, a saída não é medida e nem comparada com a entrada.

O sistema em malha fechada, ao contrário da malha aberta, a informação é assim "realimentada", através de transdutores, da variável controlada para uma variável manipulada com o objetivo de atingir o valor desejado na variável controlada. O sistema de controle em malha fechada é aquele no qual a ação de controle depende, de algum modo, da saída. Portanto, a saída possui um efeito direto na ação de controle. Neste caso, a saída é sempre medida e comparada com a entrada a fim de reduzir o erro e manter a saída do sistema em um valor desejado. A realimentação é a característica do sistema de malha fechada que permite a saída ser comparada com a entrada. Geralmente a realimentação é produzida num sistema, quando existe uma sequência fechada de relações de causa e efeito entre variáveis do sistema. Quando a realimentação se processa no sentido de eliminar a defasagem entre o valor desejado e o valor do processo, esta recebe o nome de realimentação negativa. (65), classifica os métodos de controle de processos em malha fechada em dois tipos: *Feedback* e *Feedforward*.

3.1.1.1 Malha de Controle *Feedback*

O controle *Feedback* apareceu pela primeira vez em 1774 com o desenvolvimento do regulador centrífugo para o controle de velocidade das máquinas à vapor.

A forma tradicional de controlar um processo é medir, através de sensores, a variável que está a ser controlada, comparar o seu valor com o valor desejado, conhecido como *setpoint* ou referência, realimentar o sistema com essas informações gerando ou não uma diferença (erro) que irá alterar a variável manipulada para induzir a variável controlada a voltar para o valor desejado. A informação é assim "realimentada" da variável controlada para uma variável manipulada. Na Figura 3.1 é mostrado o diagrama de blocos de um sistema controlado pelo método *Feedback*.

A detecção de erros é a determinação da diferença entre a amplitude da variável controlada (PV) e um valor desejado, denominado referência ou

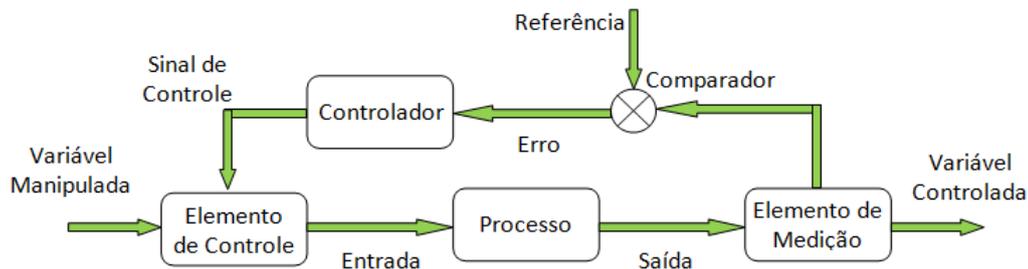


Figura 3.1: Controle de *feedback* em um processo (adaptado de (66)).

setpoint (SP). Qualquer diferença entre os dois é um sinal de erro, que é amplificado e condicionado a alimentar um elemento de controle. O controlador, por vezes, realiza a detecção, enquanto que o ponto de referência é normalmente armazenado na memória do controlador (66).

A perturbação, também conhecida como carga, atua no sistema de uma forma imprevisível e o objetivo do controle é manter o valor da saída da variável controlada (PV) igual a um valor desejado (SP). Essa comparação entre a PV e o SP pode gerar um erro (e), que deve ser eliminado pelo algoritmo de controle.

O controlador em *Feedback* basicamente mede a variável controlada do processo, compara com o valor desejado (*setpoint*), encontra o erro, e calcula uma saída de controle para modificar a variável manipulada até que o erro seja eliminado ou permaneça dentro de limites considerados como nulos. Desta forma, sempre que surgir uma oscilação no sistema, o controlador será capaz de atuar sobre o erro entre o *setpoint* e o valor da variável controlada e eliminá-lo. Infelizmente, na prática, não é bem assim que as coisas funcionam. As válvulas de controle possuem limites e saturam. É impossível abrir uma válvula mais que 100%. Inclusive, há casos onde a própria dinâmica do processo faz com que variações muito bruscas ocorram, seja por alteração de carga, ou mesmo por modificação no valor do *setpoint*. Em algumas vezes, tal distúrbio acontece em tamanha magnitude, ou dura tanto, que um único controlador convencional não é capaz de controlar o sistema.

Uma ação em *feedback* possui as seguintes etapas:

- Medir o valor da saída (vazão, pressão, nível de líquido, temperatura, composição) usando o instrumento de medida conveniente;
- Comparar o valor controlado PV com o valor desejado, SP (*set-point*) da saída. Assim, definimos ($e = SP - PV$);
- O valor do desvio é fornecido ao controlador. O controlador, por sua vez, muda o valor da variável manipulada (MV) de modo a reduzir a magnitude do desvio (e).

3.1.1.2 Malha de Controle *Feedforward*

Para (67), o tempo morto pode ser definido como o tempo que transcorre entre o instante que é introduzida uma mudança na variável de entrada e o instante em que a saída do mesmo começa a mudar. Quando a razão entre o tempo morto e a constante de tempo do processo for grande, o controle com realimentação não é capaz de evitar grandes desvios do *set-point* em função das perturbações (40). Para evitar que prováveis distúrbios interfiram no processo pode-se fazer medições de perturbação e usar essas informações e nosso conhecimento do modelo de processo para fazer bons ajustes na variável manipulada antes que a perturbação interfira na variável de controle. No controle *feedforward* observado na Figura 3.2, a perturbação ou distúrbio é detectado ao entrar no processo e uma mudança apropriada é feita na variável manipulada de tal forma que a variável controlada é mantida constante. Deste modo podem-se tomar as medidas corretivas. Devido essa característica esse controle também é conhecido como controle antecipatório ou regulação preditiva. A imprecisão do modelo é um aspecto de segurança importante que dificilmente permite a implementação de estratégia *feedforward* "puras". Em geral, o valor calculado pelo controlador *feedforward* é enviado a um controlador *feedback*, aumentando a robustez do sistema.

3.1.1.3 Controladores *Feedback ON-OFF*

Conforme apresentado na Figura 3.3, o controlador *Feedback ON-OFF* é modelado por um relé . Neste tipo de controlador o elemento atuante pos-

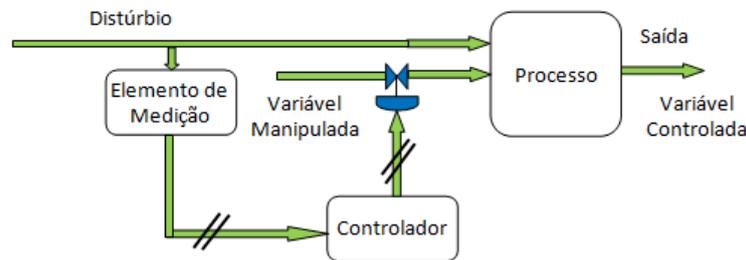


Figura 3.2: Controle *feedforward* em um processo (adaptado de (66)).

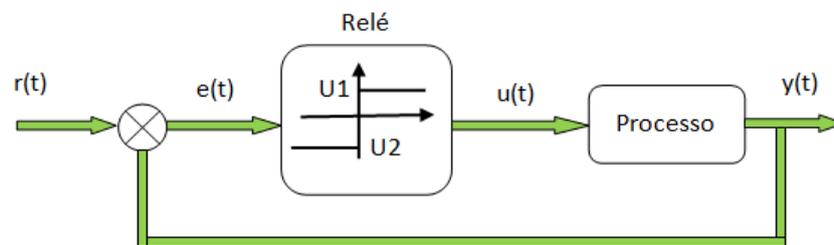


Figura 3.3: Controle de *feedback ON-OFF* (66).

sua apenas duas posições fixas: ligado (*ON*) ou desligado (*OFF*). Trata-se de um controle relativamente simples e barato, sendo extensivamente utilizado tanto em sistemas de controles industriais como domésticos. O controle *on-off*, evidentemente, não consegue manter a variável em um *setpoint*. O comportamento da variável controlada equivale a uma oscilação próxima aos valores equivalentes aos comandos *on* e *off* do controlador.

A função do controlador é receber o sinal da variável controlada e compará-la com o sinal do valor de referência para produzir o sinal de controle ($u(t)$) de modo a fazer com que a saída ($y(t)$) seja cada vez mais próxima do valor desejado. Portanto, a entrada do controlador é o sinal $e(t) = \text{referência } r(t) - \text{variável controlada } (y(t))$. Os vários tipos de controladores em "*feedback*" diferem no modo que eles relacionam a saída $y(t)$ com a referência $r(t)$. O sinal de saída de um controlador "*feedback*" *ON-OFF* depende de sua construção e seu sinal atuante pode ser um sinal pneumático (ar comprimido) para controladores pneumáticos ou um sinal elétrico para controladores elétricos.

3.2 Identificação de Sistemas

A identificação de sistemas é uma área que estuda técnicas alternativas de modelagem matemática de sistemas. A modelagem matemática é área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas reais. A identificação de sistemas é um dos problemas básicos em teoria de controle. No caso de sistemas lineares, uma abordagem para identificação é construir uma função de transferência representando o comportamento do processo, em tempo discreto ou contínuo, usando o "Princípio da Superposição", sendo que o estado inicial é suposto ser zero. As funções de transferência são funções que modelam o comportamento dinâmico de um par entrada-saída de um sistema, ou seja, descrevem como uma determinada entrada é dinamicamente "transferida" para a saída do sistema.

A identificação de sistemas não-lineares é difícil, pois, o princípio da superposição não pode ser usado, e a relação entrada-saída pode depender do estado atual e/ou histórico do sistema. Além disso, o sistema pode ter muitos estados para os quais a saída é constante ou zero.

O processo de modelagem de um determinado sistema dinâmico pode resultar num modelo de estrutura complexa. Em tais casos, métodos de redução de modelos podem ser utilizados para se obter uma representação mais simples do processo. Os sistemas híbridos inteligentes representam um direcionamento alternativo para a solução de problemas em sistemas de controle e identificação, principalmente aqueles que envolvem não-linearidades.

3.3 Controlador Centrífugo

O controle automático através de regulador centrífugo (Figura 3.4) foi desenvolvido por James Watt em 1788 (64). Baseia-se no princípio de reação ao comportamento anormal do processo. Seu funcionamento se dá através de mecanismos que utilizam a força centrífuga para realizar uma ação de

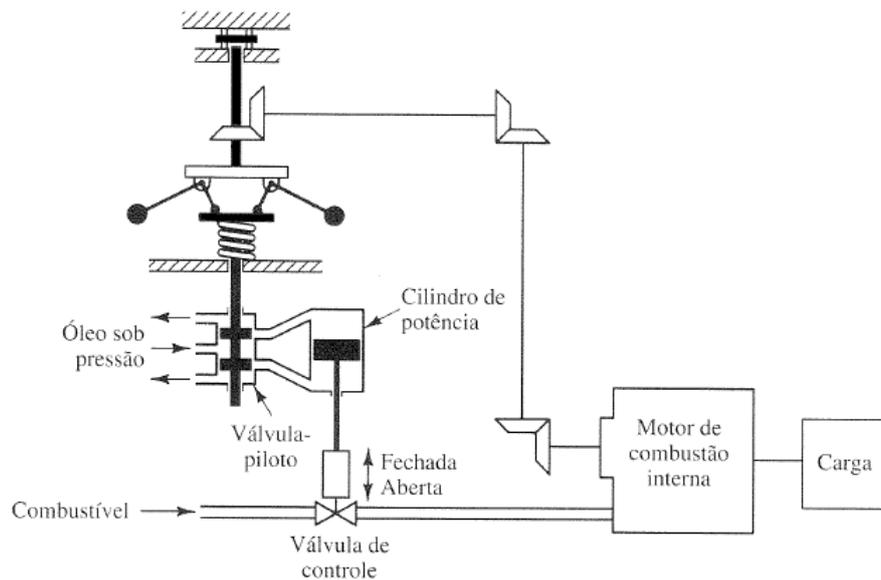


Figura 3.4: Sistema de Controle de Velocidade (64).

correção na variável controlada.

O regulador é ajustado de modo que, à velocidade desejada, não haja fluxo de óleo sob pressão em ambos os lados do interior do cilindro de potência. Se a velocidade real cai abaixo do valor desejado, devido a um distúrbio, então a diminuição na força centrífuga do regulador de velocidade faz com que a válvula de controle se mova para baixo, fornecendo mais combustível, e a velocidade do motor aumente até atingir o valor desejado. Por outro lado, se a velocidade do motor aumenta acima do valor desejado, então o aumento da força centrífuga do regulador de velocidade faz com que a válvula de controle se desloque para cima. Isso diminui o suprimento de combustível, e a velocidade do motor é reduzida até atingir o valor esperado.

Nesse sistema de controle de velocidade, a planta (sistema a controlar) é o motor e a variável controlada é a velocidade do eixo do motor. A diferença entre a velocidade desejada e a velocidade real é o sinal de erro. O sinal de controle (quantidade de combustível) a ser aplicado à planta (motor) é o sinal atuante.

3.4 Algoritmo de Controle PID

O algoritmo PID (Proporcional Integral Derivativo) é o controlador *Feedback* mais popular utilizado na indústria de processo. É um algoritmo robusto de fácil compreensão que pode fornecer um excelente controle de desempenho, apesar das características variadas dinâmicas da planta de processo (68).

Estima-se que mais que 95% dos controles industriais são baseados em algoritmos PID. Apesar do algoritmo básico ser o mesmo, existem pequenas diferenças entre os controladores PID, bem como diferentes *hardware* de execução para implementá-los, como os PACs (programmable automation controllers), PLCs (*programmable logic controllers*, conhecido no Brasil como CLP - controlador lógico programável) e microcontroladores (69).

Considerando o setor industrial dos países desenvolvidos, pesquisas realizadas e apresentadas em artigos técnicos e científicos têm demonstrado que mais de 90% dos controladores são do tipo PID (70). O controlador PID de estrutura fixa, ainda corresponde a uma das estruturas de controle mais utilizada a nível industrial devido à sua simplicidade de implementação e capacidade de satisfazer a maioria dos requisitos de projeto (71). Entretanto, mesmo sendo uma estratégia conhecida e dominada pelos engenheiros de controle, aspectos de sintonia continuam sendo, a nível de engenharia e pesquisa, um desafio (72).

Os controladores PID, são encontrados em diversos tipos de aplicações, principalmente nas indústrias. Constituem a estratégia de controle mais utilizada na indústria ao longo de muitos anos, sendo na maioria dessas, suficientes apenas para garantir um bom desempenho do processo controlado. Contudo, este bom desempenho só ocorre quando o controlador é ajustado de forma adequada, sendo esta a maior dificuldade de sua utilização. Os métodos de sintonia de controladores PID's, utilizam uma função de transferência como modelo da planta, sendo a mais utilizada a função de primeira ordem com atraso (73), (71) e (74). Assim, para a obtenção do controlador existem duas etapas: identificação da planta por uma função de transferência e sintonia dos parâmetros do controlador.

Sua popularidade se deve ao fato de ser simples de ajustar e ter, no mercado, uma grande variedade de ferramentas que possibilitam a implementação de maneira fácil e prática. Um exemplo é que todo CLP, por mais simples que seja, possui o algoritmo PID pronto para ser usado. Existe até aqueles que possuem ferramentas de auto-ajuste reduzindo ainda mais necessidade de ter uma pessoa qualificada para ajustá-lo.

Após 60 anos da publicação das primeiras regras sistemáticas de sintonia de parâmetros do controlador PID (Nichols e Ziegler), e com a publicação de milhares de artigos de sintonia de controlador PID, seria de se esperar que a prática no projeto de malhas de controle industrial estivesse mais próxima da realidade teórica desenvolvida no meio acadêmico e científico. Entretanto, dados da literatura têm mostrado que, mesmo com todo o avanço, as malhas de controle PID não são adequadamente sintonizadas (71). (75) pesquisou a indústria de manufatura (malhas de temperatura, fluxo, vazão, pressão) e mostrou que 30% das malhas opera em modo manual, 20% utiliza a sintonia do controlador que veio da fábrica não importando as características específicas de cada malha ou suas condições de funcionamento, 30% apresentou problemas relativos ao pobre desempenho dos sensores e elementos de atuadores.

O algoritmo PID usa o erro de três módulos distintos para produzir a saída ou variável manipulada. A partir desses módulos encontra-se as formas de controle puramente proporcional, proporcional e integral, proporcional e derivativo e proporcional, integral e derivativo. O controle puramente proporcional é um controle que atua de forma corretiva, onde a correção da variável controlada é proporcional ao valor do sinal do erro (e). Esta é uma ação simples e intuitiva que é bastante semelhante ao comportamento humano. Se o objetivo de uma determinada atividade está longe, intuitivamente o cérebro determina uma ação maior, e quando o objetivo se aproxima, um pequeno passo é executado. A magnitude dessas ações pode ser considerada como ganho do controlador (K_c), que obviamente podem induzir erros estacionários conhecidos como *offset*. O aumento no ganho do controlador pode reduzir o *offset* ou o erro permanente, mas a resposta tende a ser oscilatória e em alguns casos tende a instabilidade do sistema. A função de transferên-

cia no domínio do tempo de um controlador proporcional pode ser descrita conforme a Equação 3.1.

$$C(s) = Kc \quad (3.1)$$

A fim de eliminar o erro estacionário (*offset*), a ação integral é frequentemente incluída. Dessa forma, a ação de controle atua em proporção direta ao tempo integral do erro. O parâmetro de ajuste integral, que é chamado de tempo de *reset* ou o tempo integral é definido normalmente em minutos. O algoritmo do controlador PI realiza continuamente as intervenções no processo até que a diferença entre a SP e PV diminua até que o erro seja zero ($e = 0$). Em processos que se caracterizam por ter constante de tempo grande (mudanças lentas) este algoritmo torna-se ineficiente. A função de transferência no domínio do tempo de um controlador proporcional integral pode ser descrita conforme a Equação 3.2.

$$C(s) = Kc \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (3.2)$$

A ação derivativa usa a tendência da variável do processo em atingir o valor de referência para fazer os ajustes necessários. A tendência do processo é estimada usando a derivada do sinal de erro com relação ao tempo. A ação derivativa associada com a ação proporcional (PD) resulta em uma correção antecipada a um desvio que ainda não aconteceu conhecida também de supercorreção (76). Como esta ação de controle depende somente da razão da variação do desvio e não da amplitude deste, não deve ser utilizada sozinha, pois tende a produzir movimentos rápidos no elemento final de controle tornando o sistema instável. No entanto, para processos com grandes constantes de tempo, pode vir associada à ação proporcional e principalmente às ações proporcional e integral. Esta ação não deve ser utilizada em processos com resposta rápida e não pode ser utilizada em qualquer processo que apresente ruídos no sinal de medição, tal como vazão, pois neste caso a ação derivativa no controle provoca rápidas mudanças na medição devido a estes ruídos. Isto causa grandes e rápidas variações na saída do controlador, o qual mantém a válvula em constante movimento, danificando-a e levando o processo à insta-

bilidade. A função de transferência no domínio do tempo de um controlador proporcional derivativo pode ser descrita conforme a Equação 3.3.

$$C(s) = Kc + \tau ds \quad (3.3)$$

O controlador PID é o algoritmo de controle que soma três tipos de ações de controle. A ação proporcional, integral e derivada no domínio do tempo pode ser visto na a Equação 3.4. Devido à sua relativa simplicidade, além de um desempenho satisfatório, que é capaz de proporcionar uma ampla gama de processos, tornou-se, na prática, o controlador mais utilizado em ambientes industriais. Uma pesquisa observou-se que de mais de 11.000 malhas de controle analisadas em diversas plantas (refinarias), cerca de 97% eram controladas com o algoritmo PID (71). A função de transferência de um controlador proporcional integral derivativo no domínio de Laplace pode ser descrita conforme a Equação 3.5.

$$u(t) = Kc(e(t) + \frac{1}{\tau i} \int_0^t e(\tau) d\tau + d\tau \frac{de(t)}{dt}) \quad (3.4)$$

$$C(s) = Kc(1 + \frac{1}{\tau is}) + \tau ds \quad (3.5)$$

3.4.1 Variações do Controle PID

As variações mais comuns do algoritmo PID são: o ISA e paralelo.

3.4.1.1 PID Ideal

O modelo padrão é chamado às vezes o algoritmo PID ISA ou algoritmo ideal, como visto na Figura 3.5. As ações proporcionais, integrais e derivativas não interagem no domínio do tempo. Este algoritmo admite zeros complexos, o que é útil quando os sistemas de controle possuem pólos oscilatórios. A função de transferência de um controlador proporcional integral derivativo no domínio de Laplace pode ser descrita conforme a Equação 3.6.

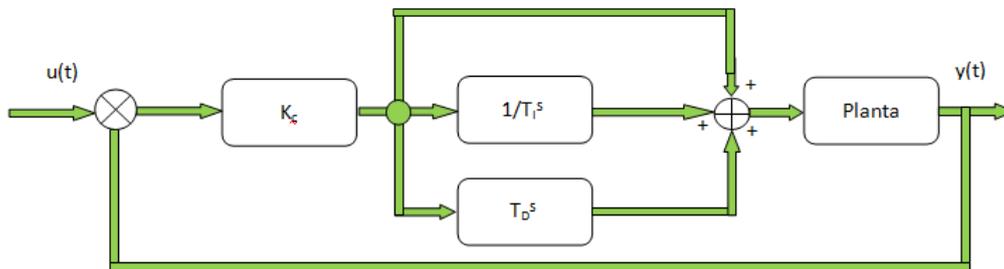


Figura 3.5: Esquema do PID ISA (adaptado de (78)).

$$C(s) = Kc\left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) \quad (3.6)$$

3.4.1.2 PID Paralelo

O PID paralelo (Figura 3.6) é dito paralelo, pois as ações proporcionais, integrais e derivativas são calculadas em paralelo e depois somadas. A função de transferência de um controlador proporcional integral derivativo no domínio de Laplace pode ser descrita conforme a Equação 3.7.

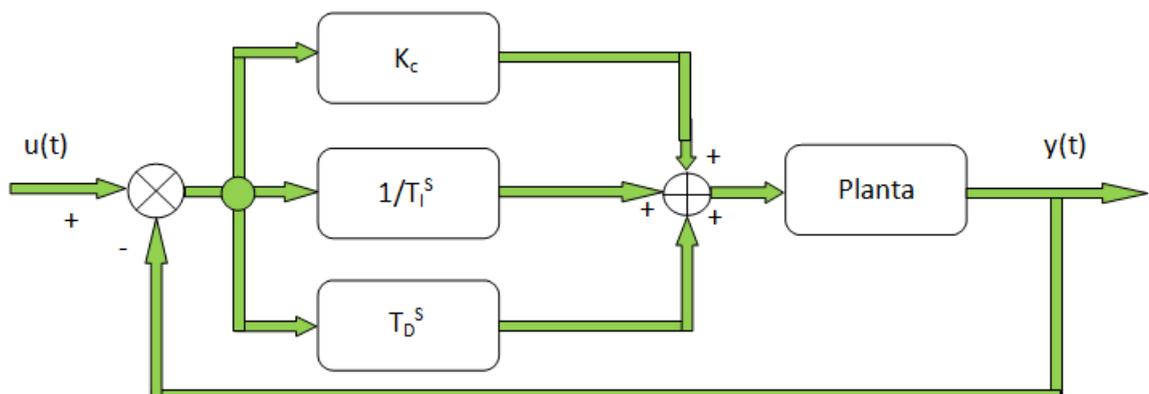


Figura 3.6: Esquema do PID Paralelo (adaptado de (78)).

$$C(s) = \left(Kc + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) \quad (3.7)$$

3.5 Sintonia Para Controladores PID

A tarefa de sintonia de controladores Proporcional, Integral e Derivativo, na maioria dos casos é realizada de forma empírica pelos operadores e técnicos responsáveis pelo processo sob controle. A tarefa basicamente consiste em variar os ganhos do controlador e avaliar o impacto destas variações junto à variável de saída do processo. Diversos autores propõem métodos para sintonia de controladores PID's, entre esses métodos destacam-se segundo (40): Ziegler e Nichols em (1942), CHR (Chien, Hrones e Reswick) em (1952), CC (Cohen e Coon) em (1953), Integral do Erro (Lopez et al.) em (1967), Relés (Astrom e Hagglung) em (1984) e MMC (Modelo Interno) em (1986).

Em 1942, Ziegler e Nichols publicaram um trabalho que, com base em alguns dados experimentais do processo, o operador fosse capaz de determinar um conjunto de parâmetros iniciais, K_p , K_i e K_d de controladores tipo PID.

Segundo (64), Ziegler e Nichols propuseram regras para determinação de valores do ganho proporcional K_p , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d baseadas na característica da resposta temporal de uma planta. Existem dois métodos denominados regras de Ziegler e Nichols: o primeiro em malha aberta e o segundo em malha fechada.

No primeiro método, obtém-se experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário, conforme a Figura 3.7. Se a planta não possui integradores, nem polos complexos conjugados dominantes, então essa curva de resposta ao degrau unitário pode ter um aspecto de um S, como mostra a Figura 3.8.

A Função de transferência $C(s)/U(s)$ pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem com atraso de transporte, conforme a Equação 3.8.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.8)$$

A curva com o formato em S pode ser caracterizada por duas constantes: o atraso L e a constante de tempo T . O atraso e a constante de tempo são determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da

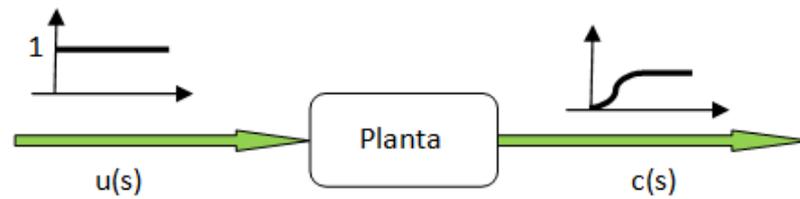


Figura 3.7: Resposta ao degrau unitário em malha aberta (64).

curva com o formato S e determinando-se a intersecção da linha tangente com o eixo dos tempos e a linha $c(t) = K$, como mostra a Figura 3.8.

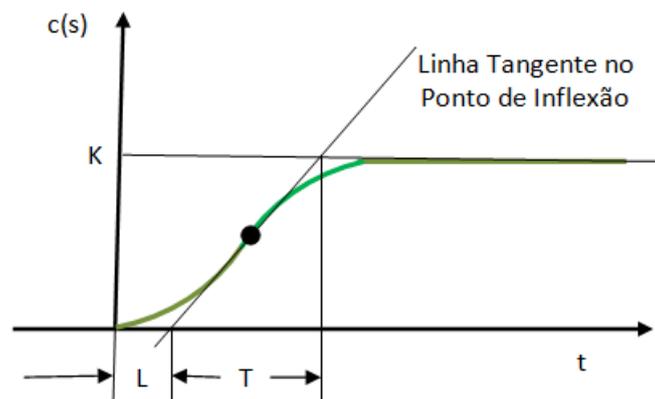


Figura 3.8: Curva de resposta em forma S (64).

Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , K_i e K_d de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Sintonia de Ziegler e Nichols para degrau unitário (64).

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2T/L$	$2L$	$0,5L$

No segundo método, defini-se primeiro $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Utiliza-se somente a ação proporcional, conforme a Figura 3.9, aumenta-se o valor de K_p de

0 ao valor crítico K_{cr} , no qual a saída exibe uma oscilação sustentada pela primeira vez (Se a saída não exibe uma oscilação sustentada para qualquer valor que K_p pode assumir, então esse método não se aplica). Portanto, o ganho crítico K_{cr} é determinado utilizando o método do lugar das raízes e o correspondente período P_{cr} é determinado pela frequência de oscilação crítica sustentada ω_{cr} , onde $2\pi/\omega_{cr} = P_{cr}$, como pode ser visto na Figura 3.10.

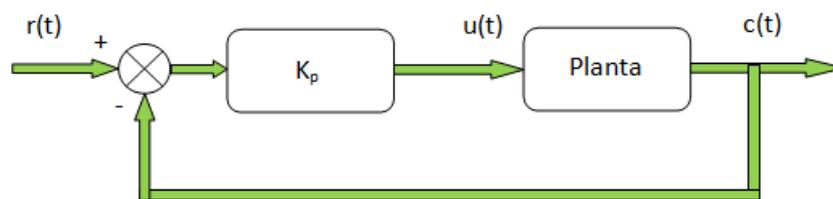


Figura 3.9: Sistema de malha fechada com controlador proporcional (64).

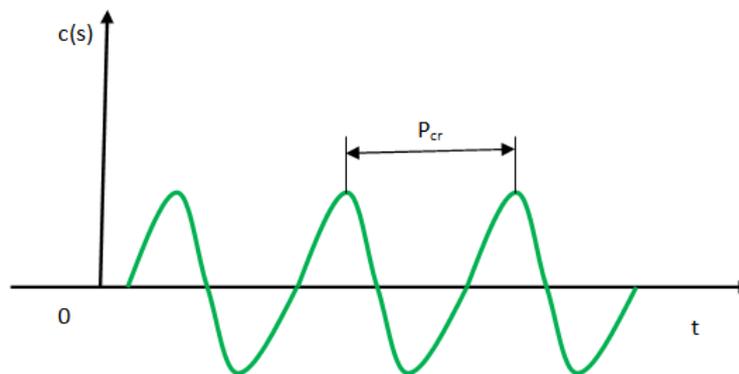


Figura 3.10: Oscilação sustentada com período P_{cr} (64).

Ziegler e Nichols sugeriram escolher os valores de K_p , K_i e K_d , baseados no ganho crítico K_{cr} e período crítico P_{cr} de acordo com a Tabela 3.2.

3.6 Controle de Vazão

A medição exata do fluxo de fluido é muito importante em muitas aplica-

Tabela 3.2: Sintonia de Ziegler e Nichols baseada em K_{cr} e P_{cr} (64).

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$P_{cr}/1,2$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

ções industriais. A qualidade e desempenho de diversos processos industriais exigem determinadas vazões de fluxo. O custo de alguns líquidos e gases, como exemplo os combustíveis, tem como parâmetro de valor o fluxo medido através de um sistema de monitoramento, tornando-se necessário para efeitos de contabilidade para medir com precisão e controlar a taxa de fluxo. Segundo (77), a vazão é a terceira grandeza mais medida nos processos industriais. As aplicações são muitas, indo desde aplicações simples como a medição de vazão de água em estações de tratamento e residências, até medição de gases industriais e combustíveis, passando por medições mais complexas. Para (78), os controladores PI são mais comuns no controle de vazão, pois eles eliminam o erro estacionário e têm velocidades de resposta aceitáveis na maioria dos ambientes industriais. Segundo o mesmo autor, deve-se utilizar um ganho baixo (banda proporcional PB ≈ 150) para reduzir o efeito dos sinais ruidosos (fluxo de turbulência e também para não usar controle derivativo). Utiliza-se também um tempo de *reset* baixo (aproximadamente 0,1 min / repetição) para alcançar rapidamente o *setpoint* de monitoramento.

3.6.1 Modelamento da Equação de Bernoulli

A forma simples do princípio de Bernoulli é válida para os fluxos incompressíveis como a maioria dos líquidos e também para os fluxos compressíveis (gases), onde o processo é inteiramente isobárico ou isocórico e que a transferência é realizada em baixos números de Mach. De acordo com (79), o fluxo é incompressível se $Ma < 0,3$ ou compressível se $Ma > 0,3$. O último regime é ainda dividido em sub-sônico ($Ma < 1$), transônico ($0,8 < Ma < 1,2$), supersônico ($Ma > 1$), e hipersônico ($Ma > 5$). O número de Mach é uma variável adimensional que representa a velocidade de um objeto através de um líquido

ou a velocidade de um fluido sobre um objeto em relação à velocidade do som no fluido. Bernoulli desenvolveu o seu princípio de observações sobre os líquidos, e sua equação é aplicável somente aos fluidos incompressíveis conforme a Equação 3.9.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g h_2 = cte \quad (3.9)$$

Assumindo que os pontos de medição estejam em uma tubulação horizontal ou ainda que as mudanças na altura acima de um plano de referência são insignificantes, pode-se desprezar as alturas h_1 e h_2 . Existem inúmeras equações, cada uma adaptada a um aplicativo específico, mas todas são análogas à equação de Bernoulli. Em velocidades muito baixas (talvez até 1/3 da velocidade do som no líquido) é possível usar os princípios fundamentais da física para desenvolver equações semelhantes aplicável aos fluidos compressíveis. A equação da continuidade estabelece que se a taxa de fluxo global de um sistema não está mudando com o tempo, então a taxa de fluxo em qualquer parte do sistema é constante. Uma forma adequada para uso em dinâmica de fluidos compressíveis pode ser dada pela Equação 3.10.

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \implies V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 \quad (3.10)$$

Dividindo a Equação 3.9 por ρ é possível determinar a velocidade do fluido na tubulação em função da pressão diferencial do gás gerada a montante e jusante da válvula de controle e a densidade do gás, conforme a Equação 3.11.

$$V_1^2 = V_2^2 + \frac{2 \Delta P}{\rho} \quad (3.11)$$

Substituindo a Equação 3.11 na Equação 3.10, obtem-se a Equação 3.12.

$$Q = A_1 V_1 = A_1 \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho(1 - (\frac{A_1}{A_2})^2)}} \quad (3.12)$$

A equação de Bernoulli não pode ser diretamente usada para escoamentos

reais, já que na prática há perda de carga por causa da viscosidade do fluido e da rugosidade da tubulação. Segundo (80), a Equação 3.12 é puramente teórica, principalmente pelo fato de se considerar que nas seções 1 (A_1) e 2 (A_2) as velocidades são uniformemente distribuídas e iguais a V_1 e V_2 , respectivamente. Um coeficiente adimensional de descarga C_d é incluído para levar em consideração esse fator. Os valores de C_d são resultado de estudos experimentais realizados para diversos tipos de restrições industrialmente empregados. De acordo com o mesmo autor, o coeficiente de descarga é definido como a razão real (Q_r) e a vazão teórica (Q_t), conforme a Equação 3.13.

$$C_d = \frac{Q_r}{Q_t} \quad (3.13)$$

A partir da Equação 3.13, define-se o coeficiente de vazão K , dado pelo produto do coeficiente de descarga C_d e pelo fator de velocidade de aproximação E , definida como a Equação 3.14:

$$K = C_d E \quad (3.14)$$

Onde o fator de velocidade de aproximação E é calculado pela Equação 3.15

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3.15)$$

O coeficiente β é definido pela relação entre diâmetro do medidor e da tubulação (ϕ medidor/ ϕ tubulação).

Aplicando a Equação 3.14 na Equação 3.12 é obtida a Vazão Corrigida (Q_c), conforme a Equação 3.16.

$$Q_c = K A_1 V_1 = K A_1 \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right)}} \quad (3.16)$$

Os coeficientes de descarga (C_d) e de vazão (K) são determinados empiricamente e tabelados em função do diâmetro interno dos tubos e o número de

Reynolds (Re) que é um parâmetro adimensional definido pela relação entre as forças de inércia (rugosas) do escoamento e as forças viscosas. (81). O número de Reynolds é definido pela Equação 3.17.

$$Re = \frac{\rho \vartheta D}{\mu} \quad (3.17)$$

Sendo:

- ϑ - velocidade média do fluido;
- μ - viscosidade dinâmica do fluido;
- ρ - massa específica do fluido;
- D - diâmetro interno do tubo.

O fator determinante nos escoamentos em tubulações é a perda de energia gerada pelos atritos internos do fluido e pelos atritos entre este e a tubulação. Neste caso estes atritos são gerados pelas asperezas das paredes dos tubos ou ainda em função da turbulência (movimento caótico das partículas) gerada em função de variações de direção ou da própria seção do escoamento. O número de Reynolds determina o regime de escoamento dos fluídos, que pode ser laminar ($Re < 2000$), crítico ($2000 \leq Re \leq 4000$) e turbulento ($Re > 4000$).

A correção do equacionamento utilizado em vazão de fluidos compressíveis para vazão de fluídos incompressíveis pode ser obtida multiplicando a Equação 3.16 por um fator de expansão isentrópico ε , conforme a Equação 3.18.

$$Q_{C_{comp}} = \varepsilon Q_{C_{incomp}} \quad (3.18)$$

Os valores de ε variam segundo a norma de medição adotada e também em relação aos pontos de tomada de pressão diferencial sobre o medidor. Pela norma ISO 5167/98 seu valor é dado pela Equação 3.19.

$$\varepsilon = 1(0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8)\left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{1}{k}}\right) \quad (3.19)$$

O fator de expansão ε representa as variações de densidade devido ao

fluido passar através de uma contração imposta pelo elemento primário.

3.7 Controlador Lógico Programável

O Controlador Lógico programável (CLP) é um dispositivo que foi inventado para substituir os circuitos seqüenciais de relés para controle de máquinas e/ou processos. Tais sistemas de controle, apesar de funcionais, apresentavam problemas de ordem prática bastante relevantes. Como as instalações possuíam uma grande quantidade de elementos, a ocorrência de uma falha qualquer significava o comprometimento de várias horas ou mesmo dias de trabalho de pesquisa e correção do elemento faltoso. Além disto, pelo fato dos relés apresentarem dimensão física elevada, os painéis ocupavam grande espaço, o qual deveria ser protegida contra umidade, das temperatura, gases inflamáveis, oxidações, poeira, etc. Outro fator ainda comprometedor das instalações a relés era o fato de que como a programação lógica do processo controlado era realizada por interconexão elétrica com lógica fixas (*hardwired*), eventuais alterações na mesma exigiam interrupções no processo produtivo a fim de se reconectarem os elementos. Interrupções estas nem sempre bem-vindas na produção industrial, como conseqüência ainda, tornava-se obrigatória a atualização das listas de fiação como garantia de manter a documentação do sistema.

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), o CLP é um equipamento eletrônico digital com *hardware* e *software* compatíveis com aplicações industriais. Para a Nema (*National Electrical Manufacturers Association*) é um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para o armazenamento interno de instruções para implementações específicas, tais como lógica, seqüenciamento, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.

3.7.1 Estrutura do CLP

Existem estruturas modulares, onde a unidade central de processamento (UCP) e todos os módulos de entrada e saída se encontram no mesmo *rack* e compactas, onde a UCP e todos os módulos de entrada e saída se encontram separados e vão sendo montadas nos *slots* em função da configuração exigida, mas ambas tem o mesmo princípio de funcionamento (82).

Um CLP é basicamente um pequeno computador dedicado, em sua estrutura física encontra-se:

- Unidade Central de Processamento - UCP
- Memória do tipo *ROM* para armazenamento do *Firmware* (programa onde se encontram os principais códigos de operação da máquina)
- Memória *RAM* para armazenamento de dados e programas do usuário.
- Dispositivos de entrada e saída para a comunicação com o exterior

3.7.2 Memória do CLP

O mapa de memória de um CLP possui uma organização fixa ou seja, existe alocação reservada para entradas, saídas e outras variáveis. Dependendo da necessidade, existem varias configurações de tamanho dessas memórias. O sistema de memória é uma parte de vital importância no processador de um CLP, pois armazena todas as instruções assim como todos os dados necessários para executá-las. Há diferentes tipos de sistemas de memória. A escolha de um determinado tipo de memória depende do tipo de informação que se deseja armazenar e da forma como a informação será processada pela UCP. As informações armazenadas num sistema de memória são chamadas palavras de memória e são formadas sempre pelo mesmo número de bits. A capacidade de memória de um CLP é definida em função do número de palavras de memória previstas para o sistema e pode ser representada por um mapa chamado mapa de memória (82).

A Tabela 3.3 mostra alguns tamanhos de memória dos CLP.

Tabela 3.3: Exemplo de Espaços de Memória dos CLP's (84).

Tamanho da Memória	Tipo	Binário	Decimal
8	byte	2^8	255
16	word	2^{16}	65535
32	double word	2^{32}	4294967295

Mapa de memória de um controlador programável pode ser dividido em cinco áreas principais.

- Memória Executiva (*ROM e PROM*): Armazena o sistema operacional, o qual é responsável por todas as funções operacionais do CLP.
- Memória do Sistema (*RAM*): Armazena resultados e/ou informações intermediários, gerados pelo sistema operacional.
- Memória de *Status* (*RAM*): Armazena o estado dos sinais de entrada e saída.
- Memória de Dados(*RAM*) . Armazenar dados referentes ao programa do usuário.
- Memória do Usuário (*RAM e EPROM*): Armazena o programa de controle desenvolvido pelo usuário.

3.7.3 Linguagens de Programação

Desde o seu aparecimento até hoje, muita coisa evoluiu nos controladores lógicos. Esta evolução está ligada diretamente ao desenvolvimento tecnológico da informática em suas características de *software* e de *hardware*. O que no seu surgimento era executado com componentes discretos, hoje se utiliza de microprocessadores e microcontroladores de última geração, usando técnicas de processamento paralelo, inteligência artificial, redes de comunicação, fieldbus. Até recentemente, não havia nenhuma padronização entre fabricantes, apesar da maioria utilizar as mesmas normas construtivas. Porém, pelo menos ao nível de *software* aplicativo, os controladores programáveis

podem se tornar compatíveis com a adoção da norma IEC 1131-3, que prevê a padronização da linguagem de programação e sua portabilidade.

3.7.3.1 Norma IEC 61131-3

A norma IEC 61131 representa uma combinação e continuação de diferentes normas internacionais (IEC 50, IEC 559, IEC 617 - 12, IEC 617-13, IEC 848, ISO / AFNOR, ISO / IEC 646, ISO 8601, 7185, ISO 7498). Estas incluem regras sobre o código de caracteres utilizado, a definição da nomenclatura utilizada ou a estrutura das representações gráficas (83). A norma IEC 61131 já está no mercado desde 1992, quando suas primeiras partes foram publicadas. Sua adoção pelos diversos fabricantes de sistemas de controle é uma realidade inegável, principalmente da parte 3, a mais conhecida. Entretanto, as diversas implementações da norma possuem diferenças que não comprometem seus principais benefícios, mas dificultam o entendimento por parte dos usuários.

Com o objetivo de padronizar a linguagem na descrição dos sistemas automatizados a norma IEC 61131-3, estabelecida pelo *International Electrotechnical Commission* (IEC), instituiu uma nomenclatura internacional para sistemas automáticos. Essa norma divide um sistema automatizado em duas partes distintas:

- **Parte Operativa (OP)**: corresponde ao processo físico a automatizar que opera sobre a matéria-prima e o produto. É constituída pelos atuadores, que realizam as operações, agindo sobre componentes e dispositivos de automação, tais como válvulas, atuadores, motores, lâmpadas, etc.
- **Parte Comando (PC)**: caracteriza-se por receber as informações vindas do operador e/ou do processo a ser controlado e por emitir informações ao sistema controlado, coordenando assim, as ações da parte operativa.

A parte três da norma IEC 61131 é dividida basicamente em duas sub-

partes: Elementos comuns e Linguagens de Programação. Apesar das linguagens de programação serem mais difundidas no mercado de automação industrial, os elementos comuns definem as principais características da IEC 61131-3. Cada uma das cinco linguagens de programação deve trabalhar com todos os elementos comuns definidos pela norma. As cinco linguagens definidas pela norma são:

- Textuais: Lista de Instruções (IL) e Texto Estruturado (ST)
- Gráficas: Diagrama *Ladder* (LD) e Diagrama de Blocos Funcionais (FBD)
- Estruturação de Programas (Textual ou Gráfica): Seqüenciamento Gráfico de Funções (SFC)

3.7.4 Interfaces de Comunicação dos CLP

3.7.4.1 Módulos de Entradas e Saídas Digitais

Os módulos de entradas e saídas são interfaces entre os elementos de campo (sensores e atuadores) e a lógica de controle de um controlador programável. Estes módulos são constituídos de cartões eletrônicos, cada qual com capacidade para receber um certo número de variáveis.

O objetivo principal da interface é permitir que os diferentes sinais recebidos ou enviados dos dispositivos em campo sejam reconhecidos pela UCP. Os sinais recebidos de sensores são, por exemplo, os botões, interruptores de limite, sensores analógicos, selectores e interruptores *thumbwheel* que são conectados a terminais sobre as interfaces de entrada. Os dispositivos que serão controlados, como motores acionadores de partida, válvulas solenóides, lâmpadas, válvulas e posição, estão ligados aos terminais das interfaces de saída. A fonte de alimentação do sistema fornece todas as tensões necessárias para o bom funcionamento da UCP, alimentação da interface e chaveamento dos módulos de entrada e saída. Na Figura 3.11 pode visto o esquema de interface das entradas e saídas do CLP.

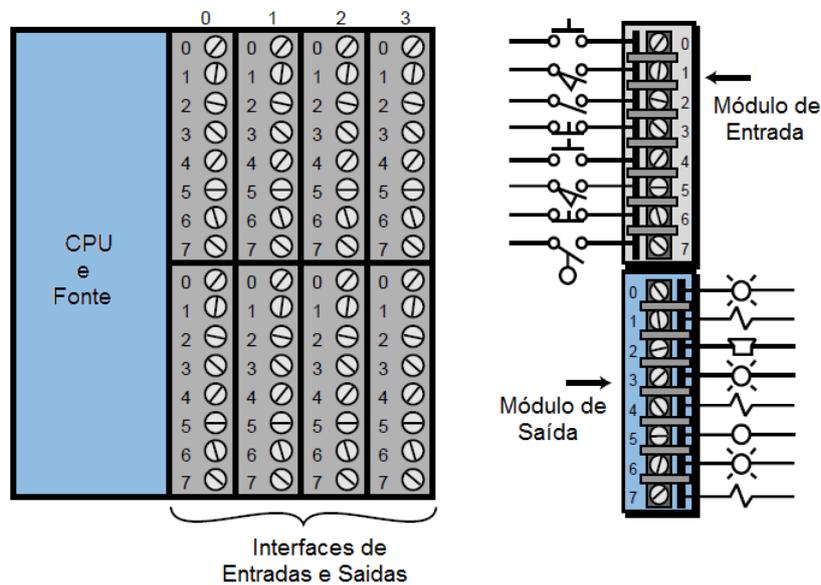


Figura 3.11: Interface de Entradas e Saídas (84).

Existe uma variedade muito grande de tipos de cartões, para atender às mais variadas aplicações nos ambientes industriais. Mas apesar desta grande variedade, os elementos que informam a condição de grandeza aos cartões, são dos tipos:

- Elemento Discreto: Trabalha com dois níveis definidos;
- Elemento Analógico: Trabalha dentro de uma faixa de valores.

As entradas digitais são encontradas em tensão contínua (geralmente 24 Vdc) ou em corrente alternada (110 V ou 220 V).

As entradas em corrente contínua possuem duas formas de chaveamento, sendo uma utilizada para sensores que possuem a configuração NPN ("negativo para a entrada"), que permite um fluxo de corrente da entrada para o potencial negativo da fonte de alimentação e outra PNP ("positivo para a entrada"), que permite um fluxo de corrente do potencial positivo da fonte de alimentação para a entrada. Nas Figuras 3.12 e 3.13 são mostradas as configurações de entradas em corrente contínua NPN e PNP respectivamente.

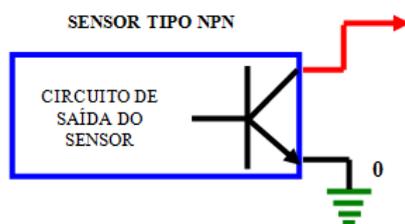


Figura 3.12: Configuração de Entrada NPN (83).

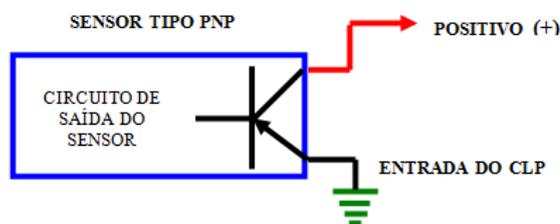


Figura 3.13: Configuração de Entrada PNP (83).

Os Módulos ou Interfaces de Saída adequam eletricamente os sinais vindos do microprocessador para que possam atuar nos circuitos controlados. As saídas digitais admitem apenas dois estados : ligado e desligado, e podem ser construídas de três formas básicas : Saída digital à relé , saída digital à transistor e saída digital à triac.

De acordo com o tipo de elemento de comando da corrente das saídas, estas apresentam características que as diferem como as seguintes:

- Transistor - promove comutações mais velozes, mas só comporta cargas de tensão contínua
- Triac - tem maior vida útil que o tipo a contato seco, mas só pode acionar cargas de tensão alternada
- Contato seco (relé) - pode acionar cargas alimentadas por tensão tanto contínua quanto alternada.

3.7.4.2 Módulos de Entradas e Saídas Analógicas

A interface de entrada analógica contém os circuitos necessários para receber sinais analógicos de tensão ou corrente dos dispositivos de campo. A tensão ou a corrente de entrada é convertida para um código digital proporcional ao valor analógico, através de um conversor analógico digital (A/D). Este código digital é armazenado na memória imagem do controlador como um registro. O valor analógico é geralmente expresso como um valor decimal (BCD). A resolução das entradas analógicas é uma informação importante,

pois de acordo com o número de bits do conversor A/D é que se define a menor parcela que pode ser lida. Ou seja, uma entrada com um maior número de bits permitirá uma melhor representação da grandeza analógica. Os conversores A/D normalmente são de 10 ou 12 bits. As faixas de valores de tensão e corrente para entradas analógicas mais utilizadas na indústria são:

- 0 a 20 mA;
- 4 a 20 mA;
- 0 a 50 mA;
- 1 a 5 Vdc;
- 0 a 10 Vdc;
- -10 a 10 Vdc.

3.7.4.3 Módulo PID

O módulo de controle proporcional-integral-derivativo (PID) é uma interface utilizada no processo que requer aplicações de controle em malha fechada contínua empregando o algoritmo PID. Esses módulos fornecem ações proporcional, integral e derivativa, que controlam parâmetros das variáveis de entrada do sistema, tais como pressão, nível, vazão e temperatura.

O módulo PID recebe a variável de processo em formato analógico e calcula a diferença de erro entre o valor real e o valor de *setpoint*. Em seguida, usa essa diferença de erro no cálculo do algoritmo utilizado para iniciar a correção do desvio através da manipulação de uma variável de saída do controle.

Primeiro, o módulo formula uma ação de controle proporcional com base em uma saída variável de controle que é proporcional ao valor de erro instantânea. Em seguida, o módulo PID inicia uma ação de controle integral para fornecer ajuste adicional para a variável de controle de saída. Isto provoca uma alteração na variável do processo em proporção ao valor do erro durante um período de tempo. Finalmente, o módulo inicia uma ação de

controle derivativo adicionando ainda mais a compensação para a saída do controle. Esta ação provoca uma mudança na variável de controle de saída proporcional à taxa de variação do erro. Estas três etapas fornecem a ação de controle desejado.

Dependendo do módulo utilizado, as interfaces PID também podem receber os dados sobre o tempo de atualização da zona morta e do erro. O tempo de atualização é a taxa ou período em que a variável de saída é atualizada. Além disso, alguns módulos também fornecem cálculos de raiz quadrada da variável de processo. Para fornecer este cálculo, o módulo executa uma extração da raiz quadrada da variável do processo para obter uma saída linearizada, que depois é usado pelo algoritmo PID. A Figura 3.14 mostra o diagrama de blocos do algoritmo PID que utiliza uma função de raiz quadrada e um compensador *lead-lag*, que é um componente do sistema de controle que melhora a resposta de frequência indesejável em um sistema de controle *feedback*.

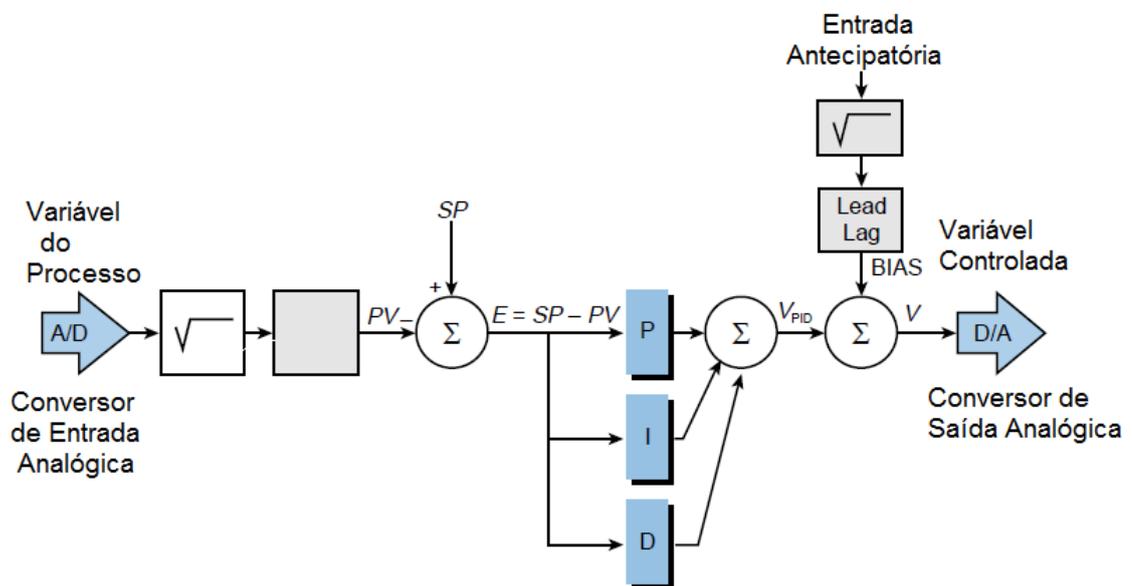


Figura 3.14: Diagrama PID com raiz quadrada (83).

3.7.4.4 Módulos de Interface de Rede

Os módulos de interface de rede permitem uma série de CLP e outros dispositivos inteligentes a comunicar e transmitir dados em alta velocidade. Atualmente, muitos fornecedores fabricam produtos que são compatíveis com diferentes ambientes de rede de CLP. Entre as mais populares redes estão:

- Nível de dispositivo redes de autocarros (por exemplo, *CANbus*, *Seriplex*, etc), que são usadas por dispositivos discretos
- Processo de redes de campo (por exemplo, *Fieldbus* e *Profibus*), que são usados por dispositivos analógicos;
- Redes *Ethernet* / IEEE 802.3, usadas pelos CLP, CPU e computadores;
- Redes proprietárias;

Através do módulo de interface de rede toda a comunicação necessária (conexões e protocolos) permite que uma mensagem seja repassada na rede. Em geral, quando um processador ou outro dispositivo de rede envia um mensagem, sua interface de rede transmite a mensagem através da rede na velocidade da rede que estabelecida pela taxa de transmissão. A interface de rede receptora aceita a transmissão e passa as informações para a UCP e, se necessário, envia uma comando para o dispositivo de campo pretendido. Dependendo do tipo e configuração da rede, um módulo de rede pode ser conectado a uma distância de até 3048 m, com 100 a 1000 dispositivos (Nós). Na Figura 3.15 pode ser visto uma rede de comunicação.

Independentemente do tipo de periférico e rede utilizada, deve-se conectar os dispositivos ao CLP através de um meio físico.

Para que a comunicação entre o CLP e o PC se concretize, é necessário que dois aspectos sejam observados quanto ao *hardware* e *software*. quando se fala em *hardware* de comunicação, normalmente as UCP possuem pelo menos uma porta serial que pode ser conectada a dispositivos externos. A quantidade pode variar de acordo com o modelo e o fabricante dos CLP's. (84).

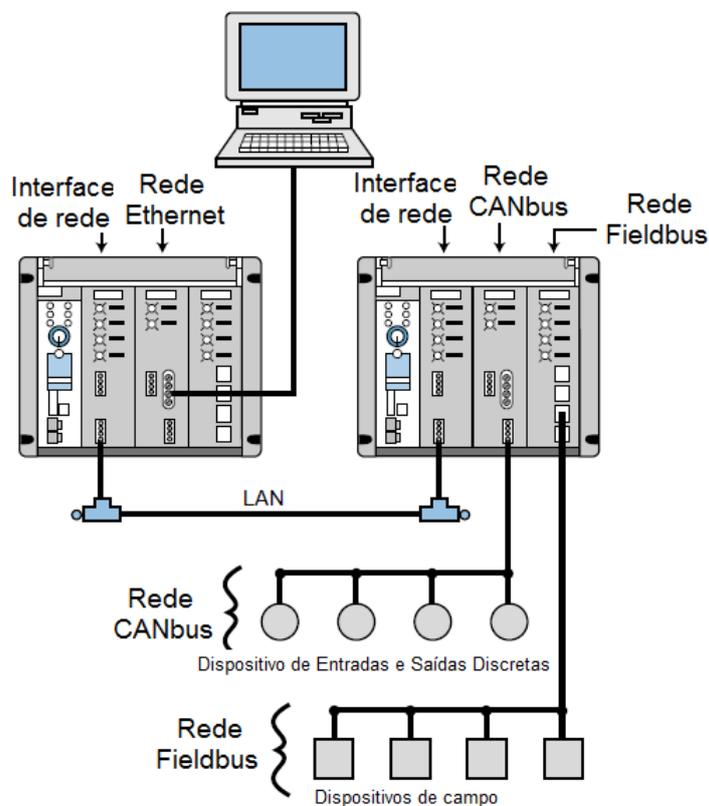


Figura 3.15: Rede de comunicação (83).

Para tornar equipamentos diferentes compatíveis entre si, vários padrões de nível físico foram desenvolvidos. Os mais usuais são: RS-232, RS-422 e RS-485 (RS é uma abreviação de *Recommended Standard*), que relata a padronização de uma interface comum para comunicação de dados entre equipamentos, criados pela *Electronic Industries Association* (EIA). Os padrões RS-232, RS-422 e RS-485 definem características mecânicas, elétricas, funcionais e procedurais para ativar, manter e desativar conexões físicas que se destinam a transmitir bits entre dois dispositivos. Segundo (82) os principais características citadas pela (EIA) para estabelecer a comunicação são:

- Características mecânicas: definem o tamanho e a forma dos conectores, pinos, cabos, que compõem um circuito de transmissão
- Características elétricas: especificam os valores dos sinais elétricos (níveis de tensão e corrente) usados para representar bits, o tempo entre

mudanças desses valores. Determinam também as taxas de transmissão e distâncias que podem ser atingidas.

- Características procedurais: especificam combinações e seqüências de sinais que devem ocorrer para que uma interface do nível físico cumpra o seu papel de receber e transmitir bits.

O meio físico RS232 nada mais é que um conjunto de normas que definem comunicação serial ponto a ponto entre dois dispositivos. A norma RS232 define os níveis de tensão, a temporização, o protocolo de troca de dados e a disposição mecânica dos conectores. A interface RS232 tem como principal atrativo a sua implementação simples e barata, sendo disponível como padrão na maioria dos computadores atuais e antigos. As principais limitações da interface RS232 se devem ao fato de mesma operar por níveis de tensão, sendo extremamente suscetível a ruídos, o que inviabiliza a comunicação de maneira confiável em distâncias superiores a 10 ou 15 metros. Outra limitação é que o padrão RS232 foi desenvolvido para ser uma comunicação ponto a ponto, não permitindo que mais de dois dispositivos usem a mesma "linha de dados".

O padrão RS422 é uma evolução do padrão RS232 e tem como principal novidade a implementação de linhas de transmissão balanceadas, o que torna a comunicação extremamente imune a ruídos, permitindo o envio de informações à distâncias de até 1200 metros de maneira extremamente confiável. O padrão RS422 é mais utilizado em comunicações ponto a ponto, embora seja possível utilizar o mesmo em pequenas redes. Para operação em rede o número máximo de dispositivos que podem ser conectados é limitado pois cada circuito de saída RS422 pode ser ligado no máximo a 10 entradas. Também não é possível a utilização de um único par de fios para operar como "barramento" ou seja, os dados são transmitidos por uma linha e recebidos por outra. O principal uso do padrão RS422 é para estender a comunicação RS232 a grandes distâncias, de maneira transparente ao usuário sem a necessidade de alterar programação e protocolos.

O meio RS485 é uma evolução do padrão RS422, tendo como principal enfoque a comunicação em rede, ou seja, com apenas um par de fios é possível se comunicar com diversos equipamentos em rede usando o mesmo barramento.

Assim como o RS422, o RS485 utiliza linha de dados balanceada, bastante similar às linhas de dados da interface RS422, logo também permite comunicação em distâncias de até 1200 metros de maneira extremamente confiável.

O fluxo de dados podem ser divididos em:

- Canal *simplex*: canal no qual a direção de transmissão é inalterada;
- Canal *half-duplex*: é um canal físico simples no qual a direção pode ser revertida. As mensagens podem fluir nas duas direções, mas nunca ao mesmo tempo;
- Canal *full-duplex*: permite que mensagens sejam trocadas simultaneamente em ambas as direções. Pode ser visto como dois canais *simplex*, um canal direto e um canal reverso.

Nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6 é dada as especificações da comunicação serial RS232, RS 422 e RS485, respectivamente.

Tabela 3.4: Especificação da comunicação serial RS232 (83).

Tipo de Rede	Ponto a Ponto
Distância Máxima	15m
Máxima Taxa de Transmissão	20kbps
Nível Elétrico	nível lógico 0 (+5V à +15V) nível lógico 1 (-5V à -15V)
Conectores	DB25 (por norma) DB9 (usual)
Canal de comunicação	<i>full-duplex</i> (possibilidade <i>half-duplex</i>)

Tabela 3.5: Especificação da comunicação serial RS422 (83).

Tipo de Rede	Ponto a Ponto
Distância Máxima	1200m
Máxima Taxa de Transmissão	10M
Nível Elétrico	nível lógico 0 (+5V à +15V) nível lógico 1 (-5V à -15V)
Conectores	DB25 (por norma) DB9 (usual)
Canal de comunicação	<i>full-duplex</i>

Tabela 3.6: Especificação da comunicação serial RS485 (83).

Tipo de Rede	multi-ponto (até 32 transmissores ou receptores)
Distância Máxima	1200m
Máxima Taxa de Transmissão	10M bps
Nível Elétrico	nível lógico 0 (+5V à +15V) nível lógico 1 (-5V à -15V)
Conectores	não definido
Canal de comunicação	<i>half-duplex</i>

3.7.5 Protocolos de comunicação

Protocolos de comunicação são conjuntos de regras que definem a forma como os dispositivos devem se comunicar. Existem protocolos que definem desde as características físicas de interligações entre dispositivos, até como deve ocorrer o gerenciamento das mensagens.

Para (82) os protocolos de comunicação podem ser divididos em 3 níveis, conforme a Figura 3.16.

Nível de Planta: no nível da planta temos a supervisão e gerenciamento de todo processo que normalmente ocorre através de um *software* supervisor. De uma forma resumida, as ações associadas a este nível são:

- Supervisão
- Comando
- Planejamento
- Banco de Dados.

Nesse nível pode-se citar como exemplo as redes: *Profnet*, *Ethernet/IP* e *Fieldbus Foundation HSE*.

Nível de Controle: este nível permite o controle sobre as ações do nível de campo em função das definições e comandos dados pelo nível da planta. De uma forma resumida, as ações associadas a este nível são:

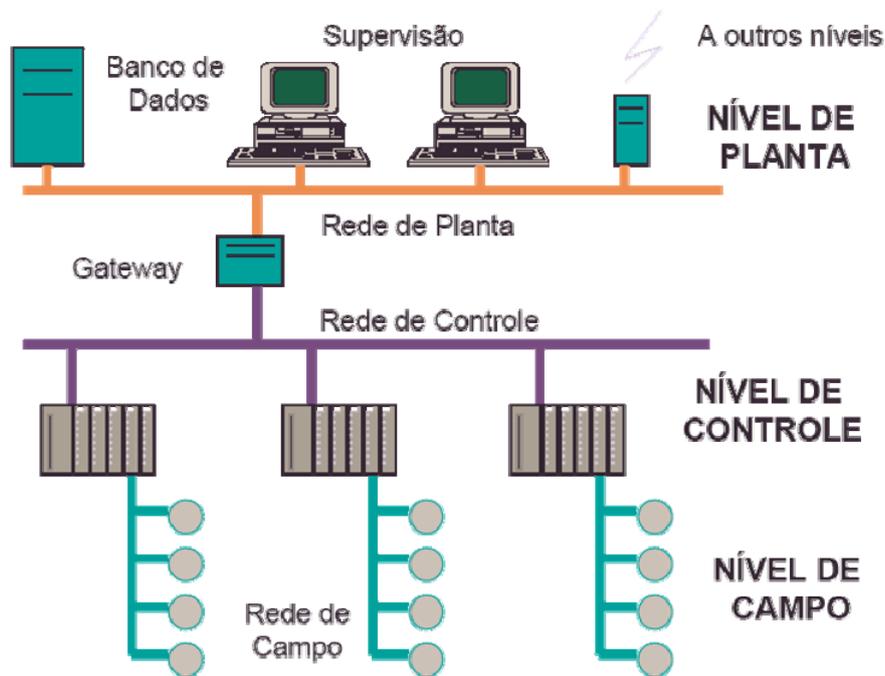


Figura 3.16: Níveis de Rede (83).

- Controle em tempo real
- Segurança
- Interface

Nesse nível pode-se citar como exemplo as redes: *Profibus FMS*, *Modbus*, *APR03M* e *Controlnet*.

Nível de Campo: As redes que fazem parte deste nível constituem a base na hierarquia da comunicação industrial. Através deste nível torna-se possível a aquisição e atuação direta dos dados de chão de fábrica como valor de pressão, situação de um motor, ligamento e desligamento de uma válvula. De uma forma resumida, as ações associadas a este nível são:

- Aquisição das variáveis
- Atuação sobre equipamentos.

Nesse nível pode-se citar como exemplo as redes: *Profibus DP e PA*, *AS-Interface*, *Interbus*, *Devicenet*, *APR03M* e *Fieldbus Foundation H1*.

Na Tabela 3.7, seguem abaixo as características principais entre os níveis de rede:

Tabela 3.7: Principais características entre os níveis de rede (83).

Característica	Planta	Controle	Campo	Sensor
Tamanho da Mensagem	Mbytes	Kbytes	bytes	bits
Tempo de Resposta	Segundos	5 a 100ms	ms	Micro segundos
Distância Máxima	Sem Limitação	1Km	1Km	100m
Redundância	sim	sim	sim	não
Áreas Classificadas	não	não	sim	sim
Meio Físico	Elétrico e Óptico	Elétrico e Óptico	Elétrico e Óptico	Elétrico e Óptico
Cobertura Geográfica	Grande	Grande	Média	Pequena

Num ambiente industrial, cada vez mais complexo e competitivo, os fatores relacionados com a disponibilidade e segurança da informação assumem elevada relevância, tornando-se necessário garantir que a informação esteja disponível e segura quando necessária, independentemente da localização geográfica. Torna-se portanto necessário implementar mecanismos de acessibilidade, mecanismos de segurança e mecanismos de tolerância a falhas. O supervísório é visto como o conjunto de programas gerado e configurado no programa básico de supervisão, implementando as estratégias de controle e supervisão, que têm recursos como as telas gráficas de interfaceamento homem-máquina, a aquisição e tratamento de dados do processo, a gerência de relatórios e alarmes.

3.8 *Softwares* Supervisórios

Os sistemas supervísórios são programas que permitem monitorar e controlar diversas variáveis de uma planta de processo. Os sistemas supervísórios podem ter uma arquitetura aberta, ligados em rede, permitindo que o fluxo

de dados do processo ultrapasse o limite das paredes da empresa e percorra o mundo através dos meios de comunicação existentes. Existem atualmente vários sistemas supervisórios conhecidos no mercado:

- Fix - Fabricante Intellution;
- Intouch - Fabricante Wonderware ^{MR} Corporation;
- Wizcon - Fabricante Emation;
- RSView - Fabricante Rockwell Automation;
- Unisoft - Fabricante Factory Link;
- Elipse - Fabricante Elipse;
- Gênese - Fabricante Iconics;
- Microcomputing - Fabricante Siemens;
- Cimplicity - Fabricante Ge-fanuc.

Apesar de existirem diferentes fabricantes de *softwares* supervisórios, os mesmos possuem características semelhantes, capazes de atender pré-requisitos básicos funcionais de um projeto. Dentre as principais características podem-se citar:

- Interface de dados amigável, ou seja, apresentar visualização gráfica que facilite o entendimento do operador do sistema;
 - Geração automática de relatórios, com o controle estatístico do sistema;
 - Histórico de tendências (acompanhamento das variáveis controladas);
 - Facilidade para interação com outros aplicativos (*software*);
 - Acesso automático a banco de dados;
 - Acesso compartilhado e remoto;
 - Conexão em rede e por meio de modem ou rádio;
-

- Gerenciamento das condições de alarme.

Para se efetuar uma boa escolha de um *software* de supervisão, é necessário avaliar o produto, o sistema operacional, a confiabilidade do fabricante e do distribuidor, além do suporte local e dos drivers de comunicação disponíveis. Com a necessidade de distribuir a informação para a área corporativa da empresa, esta escolha se torna muito mais importante. A menos de cinco anos, os principais fornecedores de *softwares* de supervisão eram empresas, como é o caso da *Wonderware*, *Iconics*, *Intellution*. No ano de 1998, alguns fabricantes de *Hardware* entraram no mercado, como é o caso da G.E. *Fanuc*, *Allen-Bradley*, *Siemens*. Algumas empresas de consultoria e revistas como a *Control Engineering* e a *Intech*, dividem os *softwares* de supervisão em dois grupos:

- **MMI** (*Man Machine Interface*)

Os *softwares* que têm a finalidade de servir como uma Interface Homem Máquina, ou seja, estes *softwares* não têm a finalidade de controlar nenhuma parte da máquina ou processo, ou seja, se ocorrer qualquer problema durante a sua execução, não prejudicará a automação da máquina ou processo. Normalmente estes *softwares* apresentam facilidades de configuração, mas normalmente estão limitados em segurança de dados, comunicação em rede, comunicação remota, controles de processo. Os softwares *Intouch*, *RS-View 32*, *Cimplicity*, *Elipse MMI* e *Unisoft* fazem parte deste tipo.

- **SCADAS** (*Supervisory Control and Aquisition Data System*)

As versões de *softwares* que possuem as mesmas funções dos *softwares* MMI mas podem efetuar controle, distribuir informações entre estações via rede com performance e segurança. Estes *softwares* normalmente são mais robustos e confiáveis para aplicações de grande porte e para aplicações distribuídas em varias estações. No Brasil os principais produtos que possuem estas características são: *FactoryLink*, *FIX*, *Wizcon*, *Genesis*, *WinCC*, *Citect* e *Elipse SCADA*.

3.8.1 Supervisórios *SCADA*

Os primeiros sistemas SCADA, basicamente telemétricos, permitiam informar periodicamente o estado corrente do processo industrial, monitorizando sinais representativos de medidas e estados de dispositivos, através de um painel de lâmpadas e indicadores, sem que houvesse qualquer interface aplicacional com o operador.

Atualmente os sistemas SCADA utilizam tecnologias de computação e comunicação para automatizar a monitorização e controle dos processos industriais, efetuando a aquisição de dados em ambientes complexos, eventualmente dispersos geograficamente com apresentação de telas de modo amigável para o utilizador, com recurso a interfaces Homem-Máquina.

Os sistemas SCADA melhoram a eficiência do processo de monitorização e controle, disponibilizando em tempo útil o estado atual do sistema, através de um conjunto de previsões, gráficos e relatórios, de modo a permitir a tomada de decisões operacionais apropriadas, quer automaticamente, quer por iniciativa do operador.

O Elipse *Windows* é um *software* para a criação de aplicativos de supervisão e controle de processos nas mais diversas áreas. Totalmente configurável pelo usuário, permite monitorar variáveis de processo em tempo real, através de gráficos e objetos que estão relacionados com as variáveis físicas de campo. Além disso, o usuário pode fazer acionamentos e enviar ou receber informações para os equipamentos de aquisição de dados. É possível ainda realizar cálculos através de utilização de linguagem de programação, criar bases de dados históricas, relatórios, receitas, e inclusive supervisionar e controlar um processo à distância.

Para a execução do Elipse SCADA, é exigido um computador (PC) compatível com a seguinte configuração:

- Processador *Pentium* 200 MHz ou superior (ou equivalente);
 - 32 MB de memória *RAM* (64 MB recomendado);
 - Monitor e placa de vídeo com resolução 640x480;
 - 10 MB de espaço livre em disco;
-

- *Microsoft Windows* (XP, vista e Seven);
- Porta paralela ou USB.

O *software* está disponível em quatro módulos: *View*, *MMI*, *Professional* e *Power*. Todos os módulos acima possuem versão Configurator, *Runtime*, e *Master*. O Configurator é destinado ao desenvolvimento de aplicações de supervisão de processos. Para a realização de testes, o Configurator permite rodar aplicações por até dez minutos. O *Runtime* é utilizado para rodar aplicativos de supervisão de processos após estes terem sido desenvolvidos com o uso do Configurator. O *Master* agrega na mesma ferramenta um módulo de Configurator e um *Runtime*, permitindo portanto a configuração e execução num só produto. Quando na ausência de um dispositivo de proteção (*hardkey*), o software pode ser executado em modo de demonstração.

Ainda como módulos adicionais, existem mais duas ferramentas que podem trabalhar em conjunto com qualquer dos produtos acima mencionados, que são o *Eclipse Watcher* e *Eclipse Web*.

O *Eclipse Watcher* é um "*Add-on*" para a monitoração, registro e transmissão digital de imagens em tempo real, possibilitando a visualização de imagens com tamanho e definição programáveis pelo usuário, além de permitir a criação de banco de dados de imagens com busca por período ou evento e transmissão de imagens em tempo real para estações remotas via rede local ou linha discada. Já o *Eclipse Web* trata-se de um servidor de aplicações de supervisão para a Internet, onde através de um navegador como o *Netscape* ou *Internet Explorer* é possível conectar-se a uma estação e receber/enviar dados em tempo real (85).

3.8.2 Estimadores de Mínimos Quadrados

Karl Friedrich Gauss formulou o princípio dos mínimos quadrados (MMQ) ao final do século 18 para prever a trajetória de planetas e cometas a partir das observações realizadas. Gauss estabeleceu que os parâmetros desconhecidos de um modelo matemático deveriam ser selecionados de modo que o valor mais provável das grandezas desconhecidas é a que minimiza a soma dos quadrados da diferença entre os valores atualmente observados e os valores

calculados multiplicados por números que medem o grau de precisão, onde quanto mais precisa a medida, maior a ponderação (86).

O método dos mínimos quadrados é usado geralmente para o cálculo de regressões lineares em conjuntos de dados estatísticos. O MMQ é um processo de busca dos coeficientes que minimizam a soma dos quadrados dos resíduos. Para tanto, uma das condições é que a forma escolhida para a equação seja adequada. O MMQ minimiza a soma dos quadrados dos resíduos. Quando a distribuição dos resíduos é normal, as estimativas de máxima probabilidade podem ser encontradas pelo Método dos Mínimos Quadrados. Neste caso, sob as condições básicas, as estimativas do MMQ para os coeficientes da equação são as estimativas lineares não-tendenciosas de mínima variância.

A aproximação por mínimos quadrados consiste em encontrar a função que "melhor se ajuste", ao conjunto de pontos dado e/ou coletados, minimizando o erro resultante do ajustamento, ou seja, pretende-se minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores obtidos pela aproximação (25). O estimador de mínimos quadrados pode ser dado pela Equação 3.20.

$$\theta = [\phi^T \phi]^{-1} \phi^T Y \quad (3.20)$$

Onde:

- θ - Estimador de Mínimos Quadrados;
- $\phi^T \phi$ - Dimensão ;
- Y - Função linear das medidas.

O estimador dos mínimos quadrados é uma transformação linear sobre Y e, assim, é denominado estimador linear (87).

3.8.3 Estimadores de Mínimos Quadrados Recursivo

Na implementação de um controle adaptativo em tempo real, o algoritmo do estimador de parâmetros deve ser interativo, com o modelo do sistema sendo atualizado a cada período de amostragem, quando novas medidas estão

disponíveis, ou seja, adequar-se às características do processo controlando ou resintonizar-se caso existam variações na dinâmica do processo.

O método de estimação dos mínimos quadrados recursivo (MQR) é um dos mais populares e comumente utilizado em esquemas de identificação de parâmetros (87), onde a quantidade de dados armazenados no estimador recursivo é pequeno se comparado com o estimador não-recursivo.

Os algoritmos Recursivos (MQR) utilizam pouca memória e pequeno esforço computacional. Em cada período de amostragem, novas medidas tornam-se disponíveis e são utilizadas com o modelo atual para gerar um novo erro de modelagem (87).

Em cada período de amostragem, novas medidas tornam-se disponíveis e são atualizadas com o modelo atual para gerar um novo modelo estimado. Por exemplo, no instante de tempo $(t+1)$, novas medidas $u(t+1)$ e $y(t+1)$ ocorrem. Em vez de recalcular o estimador dos mínimos quadrados, é interessante atualizar as estimativas anteriormente calculadas no instante t , $\theta(t)$, para obter novas estimativas $\theta(t+1)$.

Outros nomes atribuídos na literatura ao estimador recursivo são: estimação sequencial, identificação em tempo real, identificação *on-line*.

A forma recursiva é dada pela Equação 3.21, os parâmetros de ganho do estimador e covariância podem ser calculados através das Equações 3.22 e 3.23 respectivamente (87).

$$\theta(t+1) = \theta(t) + K(t+1)[y(t+1) - \varphi^T(t+1)\theta(t)] \quad (3.21)$$

Onde:

- $\theta(t+1)$ - Estimador de Mínimos Quadrados Recursivos;
- φ^T - Vetor de Medidas;
- $\theta(t)$ - Vetor de Parâmetros ;

$$K(t+1) = \frac{P(t)\varphi(t+1)}{1 + \varphi(t+1)P(t)\varphi(t+1)} \quad (3.22)$$

Onde:

- $K(t + 1)$ - Ganho do Estimador;

$$P(t + 1) = P(t) - \frac{P(t)\varphi(t + 1)\varphi^T(t + 1)P(t)}{1 + \varphi(t + 1)P(t)\varphi(t + 1)} \quad (3.23)$$

Onde:

- $P(t + 1)$ - Matriz de Covariância;
-

Capítulo 4

Planta de Produção de Biogás e Eletricidade

No presente capítulo são apresentados os equipamentos utilizados, as etapas de instalação do biodigestor, desenvolvimento das telas do sistema de supervisão e automação realizados na planta de produção de biogás do Laboratório de Energias Alternativas - LEA da Universidade Federal do Ceará - UFC.

4.1 Planta de Biogás

A integração dos centros de Tecnologia e de Ciências Agrárias parte de duas premissas: energia e agricultura sustentável. Para o Centro de Tecnologia, o esterco gerado pelos animais apresenta-se como uma solução, sendo a matéria-prima para a geração de energia através do biogás. Porém, após a utilização desses dejetos no biodigestor tem-se o biofertilizante, que é uma solução para a área de agronomia, onde é utilizado como adubo orgânico nas plantações.

A Figura 4.1 mostra a integração e os produtos gerados entre os centros de pesquisa, assim como se apresentam os problemas e as soluções referentes à esses produtos.

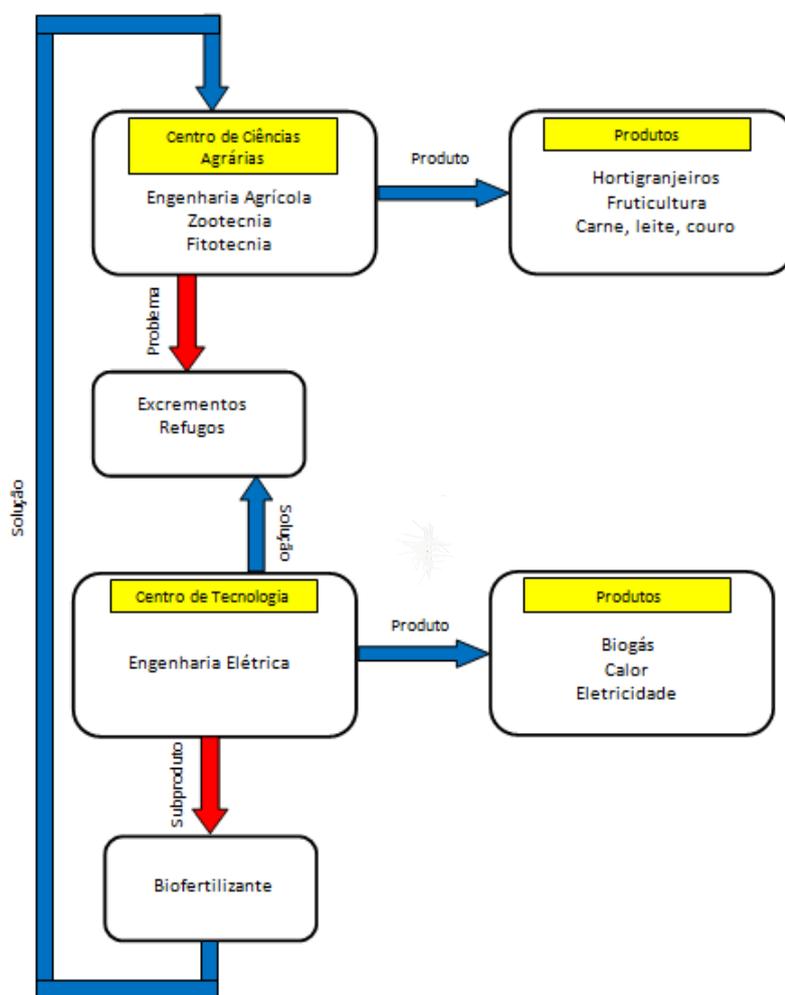


Figura 4.1: Integração e produtos dos centros de pesquisa.

Dentre os Departamentos do Centro de Ciências Agrárias, o que possuem produtos comuns para a integração com o Centro de Tecnologia são: Engenharia Agrícola, Zootecnia e Fototecnia, pois analisando as matérias-primas utilizadas nos processos dos centros, constata-se que o refugo ou subproduto gerado em cada área corresponde a necessidade do outro.

Na Figura 4.1, observa-se que os produtos dos departamentos de Engenharia Agrícola, Zootecnia e Fitotecnia são hortigranjeiros, frutas, carnes, leite e couro, mas que no processo de produção desses produtos é gerado os excrementos e refugos, tais materiais quando não utilizados podem propor-

cionar doenças e odores desagradáveis. Porém, para o Centro de Tecnologia (Engenharia Elétrica) esses excrementos e refugos podem se apresentar como uma solução sendo utilizado como matéria-prima para os biodigestores.

Através do biodigestor é produzido o biogás para gerar calor e eletricidade além do biofertilizante que poderá ser utilizado como adubo orgânico novamente no Centro de Ciências Agrárias. Dessa forma, o ciclo de integração é reiniciado.

A planta de biogás do LEA é composta por um biodigestor do tipo tubular, válvulas de fechamento com acionamento manual (gaveta e esfera), conjunto motor/gerador, sistema de controle com CLP e módulos de expansão (analógicos e digitais), sistema de monitoramento com computador e programa de supervisão (Eclipse SCADA) e sistema de controle de vazão composto por válvula de controle proporcional de vazão, sensores de vazão, pressão e temperatura.

A Figura 4.2 mostra a unidade de controle de vazão da planta de biogás do LEA.



Figura 4.2: Unidade de controle de vazão da planta de biogás.

4.2 Conjunto Motor/Gerador

O conjunto motor/gerador usado na presente pesquisa é fabricado no Brasil pela Cia. Branco Motores, modelo B4T-5000 Bio (Figura 4.3). De ciclo Otto ou de ignição por centelha, tem o funcionamento baseado em quatro tempos. Nos motores quatro tempos, cada fase do ciclo é realizada em um curso do pistão, sendo que para realizar os quatro ciclos são necessárias duas voltas do virabrequim (720°).



Figura 4.3: Motor/Gerador modelo B4T-5000

Para que todo motor a combustão funcione, é necessário ter proporções de mistura correta entre o combustível e o ar atmosférico, caso contrário o excesso de combustível dificulta a propagação da chama, provocando uma instabilidade na rotação do motor, além de provocar o resfriamento da câmara de combustão e em consequência disso a extinção da chama, impedindo o motor de funcionar (motor “afogado”). Com excesso de ar, a chama se torna excessivamente lenta, mantendo a combustão durante grande parte da expansão, provocando o superaquecimento da câmara de combustão. Esta condição pode provocar a fusão da “cabeça” do pistão.

Na Tabela 4.1 são dadas as características do conjunto motor/gerador modelo B4T-5000 Bio (90).

Tabela 4.1: Características do conjunto motor/gerador B4T-5000 Bio (90).

Unidade de Força	monocilíndrico, 4 Tempos
Motor	11 CV
Potência Máxima	4 KVA
Potência Nominal	3,6 KVA
Tensão de Saída	110 V/220 V (bivolt)
Corrente de Carga	8,3 A
Sistema de Partida	partida manual e partida elétrica
Consumo	$2m^3/h$
Número de Pólos	2
Rotação do Eixo	3600 RPM
Frequência	60 Hz
Cilindradas	389 cc

4.3 Controlador Lógico Programável

O Controlador Lógico Programável (CLP) utilizado no controle da planta de biogás foi o modelo Twido TWDLC-E40DRF com 24 entradas (24 VDC) e 14 saídas à relé (2A) e 02 saídas à transistor (1A) e expansões modelos TM2AMI4LT com 04 entradas analógicas de 12 bits (0-10V, 0-20mA, PT100, PT1000, NI100 e NI1000) e TM2AMM6HT com 04 entradas e 02 saídas analógicas de 12 bits (0-10V e 4-20mA) (Figura 4.4). O programa utilizado para a programação do CLP foi o TwidoSuite versão 2.20.10, que possui ambiente de desenvolvimento gráfico com recursos para criar programas com diferentes tipos de linguagem e de configuração da CPU e módulos de expansão.

4.4 Atuador

Para realizar o controle de vazão de biogás, foi utilizada a válvula de controle proporcional modelo TR24-SR-T US da Belimo (Figura 4.5). Na Tabela 4.2 são descritas as especificações técnicas da válvula proporcional de controle de vazão.



Figura 4.4: Controlador lógico programável e expansões.



Figura 4.5: Válvula proporcional de controle de vazão.

Tabela 4.2: Características da válvula Modelo TR24-SR-T US

Controle	Proporcional
Tensão Nominal	24 VAC 50/60 Hz, 24 VDC
Potência	0,5 W
Impedância de Entrada	100 k Ω
Ângulo de Rotação	90 graus
Sentido de Rotação	Reversível com Interruptor
Acionamento	Comando Manual e Automático
Tempo de Execução	90 segundos
Conexão	1/2"

4.5 Sensores

O monitoramento da planta de biogás é realizado por sensores de temperatura, pressão e vazão.

4.5.1 Sensor de Temperatura

Foi utilizado para medir a temperatura do biogás na admissão do motor o sensor modelo TN2531 da *ifm electronic*. O sensor de temperatura TN2531 é exibido na Figura 4.6 e na Tabela 4.3 são descritas as características do sensor.

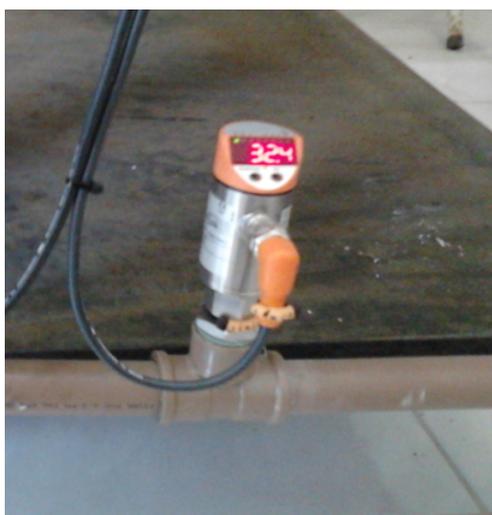


Figura 4.6: Sensor de temperatura TN2531

Tabela 4.3: Características do sensor de temperatura TN2531

Tensão de operação	18-32 VDC
Saída	4-20 mA / 0-10 V
Range	-40°C a +100°C
Resistência à pressão	300 bar
Tipo de proteção, classe de proteção	IP 67, III

4.5.2 Sensores de Pressão

O monitoramento da pressão da planta de biogás é realizado por dois sensores modelo PG2457 da *ifm electronic*. Os sensores estão posicionados na montante e jusante da válvula de controle proporcional. Essa configuração permite medir a pressão estática quando a válvula proporcional se encontra fechada e a pressão diferencial quando aberta ou parcialmente aberta. Na Figura 4.7 é visto o sensor de pressão PG2457.



Figura 4.7: Sensor de pressão PG2457

Na Tabela 4.4 são descritas as características do sensor de pressão PG2457.

Tabela 4.4: Características do sensor de pressão PG2457

Tensão de operação	18-32 VDC
Saída	4-20 mA
Faixa	-0,05 a 1 bar
Resistência à pressão	10 bar
Tipo de proteção, classe de proteção	IP 67 / IP 69K, III
Resolução	0,002 bar

4.5.3 Sensores de Vazão

O sensor utilizado para medição de vazão e consumo de biogás é o modelo SD 5000 da *ifm electronic*. A vazão é monitorada por um sistema de medição calorimétrica. O princípio de medição do medidor de vazão calorimétrico é baseado na dispersão térmica, onde um primeiro sensor de temperatura é aquecido internamente em alguns graus Celsius acima da temperatura do fluido a ser medido. Quando este fluido escoar pela tubulação onde o sensor calorimétrico está instalado, o calor gerado nesse sensor através do seu circuito interno, é disperso através da velocidade do fluido. Assim, quanto maior for essa dispersão térmica entende-se que maior é a vazão, visto que o sensor aquecido tende a reduzir sua temperatura conforme o aumento da vazão. Um segundo sensor de temperatura, não aquecido, é utilizado para medir a temperatura do fluido, possibilitando assim uma referência de comparação e compensação ao circuito de medição do conjunto medidor.

O sensor SD 5000 (Figura 4.8) foi utilizado por não possuir partes móveis, por isso não está sujeito a falhas devidas à corrosão de eixos, rolamentos e desgastes mecânicos em geral.



Figura 4.8: Sensor de vazão SD 5000

Na Tabela 4.5 são descritas as características do sensor de vazão SD5000.

Tabela 4.5: Características do sensor de vazão SD5000

Tensão de operação	19-30 VDC
Saída	contato NO/NC (impulso) ou 4-20 mA escalável
Range	0,06 a 15,00 Nm^3/h ; 0,83 (0,8) a 250,0 Nl/min
Resistência à pressão	16 bar
Tipo de proteção, classe de proteção	IP 65, III

4.6 Biodigestor

4.6.1 Etapas de Instalação do Biodigestor

O biodigestor utilizado na presente pesquisa é o modelo 4500, que foi doado à UFC pela Recolast Ambiental, empresa de engenharia de impermeabilização atuando no mercado de revestimentos do Brasil e América Latina.

O modelo 4500 é um equipamento de construção simplificada. Porém, complexo na sua hidrodinâmica e interrelações físico-químicas. As bactérias transforma a matéria orgânica crua em biofertilizante de alta qualidade biológica, que atua como fertilizante foliar, redicular e como bioinseticida, tendo como resíduo gasoso o biogás.

A escavação da trincheira para o biodigestor foi executada, seguindo as recomendações do fabricante, paralela ao Laboratório de Energias Alternativas da UFC, conforme a Figura 4.9, para facilitar futuras ampliações. As dimensões do Biodigestor Modelo 4500 podem ser vistas na Figura 4.10

Para (41), o biodigestor deve ser instalado em localização estratégica, próximo às instalações (curral, aprisco, pocilga) para facilitar o transporte do esterco, ao local de aplicação do biofertilizante e da utilização do biogás. Considerando a impossibilidade de atingir o ideal, é mais fácil transportar o esterco para o biodigestor do que o biofertilizante para área agrícola, devido ao aumento substancial do volume.



Figura 4.9: Localização do biodigestor no LEA - UFC

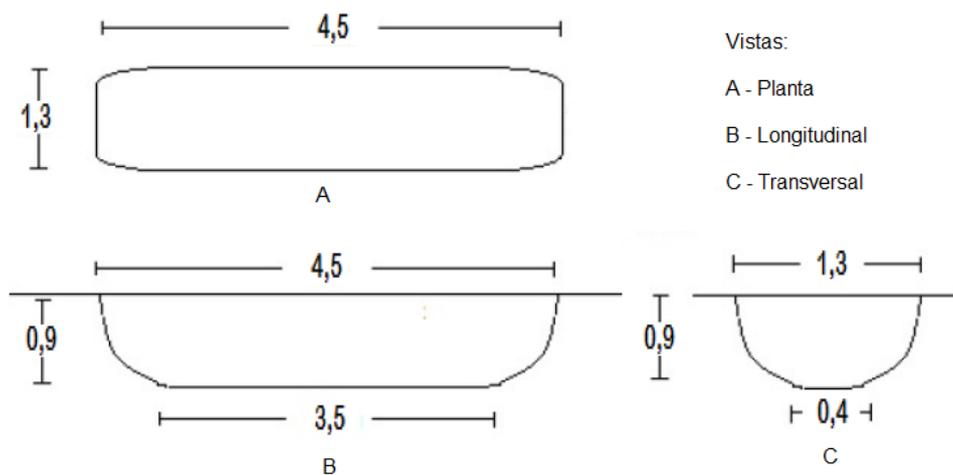


Figura 4.10: Dimensões do biodigestor modelo 4500 (em metros).

Alguns parâmetros devem ser considerados na localização de um biodigestor:

- Condições locais do solo;
- Facilidade na obtenção, preparo e armazenamento da biomassa;
- Facilidade na remoção e utilização do biofertilizante;
- Distância de utilização do biogás.

Segundo a Recolast Ambiental, os lados e o fundo da trincheira devem estar lisos sem pedras, sucatas ou raízes das árvores, pois as raízes podem

danificar a membrana plástica. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram as sucatas encontradas e a trincheira escavada ao lado do LEA.



Figura 4.11: Sucatas encontradas na escavação



Figura 4.12: Trincheira para instalação do biodigestor

Devido ao grande número de entulhos e sucatas encontradas na escavação da trincheira, algumas medidas da escavação ultrapassaram os valores recomendados pelo fabricante. Para corrigir as irregularidades, foram utilizadas placas pré-moldadas de cimento com 50 x 50 cm (Figura 4.13) para modelar a trincheira.

Em seguida, foi instalada a manta geotextil, conforme a Figura 4.14, que possui as funções de drenagem de água de chuva, filtragem de pequenos vazamentos que possam ocorrer, proteção e reforço das bordas da trincheira.

Após essas etapas (escavação, modelagem da trincheira, instalação da manta geotextil), foi realizado o teste do biodigestor. Para verificar possíveis vazamentos, o biodigestor foi inflado com ar comprimido, como visto na Figura 4.15.

De acordo com a Recolast Ambiental, a fermentação ocorre mais inten-



Figura 4.13: Trincheira modelada com as placas pré-moldadas de cimento



Figura 4.14: Instalação da manta geotextil.

samente quando a temperatura do material estiver entre 30° e 35°C, onde nestas condições, a produção de biogás, por quilograma de material utilizado, é maior e ocorre em menor tempo. Por essa razão, o biodigestor é instalado semi enterrado, conforme a Figura 4.16, pois abaixo da superfície do solo as temperaturas são mais elevadas e as suas variações são menores. Além disso, o manejo dos biodigestores semi enterrados é mais fácil de ser executado.

Segundo (41), a caixa de entrada pode ser um tonel plástico ou tanque de alvenaria, dependendo do volume da carga diária. Não é recomendada a



Figura 4.15: Teste de vazamentos do biodigestor



Figura 4.16: Biodigestor semi enterrado

utilização de tonéis de metal, pois enferrujam rapidamente. A caixa de saída deve ser dimensionada três vezes o volume da carga diária para permitir armazenamento do biofertilizante. A caixa de entrada da planta de biogás do LEA foi feita com alvenaria com as dimensões 1 m x 1 m x 1 m, conforme a Figura 4.17.

Assim como a caixa de entrada, a caixa de saída foi feita com alvenaria nas dimensões 1,5 m x 1,5 m x 1 m, como pode ser visto na Figura 4.18.

Junto ao biogás existe vapor d'água, que por condensação se deposita nos



Figura 4.17: Caixa de entrada do biodigestor.



Figura 4.18: Caixa de saída do biodigestor.

pontos mais baixos e com o tempo, impede a passagem do biogás. Desta forma, a tubulação que conduz o biogás deve ter pontos mais baixos com drenos, que funcionam como válvula de segurança. O dreno pode ser feito com uma conexão T da qual sai um tubo ou mangueira que deve ser mergulhado em água dentro de uma garrafa ou caixa de concreto, chamado de borbulhador, que está sob a ação da pressão atmosférica. Quando o biogás borbulhar dentro do dreno, indica que o gasômetro está cheio (pressão maior que a atmosférica), então o biogás deve ser utilizado para aliviar a pressão no biodigestor. O biogás não deve ser liberado diretamente ao ambiente sem a combustão (queimador) (exceto na primeira operação, quando o biogás está misturado com o ar atmosférico), para evitar a emissão de gases de efeito estufa (GEE). As Figuras 4.19 e 4.20, mostram o borbulhador e o queimador da planta de produção de biogás do LEA, respectivamente.

4.6.2 Carga do Biodigestor

Foi utilizado para abastecer a caixa de entrada do biodigestor esterco de caprino e água na proporção de 1:4 (Figura 4.21) de acordo com o sugerido por (41), conforme a Tabela 4.6 para realizar a carga do biodigestor do LEA e um tempo de retenção hidráulica de 30 a 40 dias.

O esterco foi cedido pela empresa *Capril Said*, localizada no município de



Figura 4.19: Borbulhador da planta de biogás do LEA.



Figura 4.20: Queimador da planta de biogás do LEA.



Figura 4.21: Abastecimento da caixa de entrada

Tabela 4.6: Cálculo do volume de carga (49).

Espécie Animal	Esterco por Animal (kg)	Relação Esterco/Água
Caprino/Ovino	0,5	1:4
Bovino	7	1:1
Suíno	4	1:1,3

Eusébio/CE, e transportado em tonéis (Figura 4.22). Os animais, conforme a Figura 4.23, são mantidos confinados e produzem aproximadamente 1 kg

de esterco por dia. Os animais são das raças Saanen, Alpina Francesa e Anglo-Nubiana.

Devido à disponibilidade/compatibilidade de horário do criador dos caprinos, aliada à dificuldade de transporte, distância e mão-de-obra para transportar o esterco, foram colocadas bateladas de 1200 litros para preencher a carga do biodigestor.



Figura 4.22: Transporte do esterco.



Figura 4.23: Animais confinados da Capril Said.

O biogás é um gás e quando misturado com o ar, como todos os combustíveis gasosos, torna-se explosivo. Seguindo a recomendação do fabricante do biodigestor, foi realizado o descarte da primeira produção de biogás.

Para a segunda carga, foi inserido no biodigestor 1400 kg de substrato e após 20 dias de retenção hidráulica foi produzido o biogás necessário para os ensaios (Figura 4.24).



Figura 4.24: Biodigestor com biogás.

4.7 Controle e Monitoramento da Planta de Biogás

Para realizar o controle, monitoramento e aquisição de dados da planta de produção de biogás foram desenvolvidas telas de interface do usuário com o processo.

Foi utilizado o *software* Elipse SCADA, devido a grande versatilidade, recursos gráficos e rotinas que permitem agilizar a tarefa de desenvolvimento da aplicação. A versão "Elipse Pro" foi escolhida para realizar o monitoramento da planta, pois permite que o fluxo de dados possa ser feito em tempo real com a planta de biogás.

Além das aplicações inseridas no monitoramento da planta de biogás (monitoração de variáveis em tempo real, gráficos e objetos que estão relacionados

com as variáveis físicas de campo), foram criados bancos de dados para armazenar os dados das variáveis de frequência, pressão e vazão. Na Figura 4.25 é mostrado o sistema de monitoramento da planta de biogás que possui as principais telas:



Figura 4.25: Sistema de monitoramento da planta de biogás.

- Tela 01 - Tela de Abertura/Identificação do Usuário;

A tela de abertura/identificação (Figura 4.26) tem a função de permitir, somente aos pesquisadores do LEA, o acesso à aplicação de supervisão da planta (usuário). Cada usuário possui um nível de acesso. O usuário com nível 1 é considerado superusuário. Este quando logado pode criar, modificar e remover os atributos de todos os usuários. Para que não ocorram interrupções indesejadas da aplicação, foi inserido uma senha (código de saída) para sair do modo *on-line*.

- Tela 02 - Tela de Menu;

A tela de menu (Figura 4.27) permite o usuário acessar as telas de interface com o operador, monitorar as variáveis (em tempo real) do conjunto motor/gerador, variáveis do controle de vazão, pressão e temperatura e coletar as variáveis em forma de relatório com intervalo de 15 minutos. Na tela de menu é possível realizar o acionamento individual das cargas (quatro lâmpadas halógenas de 500 W).



Figura 4.26: Tela de abertura/identificação do usuário.

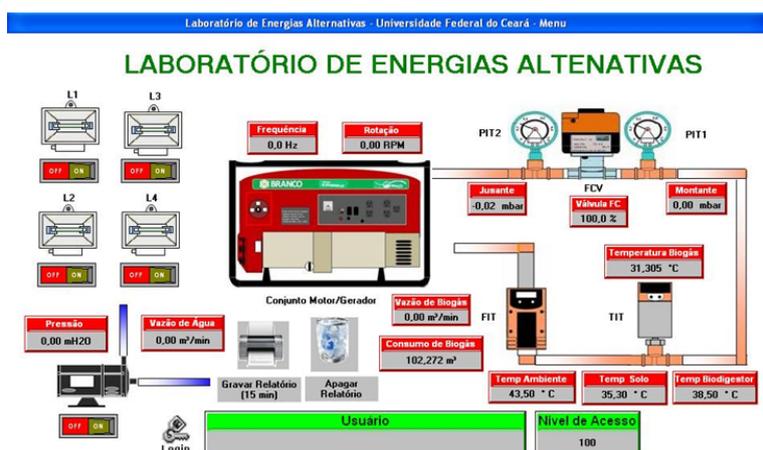


Figura 4.27: Tela de menu.

- Tela 03 - Tela do Motor e Gerador;

A tela do motor e gerador (Figura 4.28) permite o usuário navegar para outras telas, além de permitir o monitoramento das variáveis de frequência, rotação do eixo, tensão e corrente de saída do gerador de eletricidade.

- Tela 04 - Tela de Relatório de Frequência;

A tela de relatório de frequência (Figura 4.29) permite o usuário acompanhar a evolução da frequência do gerador, assim como gerar relatórios no intervalo de 100 ms e apagá-los a qualquer momento.

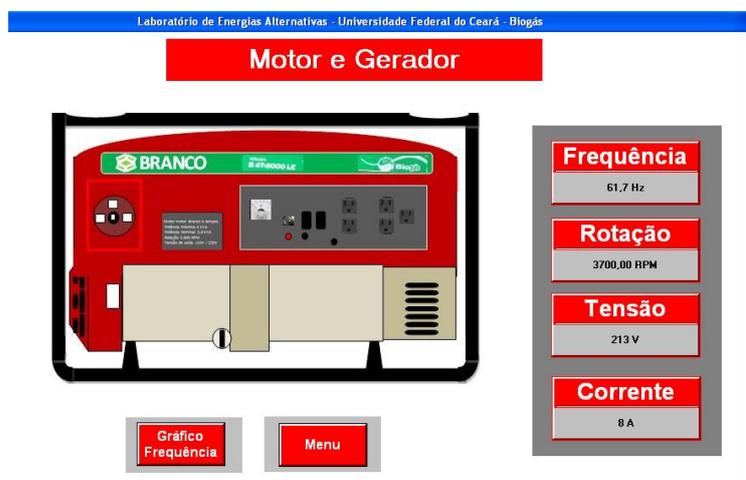


Figura 4.28: Tela do motor e gerador.

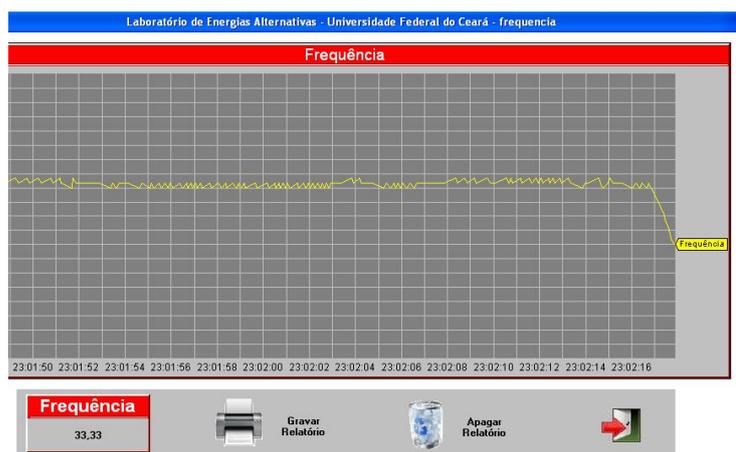


Figura 4.29: Tela de relatório de frequência.

- Tela 05 - Tela de Pressão/Vazão;

A tela pressão/vazão (Figura 4.30) permite o usuário acessar outras telas do sistema de monitoramento da planta de biogás, além de permitir o monitoramento das variáveis de pressão montante e jusante (mbar), vazão de biogás (m^3/h), monitoramento e controle do percentual de abertura da válvula de controle de vazão.

- Tela 06 - Tela de vazão de biogás;

A tela de vazão de gás (Figura 4.31) permite o usuário acessar outras



Figura 4.30: Tela de pressão/vazão.

telas, além de permitir o monitoramento instantâneo das variáveis de vazão de biogás (m^3/h), monitoramento do consumo total de biogás (m^3), controle do percentual de abertura da válvula de controle de vazão, acompanhamento da evolução da vazão de biogás e abertura da válvula proporcional, assim como gerar relatórios com intervalo de 1 milissegundos e apagá-los a qualquer momento.

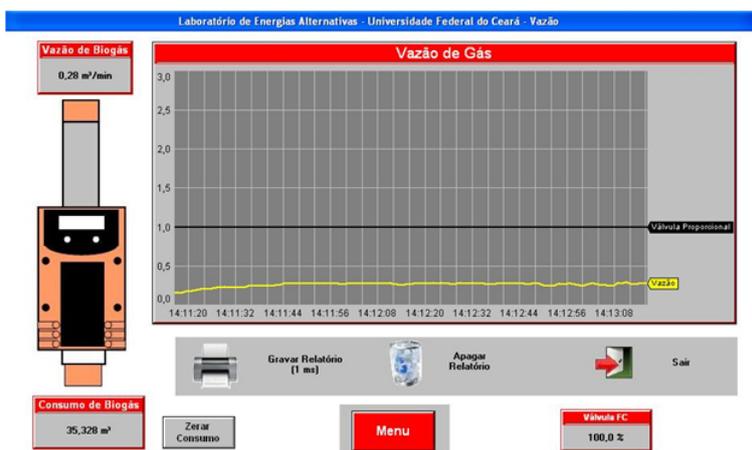


Figura 4.31: Tela de vazão de gás.

- Tela 07 - Tela de acionamento de cargas;

A tela de acionamento de cargas (Figura 4.32) permite o usuário selecionar

e acionar a potência desejada através de lâmpadas halógenas, sendo possível selecionar as cargas de 500 W, 1000 W, 1500 W e 2000 W.



Figura 4.32: Tela de acionamento de cargas.

4.8 Dinâmica do Sistema de Controle

O presente estudo foi realizado comparando-se a resposta do sistema quando aplicado uma perturbação no processo. No primeiro momento, são realizados ensaios utilizando o controlador centrífugo (pertencente ao conjunto motor/gerador) e posteriormente realizando a manipulação da vazão do gás utilizando o algoritmo PID a fim de obter o controle de rotação, frequência e tensão.

Para determinar o comportamento (frequência x potência) do conjunto motor/gerador quando aplicada a carga, foi instalado um dispositivo de contagem de pulsos composto por um sensor indutivo e um disco com seis furos equidistantes, como apresentado na Figura 4.33. O disco perfurado foi acoplado ao eixo do gerador através de um prolongamento, permitindo assim, contar os pulsos por rotação do eixo. O dispositivo tem o funcionamento semelhante ao *encoder* de deslocamento angular.

Para se ter uma leitura de pulsos mais precisa, o disco perfurado foi usinado em um centro de usinagem (*Discovery 1000*) com comandos numé-



Figura 4.33: Instalação do sensor indutivo.

ricos computadorizados (CNC). A usinagem foi realizada no Laboratório de Máquinas Operatrizes (LMO) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE).

Capítulo 5

Ensaaios e Resultados

No presente capítulo são apresentados os resultados e os ensaios realizados na planta de produção de biogás do Laboratório de Energias Alternativas - LEA da Universidade Federal do Ceará - UFC.

5.1 Ensaaios

5.1.1 Análise do Biogás do LEA

A análise do biogás foi realizada pela Petrobrás (Lubnor) com o detector CP3800. O resultado da análise do biogás produzido no LEA comparado ao citado em (41) apresentou valores ideais de composição com 59% de CH_4 (principal componente). As Figura 5.1 e 5.2 apresentam as características do biogás produzido nas pesquisas.

5.1.2 Dinâmica das Variáveis do Processo

O presente estudo foi realizado utilizando dois diferentes combustíveis: o primeiro ensaio utilizando apenas gasolina e o segundo utilizando a gasolina para a partida do motor e posteriormente efetuando a mudança para o biogás.

Para determinar as curvas de resposta do sistema do conjunto, foi inserida

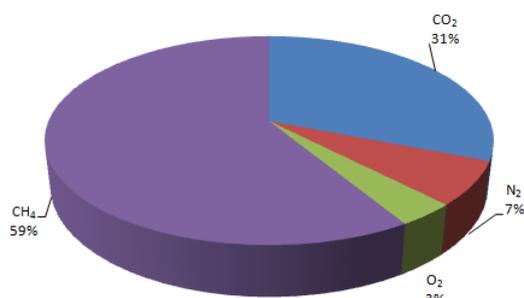


Figura 5.1: Composição do biogás - LEA.

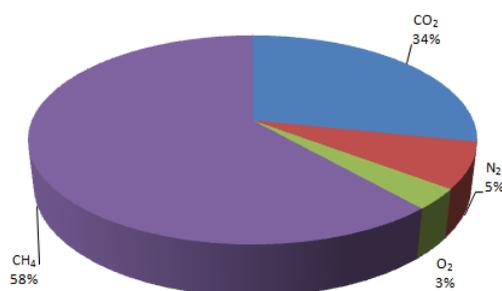


Figura 5.2: Composição do biogás, conforme (41).

uma perturbação de aproximadamente 60% da potência nominal do gerador. Os dados de vazão, pressão, temperatura e frequência foram coletados (antes e após a perturbação) através de sensores e enviados para memória do CLP, transmitido para o sistema supervisor através do protocolo *Modbus* e posteriormente armazenados no banco de dados (histórico/relatório) criado no computador de monitoramento da planta.

Nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 é demonstrado o comportamento das variáveis de pressão, vazão, frequência e temperatura quando utilizado o biogás para o funcionamento do conjunto motor/gerador.

Na Figura 5.3 se observa que ao aumentar a abertura da válvula proporcional (aumento da vazão) o sistema reduz a pressão de 30 mbar para pressão -20 mbar (vácuo), ocasionada pela sucção de combustível do conjunto motor/gerador.

Na Figura 5.4 é mostrado um comportamento semelhante à curva de

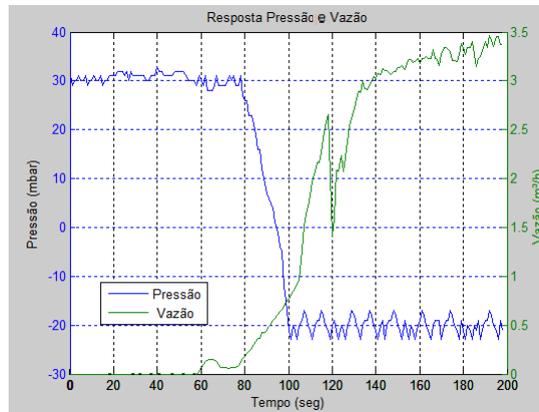


Figura 5.3: Curva de resposta pressão e vazão.

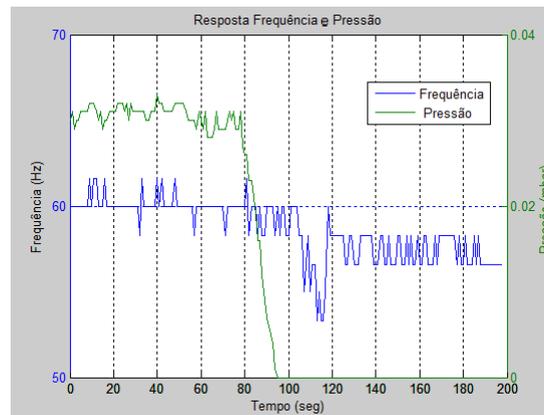


Figura 5.4: Curva de resposta frequência e pressão.

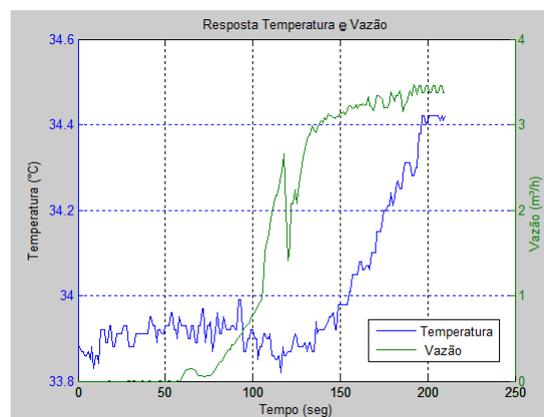


Figura 5.5: Curva de resposta temperatura e vazão.

resposta da vazão e pressão (queda de pressão). No intervalo de 80 segundos após o fechamento da torneira da gasolina ocorre a redução sistemática da frequência de rotação do motor. Dessa forma, o controlador PI inicia a abertura da válvula proporcional para corrigir o distúrbio liberando gás para o sistema e conseqüentemente reduzindo a pressão do sistema.

O comportamento da Figura 5.5 é provocado pela troca de calor entre o gás armazenado no biodigestor e a tubulação do sistema de controle de vazão localizado no interior do LEA. Observa-se que a temperatura máxima do gás proveniente do biodigestor encontra-se adequada para a fermentação do substrato (30° e 35°C).

Na medição do consumo de biogás da planta experimental do LEA foi utilizado o sensor de vazão SD5000. O sensor foi configurado para realizar a medição de consumo por pulsos. Na Figura 5.6 é observado a curva de consumo de biogás (m^3) do conjunto motor/gerador no intervalo de 21,6 a 22,8 m^3 . O consumo é acumulativo, porém é possível zerar o registro do contador no sistema de monitoramento da planta de biogás para realizar novas medições de consumo.

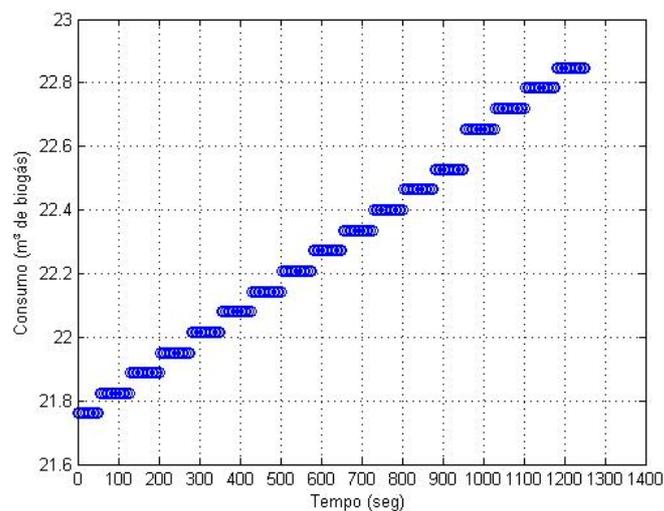


Figura 5.6: Curva de consumo (m^3) do motor/gerador .

Observa-se que, no gráfico da Figura 5.6 o conjunto motor/gerador em 20 minutos de funcionamento consome aproximadamente 1 m^3 de biogás.

5.1.3 Dinâmica de Partida do Conjunto Motor/Gerador

Foram utilizados o Programa *Matlab-Simulink*[®] e os dados coletados no sistema de aquisição para identificar a dinâmica de partida do conjunto motor/gerador. Na Figura 5.7 apresenta a curva de resposta do sistema ao ser dada a partida a frio do conjunto motor/gerador sem aplicação de carga.

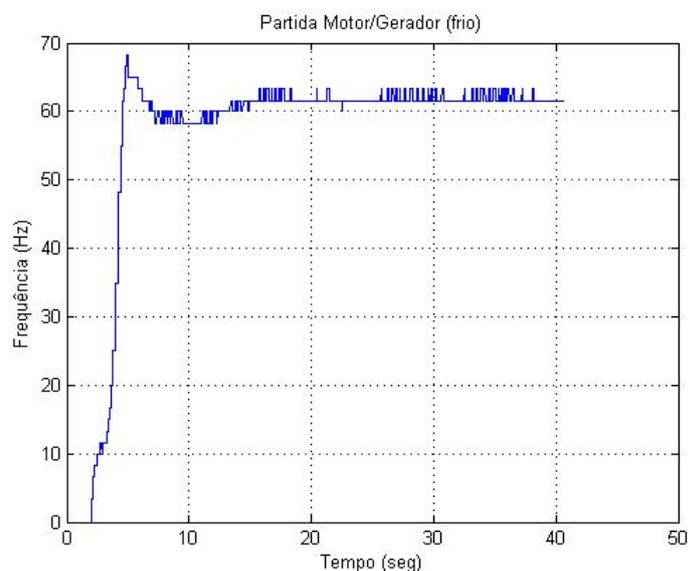


Figura 5.7: Curva de frequência sem a aplicação da carga

Percebe-se que a partida do conjunto motor/gerador tem um comportamento de sistema amortecido sem erro permanente. Embora essa partida não se configure em um ensaio com carga, é um parâmetro de resposta da ação do controlador centrífugo, onde se observa que o mesmo estabiliza a frequência do motor próximo a 60 Hz em 13,2 segundos.

Na Tabela 5.1 é mostrada o comportamento da partida do conjunto motor/gerador sem cargas. A partida a frio do conjunto motor/gerador sem carga apresentou amplitude máxima de 13 Hz.

5.1.4 Controlador Centrífugo com Gasolina

Inicialmente, o conjunto motor/gerador é acionado através da partida elé-

Tabela 5.1: Sistema sem Aplicação das Cargas na Partida com Gasolina.

Intervalo de Tempo (s)	Condição de Funcionamento
4,8-5,6	Partida do Motor
5,6-13,2	Oscilação no Sistema
13,2 em diante	Estabilidade do Sistema

trica. Após 10 minutos trabalhando em regime permanente para aquecer o motor e estabilizar a frequência da planta, foi inserida uma carga de 2000 W (quatro lâmpadas halógenas de 500 W). Através do CLP e sistema supervisor, foram armazenadas no banco de dados as informações de resposta do sistema. A curva de resposta do sistema é apresentada na Figura 5.8.

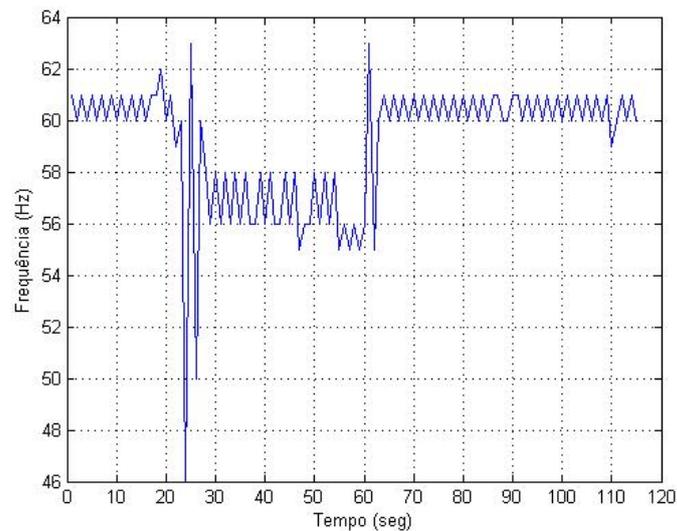


Figura 5.8: Curva de frequência do controlador centrífugo com gasolina

No ensaio foi observado que, no momento do acionamento da carga, o controlador centrífugo reage ao erro na frequência e faz o motor oscilar a rotação resultando em uma amplitude máxima de frequência de 17 Hz. A estabilização do sistema com a presença das cargas apresenta uma variação de frequência de 4 Hz e erro de amplitude permanente e 8 Hz amplitude máxima de saída da Carga.

Na Tabela 5.2 é detalhada o comportamento da partida do conjunto motor/gerador com as cargas em função do tempo.

Tabela 5.2: Sistema com Aplicação das Cargas com Gasolina.

Intervalo de Tempo (s)	Condição de Funcionamento
0-22,5	Sistema Estabilizado
22,5	Perturbação - Entrada das Cargas (2000 W)
28,75-60	Estabilidade do Sistema com Carga
60	Saída da Carga (2000 W)
62,5 em diante	Estabilidade do Sistema sem Carga

5.1.5 Controlador Centrífugo com Biogás

Os procedimentos adotados para realizar o ensaio de carga foram similares ao do controlador centrífugo com gasolina com carga. Porém, ao realizar o degrau de carga, foi necessário realizar a abertura total da válvula proporcional (100%) e o ajuste manual da válvula da câmara de expansão do gás a fim de obter a quantidade suficiente de combustível (biogás) para o funcionamento correto do motor.

A resposta para o ajuste manual da vazão com o sistema controlador centrífugo com biogás é demonstrada na Figura 5.9.

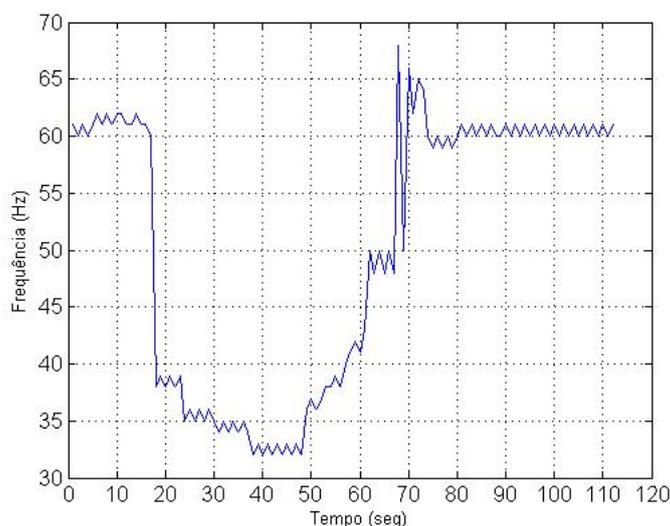


Figura 5.9: Curva da frequência com ajuste manual do biogás.

Verificou-se que, após fechar a válvula de gasolina e abrir bruscamente

a válvula de biogás, ocorreu o "afogamento" do motor, sendo necessário iniciar novamente o procedimento de partida e abertura lenta da válvula de expansão.

Ao interromper o fornecimento de gasolina e iniciar a adição lenta de biogás o motor perde aceleração, sendo portanto, necessário a intervenção com uma maior abertura na válvula de expansão, provocando a amplitude máxima de oscilação de 37 Hz. No intervalo de 48 a 73 segundos é observado a recuperação da rotação do motor e após os 73 segundos o sistema estabiliza.

Tabela 5.3: Sistema controlador centrífugo com biogás com ajuste manual.

Intervalo de Tempo (s)	Condição de Funcionamento
0-5	Sistema Estabilizado
5	Transição para Gasolina
5-73	Ajuste Manual
73 em diante	Estabilidade do Sistema

Após a estabilização do sistema através do ajuste manual foram inseridas as cargas. Na Figura 5.10 é mostrada a resposta do sistema.

É possível observar que o controlador efetua a ação de correção da perturbação em 12,2 segundos. Diferentemente do ensaio com alimentação por gasolina, a resposta do ensaio utilizando biogás provocou uma menor oscilação do sistema e amplitude máxima de 6 Hz na entrada da carga, 2,5 Hz de amplitude máxima de saída da carga, porém com estabilização da planta com erro permanente de 5 Hz.

A Tabela 5.4 mostra o detalhamento do gráfico do controlador centrífugo com biogás com aplicação de cargas.

Tabela 5.4: Sistema com Aplicação das Cargas com biogás.

Intervalo de Tempo (s)	Condição de Funcionamento
0-28,75	Sistema Estabilizado com biogás
28,75	Perturbação - Entrada das Cargas (2000 W)
41-81	Estabilização do Sistema com Cargas (2000 W)
81	Saída das Cargas (2000 W)
91 em diante	Estabilização do Sistema

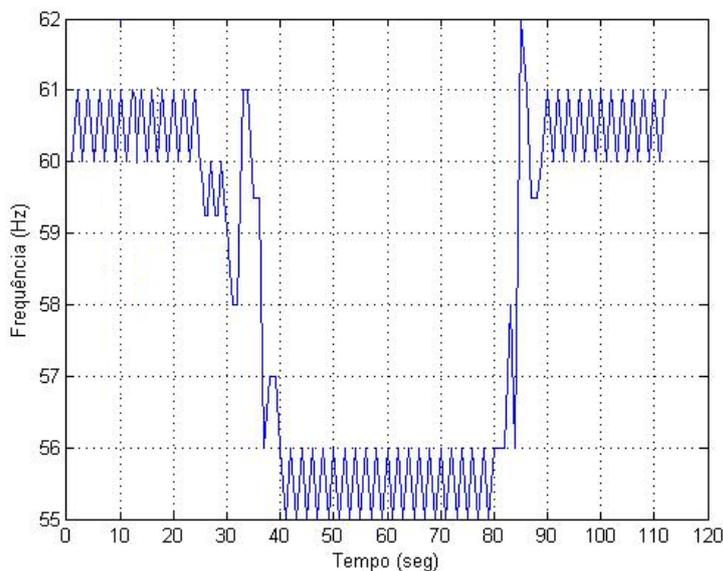


Figura 5.10: Curva de frequência do controlador centrífugo com biogás.

5.1.6 Controlador Centrífugo e PI com Biogás

5.1.6.1 Definição dos parâmetros PI

O modelo matemático do processo dinâmico foi estabelecido a partir de dados experimentais observados em laboratório, onde foi aplicado um degrau na variável manipulada (frequência do conjunto motor/gerador) e após essa ação foi analisada a resposta do sistema, observando a variável controlada (vazão do biogás). Os parâmetros do controlador PI foram estabelecidos através da identificação do sistema em malha aberta utilizando os estimadores de mínimos quadrados (MQ) e mínimos quadrados recursivos (MQR). Na Figura 5.11 pode ser observada a curva de resposta da vazão quando modificada a frequência de rotação do conjunto motor/gerador através de variações de carga.

Através do estimador de mínimos quadrados (MQ) foram obtidos os parâmetros: $a_0=1,2673$; $a_1=0,2808$; $b_0=0,0074$ e $b_1=-0,0073$. A Figura 5.12 mostra a curva de vazão real e estimada quando aplicado o estimador MQR.

Os procedimentos do ensaio utilizando o algoritmo PI com biogás segui-

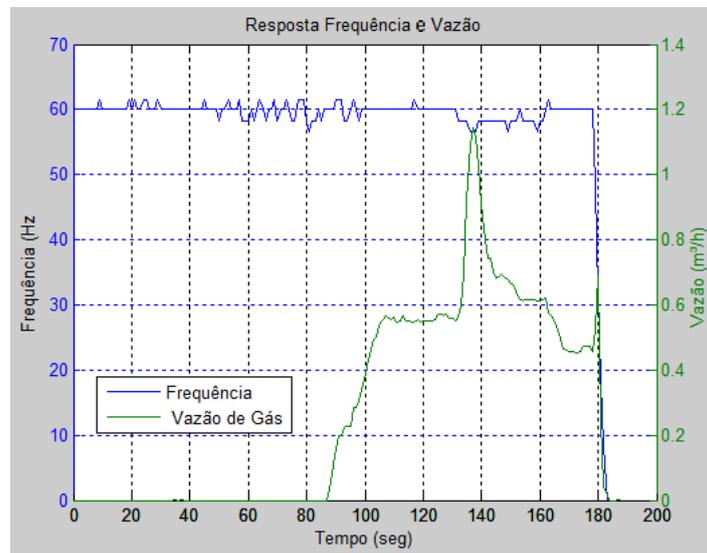


Figura 5.11: Curva de resposta frequência e vazão.

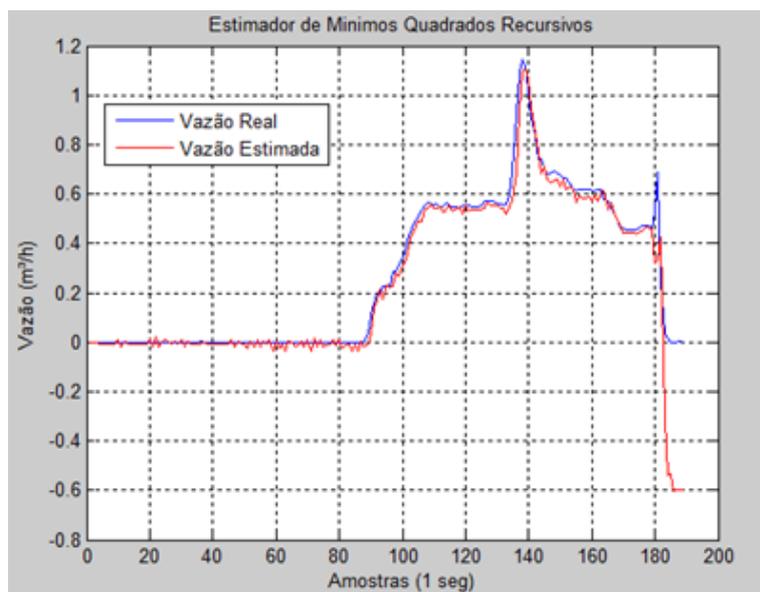


Figura 5.12: Curva da vazão real e vazão estimada pelo MQR.

ram os mesmos critérios de valores das cargas, porém o ajuste de abertura da válvula de expansão foi substituído pelo acionamento da válvula proporcional. Os parâmetros estabelecidos do controlador PI foram obtidos através do auxílio do *Matlab-Simulink*[®] (Figura 5.13), sendo considerados suficientes

para os ensaios iniciais os valores ($K_p=10,009$ e $K_i=0,186$) estabelecidos pelo sintonizador (*tuning tool*) do bloco PID(z).

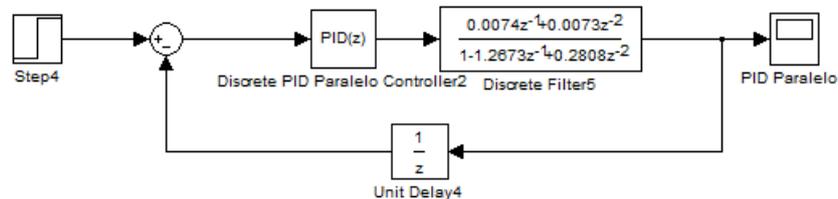


Figura 5.13: PID paralelo *Matlab-Simulink*[®].

A simulação da resposta ao degrau utilizando o controlador PID, em ambiente computacional (*Matlab-Simulink*[®]), utilizando os parâmetros $K_p = 10,009$; $K_i = 0,186$ e $K_d = -5,513$, demonstra que o sistema é estável e com tempo de estabilização do sistema em 18 segundos. A resposta ao degrau é apresentada na Figura 5.14.

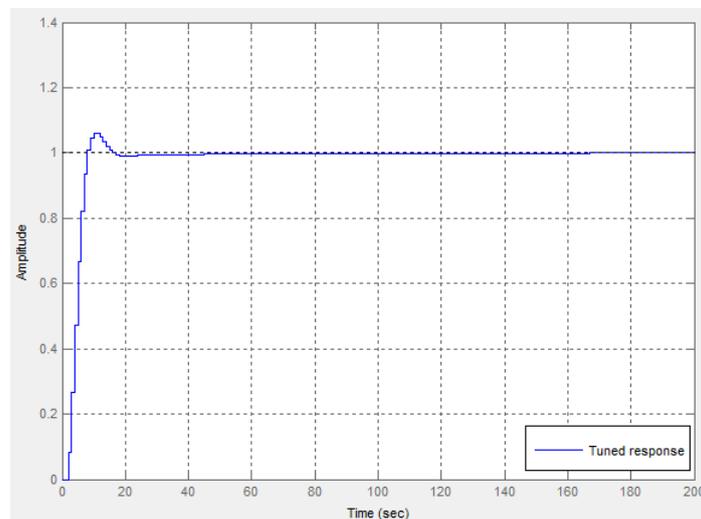


Figura 5.14: Resposta do PID paralelo ao degrau.

Para realizar os ensaios foi utilizado apenas a configuração PI, pois o bloco PID do Controlador Lógico Programável utilizado não permite inserir valor negativo no parâmetro D ($D = 0$). Na Figura 5.15 pode ser observada a parametrização do bloco PID do CLP.

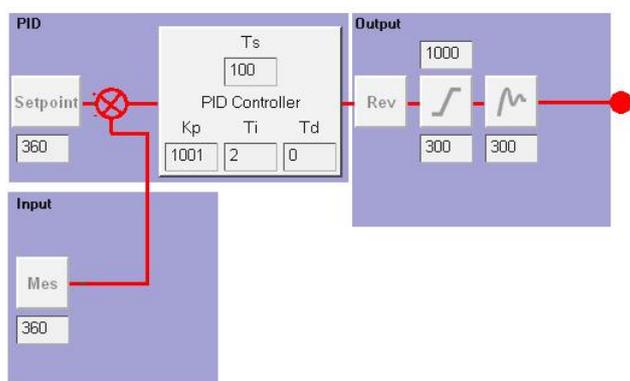


Figura 5.15: Parametrização do bloco PID paralelo.

Na Figura 5.16 pode ser observada a resposta do sistema quando utilizado o controlador centrífugo e a válvula proporcional controlada pelo algoritmo PI. A Tabela 5.5 mostra o comportamento do controlador centrífugo com biogás com aplicação de cargas.

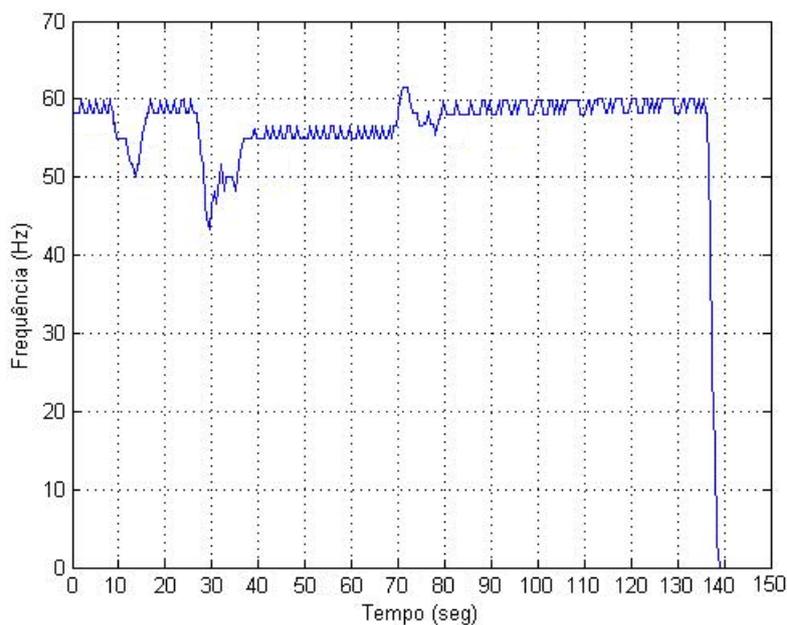


Figura 5.16: Curva de frequência dos controladores simultâneos com biogás.

Ao partir o motor, um sinal de frequência é enviado ao controlador PI, que atua juntamente com o controlador centrífugo no motor. Com o fechamento

da torneira de gasolina, o motor temporariamente trabalha com a mistura dos dois combustíveis (gasolina + biogás). A mistura de combustíveis juntamente com a ação dos controladores provocam a oscilação no sistema sem cargas, que é observado no intervalo de 8 a 16 segundos. A entrada da carga provocou uma amplitude máxima de oscilação da frequência de 16 Hz, erro permanente de 5 Hz e a saída da carga apresentou uma oscilação com amplitude máxima de 7 Hz.

Tabela 5.5: Aplicação das Cargas com Controladores Simultâneos.

Intervalo de Tempo (s)	Condição de Funcionamento
0-8	Sistema estabilizado (gasolina)
8	Mudança de gasolina para biogás
16-28	Estabilização do Sistema sem Cargas
28	Perturbação - Entrada das Cargas (2000 W)
38	Estabilização do Sistema com Cargas
70	Saída da Carga (2000 W)
79 em diante	Estabilização do Sistema sem Carga

5.1.7 Controlador PI com Biogás

Para realizar o ensaio somente com controlador PI faz-se necessário desacoplar o controlador centrífugo. O desacoplamento da haste com o motor em funcionamento ocasiona a aceleração demasiada do motor além de desregular o controlador centrífugo. Assim, para realizar o ensaio utilizando apenas o controlador PI, a haste do controlador centrífugo foi desacoplada com o motor desligado e através do parafuso de regulagem de marcha lenta foi ajustada a rotação mínima de funcionamento do conjunto motor/gerador. A partida do motor foi realizada utilizando apenas o biogás. Na Figura 5.17 pode ser observada a resposta do sistema quando utilizado apenas o controlador PI para o controle da válvula proporcional.

No gráfico é observado que, o motor, utilizando biogás, entra em funcionamento após 10 segundos. Após esse procedimento o motor acelera lentamente, dependendo apenas do controlador PI para corrigir os parâmetros de aceleração. Devido a característica de tempo de resposta da válvula utilizada

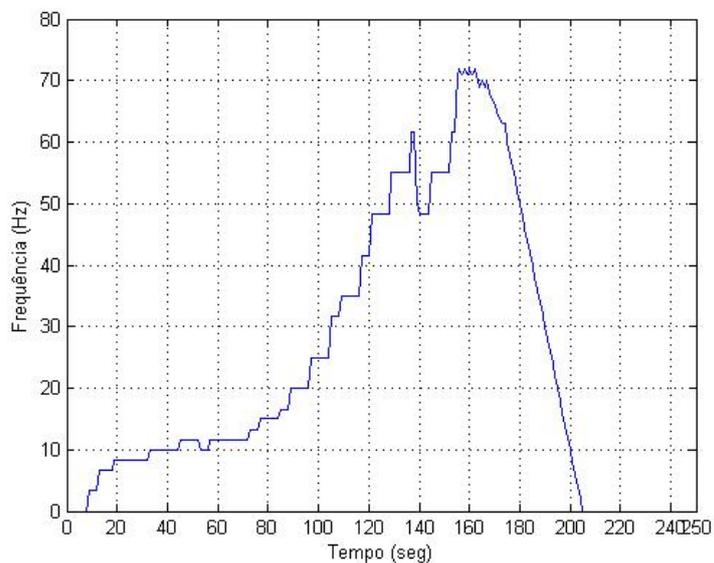


Figura 5.17: Curva de frequência do controlador PI com biogás.

na pesquisa (Tabela 4.2), a ação de correção se deu após 140 segundos da partida.

Devida a característica de resposta lenta da válvula proporcional, não foi possível comprovar a eficiência do sistema proposto, pois conforme o ensaio, após 158 segundos o motor entrou em regime de aceleração máxima, sendo necessário desligá-lo após atingir a frequência superior a 70 Hz.

Capítulo 6

Conclusões

Esta dissertação descreveu o estudo de viabilidade do controle de vazão de biogás com baixa pressão para produção descentralizada de eletricidade.

A análise da composição do biogás produzido no Laboratório de Energias Alternativas apresentou valores ideais para o perfeito funcionamento do conjunto motor/gerador com 59% de CH_4 , 31% de CO_2 , N_2 e 3% de O_2 .

Os resultados de medição de vazão com o conjunto motor/gerador em regime de funcionamento com carga, mostrou que o consumo de biogás para o conjunto motor/gerador (4 KW) foi aproximadamente $3 \text{ m}^3/\text{h}$.

O resultado mostrou que o funcionamento do conjunto motor/gerador não depende de pressão positiva no interior do biodigestor, pois foi verificado nos ensaios que o conjunto motor/gerador, em funcionamento, produziu a pressão negativa de -20 mbar (vácuo) que foi responsável pela sucção do biogás.

A temperatura do biogás observada na entrada do conjunto motor/gerador de $34 \text{ }^\circ\text{C}$ demonstra que o interior do biodigestor possui condições favoráveis para a fermentação do substrato.

Utilizando os parâmetros proporcional e integral sugeridos no método de sintonia do *Matlab-Simulink*[®], o controlador PI juntamente com o controlador centrífugo apresentou um desempenho satisfatório no ponto de vista do tempo de estabilidade com a variação da carga comparados ao controlador centrífugo existente atuando individualmente. Comparando os resultados ob-

tidos nos ensaios, observa-se que o sistema com controlador centrífugo com gasolina apresentou melhor tempo resposta (6,2 s) para estabilidade após a aplicação da carga, seguidos dos sistemas com controladores simultâneos (centrífugo + PID) com biogás (10 s) e centrífugo com biogás (12,2 s).

Contudo um tempo de resposta menor significa uma amplitude de frequência maior, sendo respectivamente registrada para os controladores centrífugo com gasolina, controladores simultâneos e centrífugo com biogás de 17 Hz, 16 Hz e 6 Hz. O que pode ser justificado pelo fato de quanto maior a ação do controlador em corrigir o erro acarreta uma maior instabilidade no sistema.

O mesmo é observado durante a saída da carga. Constata-se que o controlador centrífugo com gasolina apresenta um melhor desempenho na estabilização do sistema (2,5 s), seguido do sistema com controlador simultâneos (9 s) e controlador centrífugo com biogás (10 s).

Embora o consumo do conjunto motor/gerador funcionando com biogás é adotado pelo fabricante em $2 \text{ m}^3/\text{h}$, nos resultados dos ensaios foi observado que o conjunto motor/gerador consome $3 \text{ m}^3/\text{h}$ de biogás. A diferença do consumo é ocasionada por vazamentos que ocorrem na admissão do biogás junto aos filtros de ar.

O sistema de controle e supervisão implementado na planta de geração de biogás do Laboratório de Energias Alternativas permitiu avaliar o comportamento da estabilidade do conjunto motor/gerador sob variação brusca da carga. A introdução de uma válvula de controle proporcional no controle de vazão de biogás permitiu a integração do controlar PI ao controlador centrífugo existente no conjunto motor/gerador.

Embora estimados os parâmetros do controlador PID, o controle derivativo não foi utilizado nos ensaios por restrições à valores negativos do controlador lógico programável, a configuração PID testada em ambiente computacional, apresentou-se como sistema controlável e com tempo de 15 segundos para estabilidade após o degrau.

O ensaio utilizando os controladores simultâneos se mostrou eficaz na partida do conjunto motor/gerador, reduzindo a intervenção humana no con-

trole de vazão de gás na alimentação do conjunto. O sistema proposto não necessita de ajuste intermediários na válvula de expansão. Assim oferece possibilidade de inserir a partida automática no sistema, e ainda proporcionar o acesso ao controle e monitoramento remoto da mesma.

A sistemática adotada na pesquisa permite que os dados obtidos possam servir de ponto de partida para modelamentos computacionais e melhoria dos parâmetros de controle (tempo de resposta para estabilidade, amplitude máxima com carga) da planta de biogás do LEA.

A instalação do biodigestor contínuo deve ser o mais próximo possível do local de coleta do material orgânico. Esse fator reduz os custos de transporte, além de permitir a carga diária do biodigestor. O biodigestor utilizado no LEA é do tipo tubular de ciclo contínuo. Devido à distância entre o biodigestor (LEA) e Capril Said (Eusébio), as cargas foram colocadas em batelada (1200 litros). Essa forma de abastecimento permitiu apenas a produção de biogás a cada dois meses para realização dos ensaios com carga máxima.

A falta de suporte e informações técnicas detalhadas nos manuais do fabricante do conjunto motor/gerador interferiram nos ajustes do equipamento. As informações dos parâmetros de funcionamento e regulagem do controlador centrífugo não constam nos manuais oferecidos, dessa forma as manutenções foram realizadas seguindo as orientações enviadas por meio eletrônico e telefônico.

6.1 Trabalhos Futuros

Com o objetivo de aperfeiçoar o controle de vazão da planta de biogás do LEA são sugeridas as seguintes propostas para trabalhos futuros:

- Realizar o modelamento matemático completo da planta de biogás, assim como os melhores parâmetros para produção de biogás no interior do biodigestor;
 - Utilizar outras configurações de PID no controle de vazão da planta de biogás;
-

- Utilizar outros métodos e algoritmos de controle como por exemplo: fuzzy;
 - Substituir o controlador centrífugo por outro atuador de aceleração do motor para que o controlador possa ajustar vazão e aceleração do motor;
 - Complementar a supervisão em tempo-real da planta e inserir o monitoramento remoto com a utilização da internet;
 - Utilizar a planta de biogás como parte de um sistema híbrido.
-

Apêndice A

Projetos e Artigos Publicados

- MOREIRA, A. P et al. Estimação, controle e simulação do sistema de pressão e vazão de uma planta de biogás. **III Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Belém, 2010.
- MOREIRA, A. P et al. Avaliação e potencial eólico utilizando estimadores de mínimos quadrados baseados na distribuição de Weibull. *VIII Latin-american congress on electricity generation and transmission*. Ubatuba, 2009.
- MOREIRA, A. P et al. Biogás panorama e perspectivas de geração de energia elétrica para a sustentabilidade no meio rural. **VI Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica**. Natal, 2011.
- Projeto de Financiamento para a Aquisição de Equipamentos do LEA - UFC/BNB - **Uso eficiente de biogás produzido em biodigestores**. Fortaleza, 2010.

Referências Bibliográficas

- 1 ANTONIO, D. Off-grid electricity for developing countries. *IEEE Review*, v. 45, p. 25–28, August 2002.
- 2 CARNEIRO, R. Desenvolvimento em crise: a economia brasileira no último quarto do século XX. *Unesp/Unicamp*, São Paulo, 2002.
- 3 RIDALVO, M. A. O. *Impacto do racionamento nos resultados das empresas concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica: um estudo nas empresas privadas da região Nordeste*. 2003. 199f. Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- 4 FOCCACI, A. Empirical analysis of the environmental and energy policies in some developing countries using widely employed macroeconomic indicators: the cases of Brazil, China and India. *Energy Policy*, v. 33, n. 4, p. 543–554, March 2005.
- 5 GHISI, E.; et al. Electricity end-uses in the residential sector of Brazil. *Energy Policy*, v. 35, n. 12, p. 4101–4120, August 2007.
- 6 COHEN, C.; SCHAEFFER, M. L. e R. Energy requirements of households in Brazil. *Energy Policy*, v. 33, n. 4, p. 555–562, 2005.
- 7 GOMES, A. C.; et al. *BNDES 50 anos - histórias setoriais: o setor elétrico*. Rio de Janeiro: BNDES, 2002.
- 8 BAIHIENSE, D. A. *Reestruturação e descentralização do setor elétrico brasileiro: o novo modelo institucional*. Salvador: Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, 2005.

- 9 MME. ***Programa Luz para Todos***. Ministério de Minas e Energia, Disponível em <<http://www.luzparatodos.mme.gov.br>>, Acesso em: Fev. 2011.
- 10 REIS, R. Os benefícios da privatização: evidência no setor elétrico brasileiro. ***Revista de Contabilidade e Organizações***, v. 1, p. 56–70, Mar 2007.
- 11 ELETROBRÁS. ***Relatório: Participação das empresas de geração na capacidade instalada***. Ministério de Minas e Energia, Disponível em: <<http://www.elektrobras.gov.br>>, Acesso em: Nov. 2010.
- 12 SINERGIA. ***Crise energética no Brasil***. Caderno do Sindicato dos Energéticos de São Paulo, São Paulo, Novembro 2001.
- 13 MME. ***Empresa de Pesquisa Energética - Plano Decenal de Expansão de Energia 2019***. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2010.
- 14 ANEEL. ***Relatório ANEEL 2009***. Agência Nacional de Energia Elétrica, 3. ed. Brasília, DF, 2010, 90 p.
- 15 ANEEL. ***Balço Energético Nacional***. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3. ed. Brasília, DF, 2008, ISBN 978-85-87491-10-7.
- 16 CHESF. ***Sistema de Geração***. Companhia hidro Elétrica do São Francisco, Disponível em: <<http://www.chesf.gov.br>>, Acesso em: Mar. 2010.
- 17 IEDI. ***Políticas para promoção da economia verde: a experiência internacional e o Brasil***. Instituto de Estudos Para o Desenvolvimento Industrial, Rio de Janeiro, Novembro 2010.
- 18 GREENPEACE. ***A caminho da sustentabilidade energética: como desenvolver um mercado de renováveis no Brasil***. Greenpeace Brasil, 2008.
-

-
- 19 NOUNIA, M.; MULLICKB, S.; KANDPALB, T. Biomass gasifier projects for decentralized power supply in India: a financial evaluation. *Energy Policy*, v. 35, n. 2, p. 1373–1385, February 2007.
- 20 PORTUGAL, G. de. *Estratégia Nacional para a Energia 2020 - Miniprodução de electricidade*. Governo de Portugal, Disponível em: <<http://www.portugal.gov.pt>>, Acesso em: Mai. 2011.
- 21 SANTOS, L. *Aplicação de indicadores de desempenho em avaliações estratégicas para estudos de viabilidade em empreendimentos de geração descentralizada em sistemas isolados*. 2008. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências Contábeis) - Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá.
- 22 ONS. *Mapas do SIN*. Operador Nacional do Sistema Elétrico, Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>, Acesso em: Mai. 2011.
- 23 KEJUN, Q. A hybrid power system using wind and diesel generator: a case study at Masirah Island in Oman. *Proceedings of the 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, p. 1–4, 2009.
- 24 ANEEL. *Matriz de energia Elétrica*. Agência Nacional de Energia Elétrica, 3. ed. Brasília, DF, 2011, ISBN 978-85-87491-10-7.
- 25 RODRIGUES, A. *Análise da viabilidade de alternativas de suprimento descentralizado de energia elétrica a comunidades rurais de baixa renda com base em seu perfil de demanda*. Rio de Janeiro, 2006. 103f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.
- 26 MYKEN, A. Adding gas from biomass to the gas grid: Final report. *European Commission*, Nov. 2001.
- 27 SANTOS, A. M. *Conservação de Energia - Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*. 3. ed. [S.l.]: PROCEL, 2001. 596 p.
-

-
- 28 SILVA, C. *Limpeza e Purificação de Biogás*. 2009. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal.
- 29 JUCA, A. *Eletrificação rural de baixo custo - norma técnica e vontade política*. 1998. 190f. Dissertação (Mestrado)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- 30 CARVALHO, P. C. M.; COELHO, L. G. J. Sistemas fotovoltaicos para o programa "luz para todos": um estudo para o estado do Ceará. *I Congresso Brasileiro de Energia Solar*, Fortaleza, 2007.
- 31 ZAGO, S. *Potencialidade de produção de energia através do biogás integrada à melhoria ambiental em propriedades rurais com criação intensiva de animais, na região do meio oeste catarinense*. 2003. 103f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Regional de Blumenau, Santa Catarina.
- 32 KATRIANA, T. F.; et al. Custo de geração de energia elétrica em comunidade isolada do Amazonas: estudo preliminar do projeto NERAM. *Revista Brasileira de Energia*, Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, Manaus, 2006.
- 33 BERNDES, G. *Bioenergy and water: the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply*. Department of Physical Resource Theory, Chalmers University of Technology and Goteborg University, Goteborg, Sweden, 2002.
- 34 UNICA. *Cana-de-açúcar processadas pelas usinas brasileiras: safra 2008/2009 para a região Norte-Nordeste*. União da Indústria de Cana-de-açúcar, Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica>>, Acesso em: Mai. 2011.
- 35 IBGE. *Efetivo de animais em estabelecimentos agropecuários por espécie de efetivo*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>, Acesso em: Fev. 2009.
-

- 36 IBGE. *Lavoura Permanente 2009*. Instituto Brasileiro de Geografia, Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat>>, Acesso em: Mai. 2009.
- 37 SOUSA, S. *Energia a partir do lixo no Ceará*. Jornal Diário do Nordeste (Matéria Publicada em 4 de Novembro), Disponível em: <<http://www.diariodonordeste.globo.com/materia.asp?codigo=687039>>, Acesso em: Fev. 2010.
- 38 NETO, E.; et al. Implementação e avaliação de um biodigestor de produção descontínua. *e-xacta*, v. 3, n. 2, 2010.
- 39 ZANETTE, A. L. *Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil*. 2009. 105f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro.
- 40 CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2006. 416 p. ISBN 9788521203988.
- 41 QUADROS, D. *Biodigestor na agricultura familiar do semiárido*. 1. ed. Salvador: EDUNEB, 2009. 96 p. ISBN 978-85-7887-057-7.
- 42 SMIL, V. *General Energetics*. 1. ed. New York: John Wiley, 1985. 426 p.
- 43 NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. *Dendroenergia: Fundamentos e aplicações*. 2. ed. Porto Alegre: Interciência, 2003. 199 p.
- 44 ROMA, P. *Biodigestor: Alternativa para o Manejo de Lixo em Áreas Ecoturísticas*. 2003. 46f. Monografia (Especialização) - Universidade de Brasília - UNB, Brasília - DF.
- 45 COELHO, A.; et al. *Medidas mitigadoras para a redução de emissões de gases de efeito estufa na geração termelétrica*. 2. ed. Brasília - DF: Dupligráfica, 2000. 222 p.
-

- 46 PALHARES, J.; et al. Utilização de indicadores para avaliar a receptividade de propriedades ao processo de biodigestão anaeróbia. *Boletim Técnico 3, Embrapa Suínos e Aves*, Concórdia, 2006.
- 47 CANAFISTULA, F. *Biodigestor como opção de fonte energética para comunidades rurais do semi-árido*. 2009. 93f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza.
- 48 DEGANUTTI, R.; et al. Biodigestores rurais: Modelo indiano, chinês e batelada. *4º Encontro de Energia no Meio Rural*, Campinas. **Anais eletrônicos**, Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br>>, Acesso em: jul. 2011.
- 49 IICA. *Fomento e Administração de Programas Nacionais de Biogás*. Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura, Paraíba, Novembro 1981.
- 50 SPERLING, M. *Princípios básicos do tratamento de esgotos*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Fevereiro 1996. 211 p.
- 51 GUNNERSON, C.; et al. *Anaerobic digestion (biogas) systems: principles of integrated use and their application in developing countries*. 2. ed. Florida: WISE, D.L. International biosystems, 1989. 340 p.
- 52 EPA. *The AgStar Biogas Handbook*. Environmental Protection Agency, Disponível em: <<http://www.epa.gov/agstar/library/handbook.htm>>, Acesso em: Abr. 2011.
- 53 KUCZMAN, O. *Eficiência com custo reduzido: os benefícios da fermentação anaeróbia*. Jornal da Coopavel, Cascavel, 2002. 22 p.
- 54 OLIVEIRA, P.; HIGARASHI, M. *Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos*. Programa Nacional do Meio Ambiente II - EMBRAPA, Concórdia - SC, Fevereiro 2006.
-

-
- 55 RECOLAST. *Biodigestor*. Recolast Ambiental, Disponível em: <<http://www.recolast.com.br/meio-ambiente/biodigestor.php>>, Acesso em: Mai. 2011.
- 56 EAB. *Enciclopédia agrícola brasileira*. 3. ed. Brasília - DF: Universidade de São Paulo e Escola Superior Agrícola Luiz Queiroz, 1995. 416 p. ISBN 85-314-0129-1.
- 57 TIJMENSEN, M.; BROEK, R. Clean power from farm wast - international experiences with anaerobic digestion of farm manure. *Renewable Energy Word*, v. 7, n. 2, p. 124 – 131, August 2004.
- 58 TRICASE, C.; LOMBARDI, M. State of the art and prospects of italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations. *Renewable Energy Word*, v. 34, n. 3, p. 477–485, Mai 2008.
- 59 DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources An Introduction*. Heidelberg: WILEY-VCH Verlag GmbH. KGaA, WMX Design, 2008. 245 p. ISBN 978-3-527-31841-4.
- 60 FREITAS, E. *Biogás*. Brasil Escola, Disponível em: <<http://www.brasilestola.com/geografia/biogas.htm>>, Acesso em: Fev. 2010.
- 61 MME. *Balanco Energético Nacional - Resultados Preliminares - Ano base 2009*. Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética, Brasília - DF, Mar 2010.
- 62 MME. *Plano Nacional de Energia 2030*. Disponível em: <<<http://www.epe.gov.br/PNE>, Acesso em: out. 2010>.
- 63 ANEEL. *Resolução Normativa Nº 390 de 15 de Dezembro De 2009 - Outorga de autorização para exploração de usinas termelétricas e outras fontes alternativas de energia e registro de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida*. Agência Nacional de Energia Elétrica, Dezembro 2009.
- 64 OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 4. ed. Minnesota: Pearson Prentice Hall, 2011. 800 p. ISBN 8587918230.
-

- 65 LUYBEN, W. L. *Process modeling, simulation, and control for chemical engineers*. 2. ed. Pennsylvania: McGRAW-HILL, 1996. 749 p. ISBN 0070391599.
- 66 DUNN, W. *Introduction to instrumentation, sensors, and process control*. 1. ed. Norwood, MA: Artech House, Inc, 2006. 354 p. ISBN 1-58053-011-7.
- 67 MACHADO, L. *Engenharia de Controle Moderno*. UFSC, Florianópolis, 2004.
- 68 WILLIS, M. *Proportional-Integral-Derivative Control*. 2. ed. Department of Chemical and Process Engineering, University of Newcastle, Newcastle, 1999.
- 69 INSTRUMENTS, N. *Controle PID*. National Instruments, Disponível em: <<http://digital.ni.com/worldwide/brazil.nsf/web>>, Acesso em: Fev. 2010.
- 70 DESOBOROUGH, L.; MILLER, R. *Increasing Customer Value of Industrial Control Performance Monitoring Honeywell Experience*. 6th International Conference on Chemical Process Control, AIChE Symp. Serie 326, New-York, 2002.
- 71 ASTROM, K. J.; HAGLLUND, T. *PID controllers: theory, design and tuning*. 2. ed. [S.l.]: Lund Institute of Technology: Isa, 1994. 343 p. ISBN 1556175167.
- 72 TAKATSU, H.; ITOH, T. Future needs for control theory in industry: Report of the control technology survey in japanese industry. *IEEE - Transaction on Control Systems Technology*, v. 7, n. 3, p. 298–305, May 1999.
- 73 FRANKLIN, G.; POWELL, J. D. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 4. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2002. 910 p. ISBN 0130323934.
- 74 GOODWIN, G. C.; GRAEBE, E.; SALGADO, M. E. *Control System Design*. 1. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2000. 908 p. ISBN 0139586539.
-

- 75 ENDER, D. B. Process control performance: Not as good as you think, control engineering. *Industrial Computing - ISA journals*, p. 40 – 51, Aug. 1993.
- 76 MATIAS, J. Teoria de controle PID. *Revista Mecatrônica Atual*, São Paulo, v. 3, 2002.
- 77 CASSIOLATO, C.; ALVES, E. Medição de vazão. *Controle e Instrumentação*, São Paulo, v. 11, n. 138, p. 70–78, Nov. 2008.
- 78 CHAU, P. *Chemical Process Control: A First Course with MATLAB*. San Diego: University Of California, 2001. 307 p. ISBN 521-80760-3.
- 79 POLLARD, A.; et al. *Flow control fundamentals and practices*. 1. ed. Berlin: Springer, 1998. 527 p. ISBN 3540639365.
- 80 DELMEE, G. *Manual de Medição de Vazão*. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003. 366 p.
- 81 SCHNEIDER, P. *Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos*. GESTE - Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos - Escola de Engenharia - UFRS, Porto Alegre, 2000.
- 82 NATALE, F. *Automação Industrial*. 10. ed. Revisada e Atualizada, São Paulo: Érica, 2000. 256 p. ISBN 8571947074.
- 83 HEINZ, J. K.; TIEGELKAMP, M. *IEC 61131-3: programming industrial systems - concepts and programming languages, requirements for programming systems, decision-making aids*. 2. ed. London: Springer, 2010. 348 p. ISBN 978-3-642-12014-5.
- 84 ROSARIO, J. *Princípios de Mecatrônica*. 1. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005. 368 p. ISBN 8576050102.
- 85 ELIPSE. *HMI/SCADA software - manual do usuário*. 2.29. ed. Porto Alegre: Elipse SCADA Ltda, 2008. 102 p.
- 86 LJUNG, L.; SODERSTROM, T. *Theory and Practice of Recursive Identification*. Massachusetts: MIT Press, 1987. 552 p. ISBN 0262620588.
-

87 COELHO, A.; COELHO, L. *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 2004. 181 p. ISBN 853280280X.

Esta dissertação foi produzida com L^AT_EX.
