

ROBERT GUIMARÃES SILVA

**DIMENSIONAMENTO E LEVANTAMENTO DE
CUSTOS DE FONTES ENERGÉTICAS,
CONSIDERANDO OS RECURSOS HÍDRICOS
PARA USO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2014

ROBERT GUIMARÃES SILVA

DIMENSIONAMENTO E LEVANTAMENTO DE CUSTOS DE FONTES ENERGÉTICAS, CONSIDERANDO OS RECURSOS HÍDRICOS PARA USO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Mecânica dos Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Fortes de Miranda.

UBERLÂNDIA - MG

2014

ROBERT GUIMARÃES SILVA

**DIMENSIONAMENTO E LEVANTAMENTO DE CUSTOS DE
FONTES ENERGÉTICAS, CONSIDERANDO OS RECURSOS
HÍDRICOS PARA USO EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

Tese **APROVADA** pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Mecânica dos Fluidos

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ricardo Fortes de Miranda – UFU - Orientador

Prof. Dr. Rubens Soeiro Gonçalves – IFMA - Coorientador

Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho – UFU - Componente

Prof. Dr. João Manoel Dias Pimenta – UNB - Componente

Prof. Dr. Valério Luiz Borges – UFU – Componente

Prof. Dr. Ricardo Nicolau Nassar Koury – UFMG - Componente

Uberlândia, Abril de 2014.

À Deus.

*Aos meus pais, Bento (In memorian) e Olga.
Ao meu filho Pedro Guimarães.*

A dedicação do autor.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão - IFMA, por ter possibilitado essa oportunidade.

À Universidade Federal de Uberlândia - UFU, através da Faculdade de Engenharia Mecânica, pela realização deste Curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro.

Aos meus pais Bento (*In memorian*) e Olga, sinônimos de caráter, bondade e carinho, pelos ensinamentos, apoio, compreensão e amor recebidos em toda minha vida por eles.

Ao meu filho Pedro Guimarães, que só me trás alegria, que me fez ver o mundo melhor, apesar das barreiras e dificuldades encontradas nessa jornada.

Aos meus avós, Vô Chiquinho, Mãe Eva, Vô Antônio, Mãe Sinhá, que sempre confiaram em mim (*In memorian*).

Aos meus irmãos, Rita, Nádia, Bento e Vinícius pelo carinho e amizade.

A todos meus familiares, tios(as), sobrinhos(as), primos(as), cunhado(a), pelo respeito e confiança.

Ao meu orientador prof. Dr. Ricardo Fortes de Miranda, pela orientação firme e consistente.

Ao meu Coorientador, prof. Dr. Rubens Soeiro Gonçalves, pela intensa participação, paciência e apoio.

Ao prof. Keyll, responsável pela realização do programa de doutorado, pela luta, coragem e determinação.

Ao colega do curso Juca pela cooperação, amizade e apoio dado em todo o curso.

Aos colegas do curso Remi e Bosco, pela ajuda em momentos cruciais.

Aos colegas de curso: Laécio, Alfredo, Ivana, Júnior, Tiago, Valdemir, Valter e Carmen pela amizade.

Aos amigos, particularmente: Jorge, Mirian, Daniele, Rubeni, Marta, Heidegger, Carlos Elpídio, Jailsila, Kadja e Conceição, pela paciência, carinho e amizade.

Aos colegas servidores administrativos e docentes do IFMA – Campus Imperatriz, pelo companheirismo.

Aos colegas servidores administrativos e docentes do IFMA – Campus Monte Castelo, do Departamento de Mecânica pelo acolhimento e presteza.

A todos os amigos da FAMA, em especial: Tarsila, Valéria, Dorinha e Rosélia.

A todos os amigos da FEST, em nome do prof. Manoel pelo apoio.

Aos professores e servidores da FEMEC / UFU, em particular: Solidônio; Ênio; Oscar; Cleudimar, Márcio, Valério e Duarte.

Aos Professores Doutores: Wilson (UEMA); Valdemar (IFMA); Mauro (IFMA) e Ernandes (IFMA), pela colaboração e orientação dada.

A empresa Casa das Bombas de Imperatriz – MA, em nome do Sr. Francisco pelo acolhimento e presteza nas informações.

Aos amigos do GIL, em nome de Márcio Papel pelos momentos de descontração, amizade e alegria.

Às professoras Suzianny e Ieda, pela gentileza em colaborar.

Os Agradecimentos sinceros do autor.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	x
LISTA DE SIGLAS	xv
LISTA DE APÊNDICES	xvii
LISTA DE FIGURAS	xviii
LISTA DE TABELAS	xxii
CAPÍTULO I – Introdução	25
1.1 Justificativa	27
1.2 Objetivos	29
1.2.1 Objetivo Geral	29
1.2.2 Objetivos Específicos	29
1.3 Estrutura do Trabalho	30
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica	31
2.1 Introdução	31
2.2 Agricultura Familiar	35
2.3 Água Superficial e Subterrânea	38
2.4 Fontes de Energia	40
2.5 Sistemas de Irrigação	42
2.6 Princípios, Seleção e Acionamento de Bombas	54
2.7 Bombeamento Usando Fontes Energéticas Variáveis	66
2.8 Seleção de Bombas	71
2.9 Dimensionamento de Sistemas com Energia Solar	74
2.10 Uso de Bombas nos Sistemas de Irrigação	84
2.11 Custos dos Sistemas de Bombeamento.	88
2.12 Conceitos e Classificação de custos	90
2.13 Custo de Energia para Bombeamento	93
2.14 Custos Relacionados ao Bombeamento	100
CAPÍTULO III - Metodologia	104
3.1 Natureza e Tipo de Pesquisa	104
3.2 Localização, Período da Pesquisa, População e Amostra	104
3.3 Variáveis de Estudo	106
3.4 Métodos, Instrumentos e Técnicas de Coleta de Dados	106

3.5 Tipo, Fonte e Processamento de Informações	107
3.6 Pré-teste e Técnicas de Análise e Sistemas Utilizados	107
3.7 Materiais	107
3.8 Métodos	109
CAPÍTULO IV- Análise Técnica e Econômica	111
4.1 Análise Técnica de Bombeamento com Energia Elétrica	111
4.2 Análise Técnica de Bombeamento com Energia à Combustão	113
4.3 Análise Técnica de Bombeamento com Energia Solar	114
4.4 Escolha da Bomba Segundo as Condições de Campo	120
4.5 Definição dos Custos Segundo a Fonte de Energia	133
4.6 Custo Anual dos Sistemas de Bombeamento	136
4.7 Composição dos Custos de Bombeamento	137
4.8 Custos do Sistema de Irrigação	139
4.9 Definição dos Componentes de Custo	147
4.10 Escolha da Bomba Segundo as Condições de Campo	150
4.11 Componentes Hidráulicos e Informações em Processo	151
CAPÍTULO V - Resultados e Discussões	154
5.1 Descrição e Análise do <i>Software</i>	154
5.2 Restrições do Uso de Bombas	156
5.3 Escolha da Bomba Segundo Critério de Custos Usando o <i>Software</i>	159
5.4 <i>Menus</i> e <i>Submenus</i>	160
5.4.1 Etapa 1: Início	160
5.4.2 Etapa 2: Seleção do Sistema	162
5.4.3 Etapa 3: Entrada de Dados	163
5.4.4 Etapa 4: Saída de Dados (Otimização)	165
5.4.5 Etapa 5: Saída de Dados (Dimensionamento motobomba)	167
5.4.6 Etapa 6: Saída de Dados (Levantamento de custos)	169
5.4.7 Etapa 7: Comparação dos Sistemas	172
5.4.8 Etapa 8: Projeção de Custos	172
5.5 Condição para um Hectare (Tarifas Reais)	173
5.6 Condição para um Hectare (Resultados com Tarifação Diferenciada)	177
5.7 Resultados de Campo	180

CAPÍTULO VI - Conclusões	199
6.1 Considerações Finais	201
6.2 Principais Recomendações	202
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	204
APÊNDICES	217

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas, Subscritos e Sobrescritos:

“a” e “b”	Coeficiente de ajuste de regressão
A	Área irrigada (m ²)
Ab	Autonomia do banco de baterias
Ah	Ampére hora
C	Constante de Hazen-Willians
CA	Corrente alternada
C_a	Custos iniciais da adutora
Cap_b (%)	Capacidade de uma bateria
Cap_D (%)	Capacidade do banco de baterias
CB	Consumo da bomba
CB'	Consumo corrigido da bomba
CC	Corrente contínua
C_{ed}	Valor mensal do consumo de energia (R\$)
C_{EE}	Custo de energia consumido (R\$)
CE_{Mês}	Consumo de energia no mês(kW)
C_{inicial}	Custo inicial de implantação do sistema (R\$)
CM	Consumo medido (kW)
CM_a	Consumo de energia elétrico medido no ano (kWh)
CM_{he}	Consumo de energia elétrico medido no horário especial para irrigantes (kWh)
CM_{he}	Consumo de energia elétrico medido no horário complementar ao especial para irrigantes (kWh)
Co	Consumo anual de combustível (m ³ .cv.h)
Cor (%)	Consumo corrigido da bomba
C_R	Capacidade do banco de baterias
C_{SR}	Custos do sistema de recalque (R\$)
Cu	Preço de combustível (R\$)
d	Número de meses por ano sem operar o sistema
D	Diâmetro (m)

D_Compara	Tela de comparação entre os sistemas
ddp	Diferença de potencial
D_Ótimo	Tela do diâmetro ótimo obtido
D_Solar	Tela do diâmetro ótimo solar obtido
DM	Demanda medida (kWh)
dⁿ	Número de dias necessários para recarregar a bateria
E_B	Energia fornecida pela bomba
EE	Recarga de bateria (energia excedente)
E_P	Energia gerada por um painel fotovoltaico
E_S	Energia diária de suprimento
E_{S'}	Nova energia diária de suprimento
FAD	Faturamento anual de demanda (R\$)
FV	Fotovoltagem
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
H_b	Horas de acionamento da bomba
h_f (h_e)	Perda de carga localizada (m/m)
Hg	Altura geométrica
Hgr (H_R)	Altura geométrica de recalque
Hgs(H_S)	Altura geométrica de sucção
Hman (H_m)	Altura manométrica
hp	Horse power (cavalo vapor)
h_R	Perda de carga no recalque (m/m)
h_S	Perda de carga na sucção (m/m)
H_V	Altura vertical (m)
I	Intensidade de corrente (A)
i (r)	Taxa de juro anual (%)
I^A_{CC}	Corrente de curto circuito (A)
I_m	Corrente mínima para controlador de carga (A)
J	Perda de carga unitária (m/m)
K	Coeficiente da equação
K_S	Constante específica para cada singularidade
kW	Quilowatts
l	Comprimento de recalque (m)

m	Metros
N	Número mínimo de painéis fotovoltaicos
N	Newton
N_dias_ano	Número de dias por ano do sistema funcionando
N_B	Número de baterias necessárias
P	Número de controladores em paralelo
PA	Período de amortização do sistema
P_{am}	Pressão atmosférica local
P_B	Potência da bomba (kW; cv; hp)
P_M	Potência do motor (kW; cv; hp)
P_{OT(ativa)}	Potência ativa (kW; cv; hp)
P_{OT(útil)}	Potência útil (kW; cv; hp)
P_p	Potência de um painel (kW; cv; hp)
Q	Vazão (m ³ /s)
Q_{Bomba}	Vazão da bomba (m ³ /s)
Qt	Vazão total (m ³ /s)
Qu	Consumo da cultura / Vazão unitária (m ³ /s)
R	Taxa anual de juros (%)
R	Valor residual (%)
R\$	Reais
Re	Número de Reynolds
s	Segundos
S_P	Sol pleno
t_a	Tempo de funcionamento / operação diária do sistema
Te	Tipo de energia
T_{hc}	Tempo de funcionamento do sistema no horário fora de ponta no ano (h)
T_{he}	Tempo de funcionamento do sistema no horário especial para irrigantes no ano (h)
V	Voltagem
v	Velocidade (m/s)
V_{acumulada}	Vazão total (acumulada) (m ³ /s)
VR	Valor residual

X	Número de horas de trabalho da instalação por ano dividido por 8760
W_p	Wats pico

Letras Gregas:

Σ	Somatório
π	Letra que equivale a 3.1416...
Δh	Perda de carga no trecho
μ	Viscosidade absoluta
$\epsilon (e)$	Rugosidade
γ	Peso específico do fluido
η_{MB}	Rendimento / Eficiência do conjunto motobomba
ν	Viscosidade cinemática
P	Massa específica do fluido
Φ	Diâmetro

Unidades:

m/s²	Aceleração da gravidade
m²	Área
m	Comprimento, altura
kWh	Consumo de energia
m³/cv.h	Consumo do motor
R\$/m³	Custo unitário
R\$/m³	Custo unitário do combustível
m	Diâmetro
R\$	Faturamento, ajuste
A	Intensidade de corrente
m/m	Perda de carga

N/m²	Peso específico
N/m³	Peso específico
kW	Potência
%	Rendimentos, taxas, juros, residual
R\$/kW	Tarifas
dias, meses, h, s	Tempo, período
m³/s	Vazão
m/s	Velocidade
m³/s	Viscosidade

LISTA DE SIGLAS

AMA	Amortização anual
ANA	Agência Nacional de Água
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BCEH	Bomba centrífuga de eixo horizontal
BCEV	Bomba centrífuga de eixo vertical
CABO	Custo Anual de Bombeamento
CAMR	Custo Anual de Manutenção e Reparos
CAT	Custo Anual Total
CEMAR	Centrais Elétricas do Maranhão
CEMIG	Centrais Elétricas de Minas Gerais
CF (CI, CFA)	Custo Fixo Anual (Custo de Implantação/Investimento)
CH	Carneiro Hidráulico
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
CV (CO)	Custo Variável (Custo de Operação)
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
fdtc	Fração de desconto sobre a tarifa de consumo para irrigantes
FECO	Fonte de energia à combustão
FEEC	Fonte de energia elétrica convencional
FEEH	Fonte de energia elétrica horosazonal
FESO	Fonte de energia solar
FRC	Fator de recuperação de capital
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDEC	Instituto de Defesa do consumidor
INCRA	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INMET	Instituto Nacional de Metrologia
KS	<i>Kit</i> Solar
LD	Linha de derivação
LL	Linha lateral
LP	Linha principal
MatLab	MATrix LABoratory

MMA	Ministério do meio Ambiente
NPSH _{disponível}	Net Positive Suction Read (pressão disponível)
NPSH _{requerido}	Net Positive Suction Read (pressão requerida)
ONU	Organização das Nações Unidas
PRONAF	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
PVC	Policloreto de Vinila
RD	Roda D'água
REA	Remuneração Anual
Rend_B	Rendimento da Bomba
Rend_MB	Rendimento do Motor Bomba
RPM	Rotações por Minuto
T_{cc}	Tarifa de Consumo Convencional
SIGFI	Sistemas Individuais de Geração com Fontes Intermitentes
TCvfps	Tarifa de consumo horosazonal verde fora da ponta: período seco
TCvfpu	Tarifa de consumo horosazonal verde fora da ponta: período úmido
TCvps	Tarifa de consumo horosazonal verde na ponta: período seco
TCvpus	Tarifa de consumo horosazonal verde na ponta: período úmido
T_{DC}	Tarifa de demanda convencional
TD_v	Tarifa de demanda horosazonal verde
tfps	Tempo de operação diário do sistema fora de ponta: período seco
tfpu	Tempo de operação diário do sistema fora de ponta: período úmido
thes	Tempo de operação diário do sistema entre 23 e 5h: período seco
theu	Tempo de operação diário do sistema entre 23 e 5h: período úmido
tps	Tempo de operação diário do sistema na ponta no período seco
tpu	Tempo de operação diário do sistema na ponta no período úmido

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice 1	Dados de simulações	215
Apêndice 2	Telas Gerais (para todos os sistemas)	217

LISTA DE FIGURAS

2.1	Croqui da movimentação de um sistema de irrigação por mangueira	49
2.2	Ligaçāo de uma linha de irrigação: reservatório aos aspersores	49
2.3	Layout de um sistema de microaspersão com quatro subunidades	50
2.4	Linha lateral de aspersão	53
2.5	Sistema de aspersão convencional com duas linhas laterais	54
2.6	Diagrama de blocos dos tipos de bombas hidráulicas	54
2.7	Cavitação em uma tubulação	57
2.8	Representação de instalação de bombeamento-eixo horizontal	63
2.9	Sistemas de bombeamento fotovoltaico	65
2.10	Curva de carga típica do sistema elétrico Nacional	67
2.11	Análise econômica de bombas solares e a motor diesel	69
2.12	Curva característica: NPSH x Vazão	74
2.13	Diagrama de um sistema fotovoltaico de bombeamento	76
2.14	Composição do sistema fotovoltaico	79
2.15	Instalação de bombeamento definindo elevações	84
2.16	Curvas do sistema	87
2.17	Curva: potência x vazão	87
2.18	Curva: eficiência x vazão	87
2.19	Definição de custos e resultados	90
2.20	Fontes energéticas e custos envolvidos	91
2.21	Variação dos custos de investimento, operacional e total de um sistema de bombeamento em função do diâmetro da tubulação de recalque	103
3.1	Processo científico indutivo	106
3.2	Fluxograma do <i>software</i> Irrigare 1.0	108
3.3	Fluxograma do <i>software</i> ampliado	108
3.4	Fluxograma geral do processo de escolha da bomba	111
4.1	Custo atual do bombeamento diesel depois de 3, 5 e 10 anos	114
4.2	Curva Característica de bomba fotovoltaica	115
4.3	Curva característica de bomba solar (de 5 a 70 m de elevação)	115

4.4	Curva característica de bomba solar (de 2 a 20 m de elevação)	115
4.5	Horas de insolação no decorrer do ano para Imperatriz – MA	116
4.6	Curva: vazão x H _{man} = potência energia solar	116
4.7	Restrições no uso de bombas	121
4.8	Extrato do Balanço Hídrico Mensal – Imperatriz – MA	124
4.9	Gráfico de linhas da radiação solar no plano inclinado em Imperatriz – MA	126
5.1	Tela “Menu_inicial”	160
5.2	Tela “Sobre” (do link “Sobre o Programa”)	161
5.3	Tela “Inicio_2”	161
5.4	Tela “Quantidade”	162
5.5	Tela “Inicio”	163
5.6	Tela “D_ótimo” - Entrada de dados para energia elétrica convencional	163
5.7	Tela “D_ótimo2” - Entrada de dados para energia elétrica horosazonal	164
5.8	Tela “D_ótimo3” - Entrada de dados para energia elétrica à combustão	164
5.9	Tela “D_ótimo4” - Entrada de dados para energia solar	165
5.10	Tela “Relatório1” para sistema elétrico convencional	165
5.11	Tela “Relatório3” para sistema elétrico horosazonal	166
5.12	Tela “Relatório4” para sistema à combustão	166
5.13	Tela “Relatório9” para sistema solar	167
5.14	Tela “Custo” para sistema elétrico convencional	167
5.15	Tela “Custo2” para sistema elétrico horosazonal	168
5.16	Tela “Custo3” para sistema à combustão	168
5.17	Tela “D_Solar” para sistema solar	169
5.18	Tela “Relatório10” para sistema solar	169
5.19	Tela “Relatório2” para sistema elétrico convencional	170
5.20	Tela “Relatório5” para sistema elétrico horosazonal	170
5.21	Tela “Relatório7” para sistema à combustão	171
5.22	Tela “Relatório6a” para sistema solar	171
5.23	Tela “D_Compara” para comparação de todos os sistemas	172
5.24	Tela que ilustra o gráfico de comparação e projeção dos sistemas	173
5.25	Resultados para a condição de um hectare (Caso – 1)	174
5.26	Gráfico da relação do CAT: energia elétrica convencional esolar (Caso-1)	174
5.27	Gráfico da relação do CAT: energia elétrica horosazonal e solar (Caso-1)	175

5.28	Gráfico da relação do CAT: energia à combustão esolar (Caso–1)	175
5.29	Gráfico da relação do CAT entre todas as fontes de energia (Caso–1)	176
5.30	Comparação de sistemas com tarifas diferenciadas (Caso–2)	177
5.31	Gráfico da relação do CAT: energia elétrica convencional esolar (Caso–2)	178
5.32	Gráfico da relação do CAT: energia elétrica horosazonal e solar (Caso–2)	178
5.33	Gráfico da relação do CAT: energia à combustão e energia solar (Caso–2)	179
5.34	Gráfico da relação do CAT entre todas as fontes de energia (Caso–2)	179
5.35	Resultados na tela “D_compara” –Cenário 1	180
5.36	Projeção de custos entre o sistema elétrico convencional e solar–Cenário 1	181
5.37	Projeção de custos entre o sistema elétrico horosazonal e o solar–Cenário 1	181
5.38	Projeção de custos entre o sistema à combustão e o solar–Cenário 1	182
5.39	Projeção de custos entre todos os sistemas–Cenário 1	182
5.40	Resultados na tela “D_compara” – Cenário 2	183
5.41	Projeção de custos entre o sistema elétrico convencional e solar–Cenário 2	184
5.42	Projeção de custos entre o sistema elétrico horosazonal e solar– Cenário 2	184
5.43	Projeção de custos entre o sistema à combustão e o solar–Cenário 2	185
5.44	Projeção de custos entre todos os sistemas–Cenário 2	185
5.45	Resultados na tela “D_compara” –Cenário 3	186
5.46	Projeção de custos entre o sistema elétrico convencional esolar–Cenário 3	187
5.47	Projeção de custos entre o sistema elétrico horosazonal esolar–Cenário 3	187
5.48	Projeção de custos entre o sistema à combustão esolar – Cenário 3	188
5.49	Projeção de custos entre todos os sistemas – Cenário 3	188
5.50	Resultados na tela “D_compara” – Cenário 4	189
5.51	Projeção de custos entre o sistema elétrico convencional e solaCenário 4	190
5.52	Projeção de custos entre o sistema elétrico horosazonal e o solar- Cenário 4	190
5.53	Projeção de custos entre o sistema à combustão e solar–Cenário 4	191
5.54	Projeção de custos entre todos os sistemas–Cenário 4	191
5.55	Resultados na tela “D_compara” – Cenário 5	192
5.56	Projeção de custo entre o sistema elétrico convencional e solar–Cenário 5	193
5.57	Projeção de custos entre o sistema elétrico horosazonal e solar–Cenário 5	193
5.58	Projeção de custos entre os sistemas combustão e solar–Cenário 5	194
5.59	Projeção de custos entre todos os sistemas–Cenário 5	194
5.60	Resultados na tela “D_compara” – Cenário 6	195

5.61	Projeção de custo entre o sistema elétrico convencional e solar- Cenário 6	196
5.62	Projeção de custos entre o sistema elétrico horosazonal e solar- Cenário 6	196
5.63	Projeção de custos entre os sistemas combustão e solar–Cenário 6	197
5.64	Projeção de custos entre todos os sistemas–Cenário 6	197

LISTA DE TABELAS

2.1	Eficiência e uso de energia por método de irrigação	44
2.2	Eficiência de irrigação média em diferentes regiões	44
2.3	Evolução da área irrigada no Brasil	45
2.4	Comparação entre os dois principais sistemas de irrigação localizada	51
2.5	Comparação entre rendimento e custo de um sistema de bombeamento	85
4.1	Parâmetros de energia solar para $h = 40$ m (altura de elevação)	117
4.2	Definição de parâmetros de energia solar para $h = 30$ m	118
4.3	Definição de parâmetros de energia solar para $h = 10$ m	118
4.4	Definição de parâmetros de energia solar para $h = 5$ m	119
4.5	Definição de parâmetros de energia solar	119
4.6	Possibilidade do uso de fontes de energia e água	122
4.7	Condições qualitativas da região delimitada para estudo	125
4.8	Radiação média diária mensal de Imperatriz – MA	125
4.9	Dados de entrada para dimensionamento das instalações	130
4.10	Custos de materiais e equipamentos de um sistema de bombeamento	134
4.11	Quadro resumo das simulações realizadas em campo	135
4.12	Consumo de água para diferentes culturas no ciclo total de desenvolvimento	137
4.13	Parâmetros de entrada para definição de custos de bombeamento	138
4.14	Componentes de custos segundo a fonte de energia	148
4.15	Condições que afetam as fontes de energia	151
4.16	Base de dados para simulações	153
4.17	Custos de bombeamento por fontes de energia	153
5.1	Valores de eficiência de bombas segundo a vazão	157

Silva, Robert G. **Dimensionamento e Levantamento de Custos de Fontes Energéticas, Considerando os Recursos Hídricos para Uso em Sistemas de Bombeamento.** 2014. 230 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

RESUMO

Com a necessidade de obter minimização de custos, este trabalho propõe uma investigação para um modelo de dimensionamento dos sistemas de bombeamento para irrigação, usando fontes variadas de energias, resultando no diâmetro ótimo e na potência do conjunto motobomba, enfatizando a eficiência hidráulica, energética e econômica, tendo como restrições outras variáveis hidráulicas, caracterização do ambiente e fontes de água disponíveis em cada região estudada. O principal objetivo é encontrar e comparar os custos totais obtidos em função dos custos fixos (investimento realizado) e variáveis (manutenção e operação), compreendido no trecho entre a captação de água e a distribuição para irrigação. A metodologia envolve diversas variáveis hidráulicas e custos energéticos de fontes variadas de energia, além dos custos de implantação. Empregando-se essa metodologia pode-se alcançar um dimensionamento que forneça o diâmetro ótimo, com a consequente diminuição dos custos envolvidos e fontes de energia adequada. Para atingir os objetivos propostos foi confeccionado um *software* denominado *Irrigare 1.0*, desenvolvido em código computacional MATLAB, visando dimensionar o sistema de bombeamento e definir custos envolvidos a partir do uso das fontes seguintes de energia: elétrica convencional, elétrica horosazonal, combustão e solar. Foram realizados estudos de caso para simular situações de campo, em que são definidas as fontes de energia, fonte de água e tipo de bomba a ser empregada no processo de irrigação na agricultura. Os resultados demonstraram custos diferenciados com respectivas projeções no decorrer dos anos, o que possibilita a escolha do sistema energético adequado, segundo as fontes de água existentes, com base nas características locais.

Palavras-chave: *software*; Otimização; Sistemas de Bombeamento; Custos; Fontes de Energia; Irrigação.

Silva, Robert G. **Design and Survey Costs Energy Sources, whereas the Water for Use in Pumping Systems.** 2014. 230 p. Doctoral Thesis. Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Minas Gerais, Brazil.

ABSTRACT

As a need for lower costs, this research proposes an investigation on a scaling model for irrigation pumping system, using different sources of energy, having as a result the optimum diameter and the pump set power, emphasizing the hydraulic, energetic and economical efficiency, restricting other hydraulic variables, environment characterization and available sources of water in each studied region. The main objective is to find and compare total costs over overhead costs (investment) and variables (maintenance and operation), within the water capitation and irrigation distribution path. The methodology involves many hydraulic variables and energetic costs and varied sources of energy, plus implantation costs. The use of this methodology may reach a scaling that will provide the optimum diameter, lowering the costs and adequate source of energy. A *software*, named Irrigare 1.0, was designed to fulfill the objectives, developed in MATLAB computational code, focusing pump system scaling and define involved costs from the use of the following sources of energy: conventional, horosazonal, combustion and solar. Case studies were carried out to simulate field situations, which it defined the sources of energy, sources of water and the type of pump should be used in the agriculture irrigation process. The results showed differentiated costs with respective projections over the years, which enable the choice of the adequate energetic system, according the existing sources of water, based on the local technical features.

Keywords: *software*; Optimization; Pumping Systems; Costs; Sources of Energy; Irrigation.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O fornecimento de água para as comunidades rurais tem grande importância no seu desenvolvimento. A ausência de energia resulta em menor qualidade de vida e consequente afastamento da população para as grandes cidades. A indisponibilidade de eletricidade e as dificuldades de acessibilidade geográfica resultam em abastecimento precário de fornecimento de água, pois os meios de transporte de água exigem sistemas de bombeamento eficazes, que, na grande maioria, são acionados por energia elétrica.

No Brasil, inúmeras comunidades, particularmente nas regiões Norte e Nordeste, não têm acesso a energia elétrica. Para atender essa demanda vem-se utilizando de fontes alternativas de energia, como a solar fotovoltaica, que pode ser usada para acionamento de bombas de água. Suas vantagens podem ser analisadas sob diversos aspectos, como a abundância da fonte solar em todo o planeta. A tecnologia atualmente existente já se encontra consolidada, com alta confiabilidade e uma vida útil que pode atingir até 25 anos. Evita-se com essa fonte de energia o transporte e custos de aquisição de combustível, linhas de transmissão, além do não envio de gases poluentes ao meio ambiente.

Na região Nordeste brasileira existem problemas sérios de abastecimento de água potável e baixos índices pluviométricos. A baixa precipitação média anual, que oscila entre 400 e 600 mm, distribuídos de forma irregular no decorrer do ano, além de uma alta insolação, da ordem de 2.000 horas de irradiação solar, causam problemas de

alta evapotranspiração e aridez no solo. No entanto, essa alta irradiação favorece uma possibilidade de uso dessa fonte de energia em quase todo o território Nacional.

Levando-se em consideração os condicionantes físicos da região relacionados à disposição de água superficial e subterrânea e a existência de energia elétrica, associados aos custos envolvidos no processo de retirada de água para irrigação para a agricultura familiar, esse estudo traz uma proposta de minimização de custos considerando custos fixos e variáveis, com obtenção de diâmetros e velocidades ótimos, além de potência adequada para o motor com a menor perda possível. Para isso, todo o sistema, da captação a distribuição de água, é dimensionado e depois calculado seus custos, com a finalidade ainda de compará-los e definir o melhor sistema a ser usado, tomando como base esses custos.

Os custos a serem reduzidos referem-se às escolhas adequadas de bombas e canalizações observando-se as necessidades de campo para irrigação, segundo as disponibilidades de água e energia, fornecendo assim o sistema que melhor atenda o agricultor, com o melhor retorno financeiro possível para que ele possa obter mais renda em seu investimento.

Para isso foi desenvolvido um *software* com o objetivo de analisar o dimensionamento de um sistema de irrigação a partir da utilização de algumas das principais fontes de energia utilizadas atualmente (elétrico convencional, elétrica horosazonal, combustão e solar), através de uma plataforma amigável com o usuário, em que são definidas as fontes de água e tipos de bombas a serem empregadas no processo de irrigação, sendo estas conhecidas a partir das restrições de entrada que serão fornecidas, conforme dados de campo.

A utilização do *software* proposto facilita a análise, dimensionamento e seleção do sistema a ser aplicado na agricultura de pastagens e frutíferas para pequenas áreas, em particular para a agricultura familiar.

1.1 Justificativa

Sendo a água um componente fundamental para a saúde, desenvolvimento e benefícios múltiplos para a sociedade, devem ser viabilizadas formas de sua obtenção. A água permite a fixação do homem no campo, quando este a tem disponível para consumo próprio, para uso em suas culturas e para seus animais. Porém, muitas comunidades não dispõem de alguma forma que dê acesso a água com garantias de potabilidade. Com a ausência da água superficial, comunidades vivem sem perspectiva de crescimento e fonte de renda mesmo tendo disponíveis aquíferos subterrâneos com abundância de água de qualidade.

As variadas fontes de energia podem fornecer alternativas adequadas para a agricultura familiar no bombeamento de água observando-se o aspecto econômico. Por outro lado, a utilização de fontes de energia renovável para a irrigação pode reduzir o uso de combustíveis fósseis, grandes responsáveis pela poluição ambiental no planeta e todos os aspectos negativos que a envolvem. Nesse aspecto, podem ser usadas somente as bombas acionadas por fontes limpas ou associadas àquelas que necessitam de combustíveis fósseis, fornecendo assim um sistema híbrido com máximo aproveitamento da fonte renovável em detrimento da fonte fóssil. Reduz-se com isso substancialmente a emissão de poluentes dependendo do potencial energético limpo que será aproveitado para o acionamento da bomba.

Já existem projeções feitas por organizações internacionais, que pesquisam produção e distribuição de energia, onde as fontes eólicas e fotovoltaicas serão mais competitivas nos próximos anos, com redução de custos, baixo impacto social e ambiental e com a ampla vantagem sobre outras fontes por ser renovável. A utilização dessas fontes deve ser estimulada em populações isoladas e pobres, pois possui baixo custo operacional e reduz o impacto causado por combustíveis fósseis e desmatamentos pela retirada da madeira. Dias (1992) afirma que essas comunidades são as maiores responsáveis por esse tipo de poluição no meio ambiente.

Com isso, pode-se formular a hipótese de que essas formas de energia podem diminuir custos dos sistemas de irrigação em agricultura familiar, possibilitando maiores retornos financeiros e melhor qualidade de vida, reduzindo impactos ambientais e sociais através da manutenção do agricultor no campo.

Partindo dessa premissa, uma grande contribuição desse trabalho refere-se à expectativa de atender famílias de baixa renda, no caso os agricultores familiares, pois prevê uma possibilidade de escolha de fontes de energia que atendem suas condições financeiras limitadas, além de encontrar valores relacionados ao dimensionamento mais adequado, mostrando a evolução dos custos ao longo do tempo e o tempo “ótimo” onde o sistema que oferece custos variáveis reduzidos pode equiparar-se aos que têm elevados custos fixos, e, a partir daí, definir a melhor solução.

Em comparação com outros sistemas, o uso de energia solar aparentemente surge como o mais viável economicamente, além de ser a melhor solução em termos de respeito ao meio ambiente dentre os sistemas apresentados. Assim, economicamente e ecologicamente, o programa torna-se altamente viável para uso em campo.

Em regiões com grandes áreas, como é comum no Sudeste do Maranhão, podem ser observados o pouco ou mau uso da terra. Percebe-se com muita frequência a criação extensiva de animais em grandes áreas consumindo os poucos recursos existentes relacionados à pastagem e água. Havendo uma intensificação da irrigação, observando-se as vazões mínimas por cultura, com previsão de custos de investimentos e operacionalização, esta área poderia ser melhor utilizada para atender uma quantidade maior de animais ou ser usada para a implantação de culturas variadas com maior produtividade.

Esse trabalho visa dar uma contribuição na busca de ferramentas para o levantamento de custos e definição de sistemas de bombeamento e irrigação para o produtor rural, relacionando parâmetros que levam às melhores escolhas.

Estudos relacionados ao tema, porém sem essa aplicação específica, podem ser observados com freqüência, onde se faz o uso de *softwares* relacionados à inteligência artificial através de sistemas especialistas para tomada de decisão.

Destacam-se que os altos custos observados nos sistemas de bombeamento, em particular nos projetos para irrigação, onde se percebe a importância e necessidade de estudos para serem apontados meios de minimizá-los obtendo-se uma maior eficiência desses sistemas.

Espera-se com essa tese obter uma adequação de um tipo de bomba a um custo mínimo de implantação e operação, em uma área definida e uma cultura determinada em uma região caracterizada por definida fonte de água, pois em todo o mundo faz-se

necessário o aumento de produtividade de alimentos associado à diminuição de custos, o que aumenta a rentabilidade do agricultor, sendo este um grande desafio para os produtores rurais. Esse desafio pode ser obtido sem o aumento dos custos de operação, particularmente com a otimização do consumo de energia elétrica, com melhor aproveitamento e uso isolado ou associado com fontes alternativas renováveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar os sistemas de bombeamento para irrigação na agricultura familiar, desenvolvendo e aplicando um modelo computacional evidenciado através de um *software* que permita predizer qual o mais adequado em uma região definida, de acordo com os critérios de custos e viabilidade técnica.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Minimizar custos e maximizar a receita líquida na área a ser irrigada, levando-se em conta as demandas hídricas e energéticas e outras restrições de ordem econômica, física, social ou cultural;
- Analisar a viabilidade do emprego de bombas hidráulicas em sistemas de irrigação para agricultura familiar, de acordo com as fontes convencionais e alternativas de energia e de água disponíveis, as demandas existentes, os custos associados, questões socioeconómicas e condições geográficas da região;
- Definir o uso adequado de sistemas de bombeamento segundo as condições observadas de manuseio no campo da irrigação para agricultura familiar;
- Analisar parâmetros econômicos de custo e benefício na aplicação de diversos tipos de bombas hidráulicas e acessórios, segundo a necessidade das comunidades agrícolas;

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente estudo foi organizado em oito capítulos, além da parte pré-textual, da bibliografia e apêndices.

O primeiro deles, a Introdução, contextualiza os principais aspectos gerais; a Justificativa; os Objetivos e a Metodologia.

No segundo capítulo faz-se uma Revisão Bibliográfica individualizada sobre: Agricultura Familiar, Água Superficial e Subterrânea, Fontes de Energia, Sistemas de Irrigação e Bombas. Em seguida, trata do dimensionamento dos sistemas de energia e mostra como as bombas são usadas em sistemas de irrigação. Por fim, são definidos e analisados os custos envolvidos nos sistemas de irrigação segundo as fontes energéticas que serão analisadas.

O terceiro capítulo descreve a metodologia, os materiais e os métodos que foram utilizados para a confecção dessa tese.

No quarto capítulo é feita uma análise sobre os procedimentos, os critérios e técnicas utilizadas.

No quinto capítulo são mostrados os resultados e discussões, aplicação do modelo, a escolha da bomba segundo critérios técnicos e de custos, para, por fim, propor soluções para o estudo.

O sexto capítulo aborda as conclusões finais, apresentando os resultados obtidos e as respectivas análises, incluindo expectativas para sugestões de estudos futuros.

CAPÍTULO II

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

A literatura apresenta diversos estudos sobre bombeamento, irrigação e agricultura familiar. Porém, são poucos que apresentam soluções adequadas sobre as opções que o agricultor familiar tem disponíveis para irrigar sua cultura segundo os vários sistemas de bombeamento existentes e custos envolvidos, visando obter a solução mais adequada técnica e economicamente, incluindo e relacionando os sistemas alternativos e convencionais.

Para o dimensionamento, Freire (2000) propõe alternativas metodológicas à fórmula clássica de Bresse com intenção de obter maior economia nas linhas adutoras destinadas a transportar água entre as unidades que antecedem as redes de distribuição. Neste, apresentou dois métodos: o primeiro baseado na variação linear dos preços dos tubos com seus diâmetros e outro na variação dos preços dos tubos com seus pesos. Os diâmetros obtidos com esses métodos são comprovados através de um quarto método, de enumeração exaustiva (método da avaliação real do custo), onde são calculados os custos reais de operação e implantação para uma variedade de diâmetros, sendo o ótimo aquele que apresenta a melhor relação custo x benefício para o sistema. Fazendo avaliações práticas ficou evidenciado a validade de ambos os métodos.

Maeda (2010) discorre sobre sistemas alternativos de bombeamento, dando destaque a roda d'água, ao carneiro hidráulico, aos moinhos de vento e ao motor *Stirling*. Seu foco é na aplicação de sistemas alternativos na irrigação. No entanto, como a maioria dos trabalhos, apenas mostra sua forma de aplicação sem comparar ou mostrar qual seria a solução mais adequada.

Santana (1999) trata da otimização de sistemas de distribuição de água abastecidos por bombeamento e reservatórios de regularização. Nessa tese o autor relaciona os custos de investimento com os custos de manutenção, definindo modelos matemáticos e computacionais para chegar a um tratamento analítico adequado as operações de bombeamento e reservatórios. Porém, o trabalho restringiu-se a esse aspecto sem evidenciar aplicação em várias atividades, como na irrigação.

A redução de custos de energia, conforme Liu (2009) irá aumentar com o aumento do custo de operação do sistema de bombeamento. Para o autor, para minimizar o custo de operação do sistema de bombeamento, deve-se otimizar o uso dos ativos de geração dos projetos. Neste trabalho foi definido um método para determinar os desempenhos de sistemas de bombeamento segundo resultados experimentais e computacionais, definindo-se o princípio e alternativas da otimização dos sistemas de bombeamento.

Os custos de energia são discutidos por Meah; Fletcher e Ula (2006). Nesse trabalho inicialmente são definidos os custos das linhas de distribuição, que são muito elevados para regiões desprovidas de energia elétrica, tornando-se assim sua aquisição e instalação desinteressantes para pequenos projetos de bombeamento. Sendo assim, sugere-se o uso de sistemas fotovoltaicos que são viáveis para pequenos projetos ou produções de pequena escala. Nos Estados Unidos, como no Brasil, existem muitas regiões secas em que não existem águas superficiais, restando a alternativa da retirada de águas subterrâneas, onde o tempo de impacto de aridez é menor, pois as águas subterrâneas são mais resistentes a seca.

Eleotério (2008) cita a redução de custos de energia em sistemas de bombeamento dando grande contribuição nessa questão relacionada ao uso e consumo de energia com alternativas relacionadas ao consumo, regularização de vazão, alterações no sistema de bombeamento e controle de perdas.

Segundo Duarte (2008), os custos ligados a energia consumida mais os custos de mão de obra são as parcelas mais representativas relacionadas a operação dos sistemas de abastecimento de água. Com isso, usar de forma eficiente a energia é um ponto que deve ser observado com muito cuidado para a obtenção de eficiência econômica global implantada.

Uma redução de consumo e consequente diminuição de custos pode ser obtido pelo uso de bombas mais eficientes, com menor potência, como propõe Espíndula Neto (2003). Para o autor, “essa viabilidade deve-se, principalmente, ao fato dos motores indicados para as substituições propostas possuírem uma potência nominal menor e um rendimento maior que os motores em uso na fazenda, proporcionando uma redução expressiva nos gastos anuais com consumo e demanda de energia elétrica, podendo gerar uma economia anual com o fator energia elétrica”. Para a redução do consumo de energia elétrica, Tsutiya (2006) defende a instalação de inversor de frequência que é um circuito destinado a gerar uma corrente alternada de frequência controlada a partir de uma fonte de corrente contínua. É interessante seu uso em motores elétricos de indução trifásicos, pois substituem os ultrapassados sistemas de variação de velocidades mecânicos, como as polias e variadores hidráulicos, assim como os motores de corrente contínua, que são muito custosos e manutenção mais simples.

O uso da energia solar já está sendo amplamente discutido como fonte alternativa de energia para consumo doméstico e na agricultura. Em sua dissertação de mestrado, Oyama (2008) avalia o comportamento de uma motobomba conectada a painéis fotovoltaicos para determinar equações da vazão em relação a irradiação solar incidente nos painéis. Neste, o autor faz uma comparação qualitativa entre três sistemas de bombeamento de água: solar, manual e a diesel.

Michelsetall (2009) avalia sistemas de bombeamento de água acionados por painéis fotovoltaicos, onde se conclui que o sistema em uma situação real de trabalho (água bombeada a 20 m de altura), apresentou eficiência que varia entre 8,5 e 9,5%, levando-se em conta dias limpos, sem interferências de nuvens.

Na literatura, percebe-se que há necessidade de desenvolver trabalhos envolvendo simulações de diferentes situações de bombeamento, variando-se o tipo de energia utilizada, desnível geométrico, vazão, diâmetro, comprimento da tubulação e número de horas trabalhadas no ano.

A modelagem e a simulação computacional vêm para mostrar esse caminho, que, através dos resultados obtidos em campo, definem, dentre as alternativas existentes, a mais viável, sob o aspecto financeiro e técnico.

Para chegar a uma solução viável do ponto de vista econômico, mudando as estratégias convencionais, é importante a utilização de modelos matemáticos de otimização no dimensionamento de problemas como esse. A otimização, segundo Luemberger (1984), relaciona-se à “análise de decisões complexas ou problemas de alocação, que oferecem certo grau de elegância filosófica e, frequentemente, certo grau de simplicidade operacional”.

Para Santana (1999) “um problema de otimização complexo associado à tomada de decisão, envolve a seleção de valores para um determinado numero de variáveis de decisão inter-relacionadas, baseando-se em objetivos simples, projetados para quantificar desempenho e qualidade de uma decisão”. Para isso, complementa o autor, é necessário chegar a uma situação que maximize ou minimize o valor da função objetivo proposta, dependendo de suas restrições, que limitam as variáveis de decisão a se adequar a determinados valores ou faixas de atuação. Para se alcançar os resultados desejados requer-se uma grande vivencia dos problemas e dominio de teorias envolvidas que regem o problema e as soluções matemáticas.

O modelamento tem como objetivo fundamental o alcance de um modelo que sendo suficientemente complexo possa capturar as características vitais do problema, mas que seja simples o suficiente para se manusear e fornecer as informações úteis para uma tomada de decisão.

Golbarg e Luna (2000) denominam modelos “como representações simplificadas da realidade que preservam, para determinadas situações e enfoques, uma equivalencia adequada”. Os autores defendem que o modelo tem poder de representatividade, sendo a característica que o torna desejável. Sua capacidade de simplificação dá ao modelo uma factibilidade operacional. No modelo deve ser verificado a representabilidade, dando-lhe sua validação.

Como a maioria dos problemas possui natureza linear, a programação linear é a mais utilizada, sendo esta a que possui maior simplicidade teórica e na implementação de algoritmos computacionais para obter sua solução. Com isso, o trabalho de

modelagem concentra-se na formulação de equações onde estão envolvidos o objetivo e as restrições, que podem atingir um grande número de relações e variáveis.

Basicamente, no presente estudo, no desenvolvimento de um programa computacional, existem variáveis de entrada que devem ser processadas e ter como resultados as variáveis de saída, conforme a necessidade existente.

As vantagens desses sistemas são: i) capacidade de entender a tomada de decisão para várias pessoas; ii) melhoria de produtividade; iii) reduzem o grau de dependência que existem em empresas quando encontram-se em situação crítica, inevitáveis, como a falta de um especialista; iv) podem ser usados em treinamento em grupo de pessoas.

O uso de técnicas computacionais e modelos matemáticos estão sendo muitos usados na maioria dos campos técnicos, havendo meios propícios à resolução de problemas ligados à engenharia hidráulica (projeto e avaliação) (BALTRA, 1987).

Guimarães (1995) elaborou um modelo matemático para dimensionamento e simulação do pivô central para análise de redes hidráulicas em irrigação por aspersão convencional. Já Sousa (2001) propôs um modelo para análise de risco econômico aplicado a projetos de irrigação para a cultura do cafeeiro.

Gumier (2005) apresentou as perdas de água nas redes de distribuição dos sistemas de abastecimentos e os mecanismos de controle disponíveis. Dentre seus objetivos destaca-se a proposição do modelo matemático-computacional como uma nova ferramenta de localização de fugas.

2.2 Agricultura Familiar

A agricultura familiar é definida na Legislação Brasileira (Brasil, 1964) (Artigo 4º; Inciso II - Lei nº 4.504 de 30 de novembro de 1964) como sendo: “*propriedade familiar : o imóvel que, direta e pessoalmente explorado pelo agricultor e sua família, lhes absorva toda a força de trabalho, garantindo-lhes a subsistência e o progresso social e econômico, com área máxima fixada para cada região e tipo de exploração, e eventualmente trabalhado com a ajuda de terceiros*”. Com referência de tamanho de propriedade, foi fixado o valor de área máxima pela Lei nº 8629, de 25 de fevereiro de

1993, como aqueles que têm até quatro módulos fiscais (GONÇALVES & SOUZA, 2011).

O PRONAF estabelece que produtores rurais sejam aqueles que obedecem aos requisitos seguintes: i) proprietários, posseiros, arrendatários, parceiros ou concessionários da reforma agrária; que residam em propriedades rurais em locais próximos; iii) detenham no máximo quatro módulos fiscais de terra, segundo a legislação (ou até seis módulos quando referir-se a pecuarista familiar; iv) que sua renda bruta familiar seja de 80% oriunda de atividade de exploração agropecuária ou não agropecuária do estabelecimento; e, v) tenha dois empregados permanentes (TINOCO, 2006).

Segundo o INCRA (2010) o módulo rural é “*a área mínima suficiente para que uma família possa trabalhar, viver e progredir, utilizando-se, ocasionalmente, de mão de obra de terceiros. O tamanho dessa área é variável de região para região, sendo a sua dimensão definida levando-se em consideração aspectos climáticos e sociais*”. Esse tamanho varia de 4 a 120 hectares dependendo da região do Brasil. Estima-se um valor médio de 70 hectares para a região Nordeste. Esta região possui disponível 1.304.000 hectares de área para irrigação. No Maranhão são estimados 243.500 hectares de área que poderiam ser usadas em projetos de irrigação.

Já Bittencourt & Bianchini (1996), com base em estudos e no PRONAF, define que “*A agricultor familiar é todo aquele (a) agricultor (a) que tem na agricultura sua principal fonte de renda (+ 80%) e que a base da força de trabalho utilizada no estabelecimento seja desenvolvida por membros da família. É permitido o emprego de terceiros temporariamente, quando a atividade agrícola assim necessitar. Em caso de contratação de força de trabalho permanente externo à família, a mão-de-obra familiar deve ser igual ou superior a 75% do total utilizado no estabelecimento*”.

Por fim, Guanziroli e Cardim (2000), especificam as condições para ser agricultor familiar: “a direção dos trabalhos no estabelecimento é exercida pelo produtor e família; a mão deobra familiar é superior ao trabalho contratado, a área da propriedade está dentro de um limite estabelecido para cada região do país”.

Relatando sobre as características da agricultura familiar Buainaim e Romeiro (2000) (In: TINOCO, 2006), descrevem que “a agricultura familiar desenvolve, em geral, sistemas complexos de produção, combinando várias culturas, criações animais e

transformações primárias, tanto para o consumo da família como para o mercado. Baseados em amplo estudo sobre sistemas de produção familiares no Brasil”.

As vantagens da agricultura familiar são apontadas por Oliveira (2000): “A lógica de funcionamento das explorações familiares, baseada na associação dos objetivos de produção, consumo e acumulação patrimonial, resulta num espaço de reprodução social cujas características de diversidade e integração de atividades produtivas vegetais e animais, ocupação de força de trabalho dos membros da família e controle decisório sobre todo o processo produtivo são sensivelmente mais vantajosos ao desenvolvimento de uma agricultura ambientalmente sustentável que as explorações capitalistas patronais” (OLIVEIRA, 2000).

Para Evangelista (2000) a região nordeste responde com quase 50% dos estabelecimentos agrícolas do País, que detém a maior parte da área (31,6%), porém com pouca participação na produção (16,7%) e no financiamento total (14,3%). Estes indicadores estão mais presentes nas regiões Sul e Sudeste.

Diante da importância da agricultura familiar e suas dificuldades, pelo já exposto, é possível estabelecer a esta função de preservação ambiental com grande intensidade. Esta atividade é conhecida como uma das que produzem maior impacto pro meio ambiente, segundo o modelo econômico do País. A própria exclusão social é danosa ao meio ambiente. O mais grave é que mesmo com todos esses impactos, esses agricultores não possuem grandes lucratividades ou produções exacerbadas, como nos grandes empreendimentos agrícolas. Os desequilíbrios ocorrem no próprio contexto do ambiente familiar ou na sociedade em que estar inserida, devido às restrições econômicas e sociais, bem como o fato de que 85% dos estabelecimentos familiares ocuparem apenas 30% da área. No outro extremo, 11% dos grandes estabelecimentos ocupam 68% das terras, matas e recursos hídricos, como relata Altafin.

Para Barros (2007) o perfil da agricultura familiar apresenta uma enorme diversidade de sistemas produtivos e disponibilidade de recursos. Estes agricultores dispõem de uma pequena área, têm capacidade baixa de investimento e demandas tecnológicas de baixo custo, pois as tecnologias de ponta utilizadas em grandes empreendimentos agrícolas (agricultura empresarial) são inviáveis em termos econômicos pra estes agricultores.

Logo, faz-se necessário maior atenção para o agricultor rural. Este deve ter acesso a novas tecnologias e maiores fontes de investimentos, além de fontes que permitam o acesso às informações que poderiam melhorar suas culturas e consequente fonte de renda. Com esse cuidado, o agricultor rural poderá desenvolver melhor sua fonte de subsistência, ter maior qualidade nos cultivos que mantém e possibilitar, em consequência, um melhor desenvolvimento da região onde está inserido, além de uma melhor qualidade de vida.

2.3 Água Superficial e Subterrânea

Segundo relatório da Agência Nacional de Águas, através do Atlas Brasileiro (ANA, 2011), o País terá sérios problemas com abastecimento de água a partir do ano de 2015, mesmo tendo um grande potencial hídrico, comparando com outros países do mundo. Um dos aspectos que mais influenciam a problemática da água é a falta de investimentos em obras de captação de água e a não proteção dos mananciais existentes. O relatório fala ainda da distribuição irregular dos mananciais, da baixa produção e baixos investimentos envolvidos. Por fim, cita a questão da poluição dos recursos hídricos devido a não existência ou ineficiência de tratamento de esgotos domésticos e industriais. Em outro aspecto, o problema se refere à produção inferior à demanda devido à precariedade dos sistemas de captação, adução e tratamento de água aliado às perdas existentes em todas as etapas de produção e distribuição de água.

Somado a esses aspectos, tem-se a extensa área do Brasil grande variedade climática, dos inúmeros ecossistemas existentes e de inúmeras características socioeconômicas e políticas que afetam a população e são predominantes nas demandas e recursos existentes.

Relativo ao consumo pode-se afirmar que a distribuição é bastante desigual no planeta. As áreas de ocupação concentram-se em regiões metropolitanas e são menos intensas em regiões mais remotas ou que possuem problemas com vegetação e clima. Segundo o Instituto de Defesa do Consumidor (IDEC) existe uma variação do consumo de água em todo o mundo. O instituto aponta como fatores determinantes para o consumo os seguintes: i) a disponibilidade local, ii) nível de desenvolvimento do país, , iii) nível de renda das pessoas. A necessidade diária é de pelo menos 40 litros de água

por dia por pessoa. Porém, o consumo varia de 150 em países europeus reduzindo-se a menos de 25 litros por habitante por dia na Índia.

Clarke e King (2005) afirmam que “o abastecimento de água no mundo está em crise”. Há um crescente aumento da população e de suas necessidades. Com isso, haverá cada vez mais, menor quantidade de água disponível por pessoa no planeta. Já Gore (1993) refere-se às grandes mudanças na relação do homem X terra, que, prolongando-se desde Revolução Industrial, vem provocando danos irreparáveis aos recursos hídricos. O autor cita algumas chamadas “ameaças estratégicas ao sistema hídrico global”: i) a redistribuição das reservas de água doce; ii) a elevação do nível dos mares e a perda de áreas litorâneas baixas; iii) mudanças nos padrões de uso da terra, a exemplo dos desmatamentos; iv) a contaminação de todas as reservas de água pelos poluentes químicos produzidos pela civilização industrial; v) pressão do rápido aumento da população; e, vi) sistemas de irrigação inadequados.

Segundo Santos (2009) o Brasil possui a maior reserva mundial de água do planeta, destacando-se o Aquífero Guarani, que se estende pelo Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai, com mais de 40.000 km³ de água. O País possui grande disponibilidade de água, porém com má distribuição, segundo a ANA (2011). No relatório anterior (ANA, 2007) afirma-se que o Brasil é rico em volume de água, com uma disponibilidade hídrica de 33 mil m³/hab./ano, distribuídos nas doze regiões hidrográficas. A distribuição nas regiões é muito variável, com grande disponibilidade nas regiões menos povoadas. Porém, comparando-se com outros países o Brasil é o primeiro em reservas mundiais.

O Semiárido Nordestino, que compreende oito estados do Nordeste (excetua-se o Maranhão) apresenta reservas insuficientes de águas em seus mananciais, altas temperaturas, baixas amplitudes térmicas, altos índices de evapotranspiração e forte insolação, de acordo com o Relatório Atlas (ANA, 2011). Na região pode-se chegar a índices extremos de aridez provocados pelos longos meses de estiagens.

Com relação às demandas hídricas, as maiores ocorrem na agricultura com destaque para a irrigação. No ano de 2000 houve uma retirada de 1.592 m³/s de água para o consumo no País. As demandas naturais sobre água de superfície podem ser superadas se houver investimentos e estímulos a aberturas de poços subterrâneos para retirada de água a fim de atender as diversas necessidades, inclusive para suprir as demandas de irrigação em pequenas lavouras. No entanto, como há uma variação muito

grande no território brasileiro de suas reservas subterrâneas, não havendo homogeneidade em seus aquíferos, não se pode garantir que a oferta disponível pode superar as demandas.

A Agência Nacional de Água, através de seus relatórios anuais chama a atenção para o fato das águas subterrâneas perfazerem 97% das águas doces e líquidas do planeta, fazendo parte do ciclo hidrológico. No mundo todo existem, por estimativa, 300 milhões de poços perfurados. No Brasil estima-se que existam pelo menos 400.000 poços tubulares. Ainda, segundo a ANA (2007), os aquíferos são responsáveis em 90% pela regularização (perenização) dos rios, córregos, lagos, dentre outros, o que permite sua fluidez mesmo em épocas de estiagem. De acordo com o IBGE (2000) mais da metade do abastecimento público do Brasil provém de reservas subterrâneas.

Conclui-se que um melhor aproveitamento da água no uso em campo traduz em respeito ao meio ambiente além de redução de custos. Nas regiões onde houver pouca disponibilidade são necessários investimentos para a abertura de poços que permitam sua retirada da forma mais econômica possível. Com o abastecimento mundial em crise, seu uso racional deve ser incentivado, buscando tecnologias que possam reduzir desperdícios e reaproveitamento sem agressões ao meio ambiente.

2.4 Fontes de Energia

A energia, definida por Cardoso (2010) como *a capacidade de realizar trabalho ou o resultado da realização do trabalho*, é a grande impulsionadora da sociedade moderna, dos níveis de produção, do conforto e bem-estar social. É a fonte básica para se criar produtos e oferecer serviços, sendo a grande responsável pelo desenvolvimento econômico de uma região. Esta resulta do aproveitamento de inúmeros recursos naturais transformados ou utilizados diretamente como suprimento energético.

Muitos eventos mundiais ocorrem tendo como fundamento a utilização de energia. Já houve diversas crises de abastecimento, embargos e guerras envolvendo nações devido à busca constante e utilização de energia dos mais diversos tipos, com destaque para os combustíveis fósseis, já que estes estão concentrados em algumas poucas nações. Outras fontes de energia podem ser utilizadas internamente sem problemas maiores com o resto do mundo. A energia proveniente das usinas

hidrelétricas, por exemplo, são praticamente em sua totalidade utilizada internamente, assim como a energia proveniente do sol (solar ou fotovoltaica) ou do vento (eólica).

Essas últimas citadas (solar e eólica) estão na pauta de interesses mundiais por serem: renováveis, abundantes e permanentes, isto é, sem possibilidade de extinção e que não agridem (ou agridem muito pouco) o meio ambiente. Praticamente a agressão ambiental dessas fontes energéticas resume-se ao processo de fabricação de seus componentes de fabricação, o ruído e a aparência visual (eólica). Cabe lembrar também dos altos investimentos envolvidos para essas fontes de energia. Porém, esses custos e impactos são minimizados com o tempo, comparando-se às outras fontes de energia que produzem efeitos altamente nocivos ao meio ambiente de todo o planeta.

Souza (2008) afirma que cerca de 20% de toda eletricidade gerada no planeta é de origem hidráulica, estando entre os maiores produtores o Canadá, a China, o Brasil, os Estados Unidos e a Rússia. O Brasil responde em mais de 80% da oferta de eletricidade proveniente dessa fonte (ANEEL, 2005).

No ambiente rural, onde existe disponibilidade de energia elétrica, esta é proveniente de fontes hidráulicas disponibilizadas por concessionárias locais. Com isso, grande parte das comunidades rurais usa essa fonte de energia para acionar motores do sistema motobomba que irá levar água de reservas naturais para os sistemas de irrigação local.

Assim como a energia eólica, a energia solar é uma opção de energia limpa para o Brasil, onde cada vez mais se intensificam os esforços para ser mais frequente o uso de fontes não convencionais de energia. Esta necessita apenas da luz solar para fazer gerar a chamada energia fotovoltaica através de coletores térmicos e células fotovoltaicas. A energia proveniente do sol é intermitente e deve ser aproveitada em face da escassez e problemas ambientais causados por outras fontes energéticas.

Projetos recentes mostram a geração dessa fonte em iluminação e acionamento de bombas pra projetos de irrigação. Segundo a ANEEL (2010) a conversão direta de raios solares em energia elétrica é feita por células fotovoltaicas. As células são compostas por elementos semicondutores, como o silício. Os conversores estão ligados a um circuito externo e funcionam de tal forma que ao receberem luz solar gera uma corrente elétrica.

Para Reis (2003) existem dois tipos de geração de energia solar:

- Os fotovoltaicos autônomos, que transformam a energia solar em energia elétrica diretamente;
- Os termossolares que usam energia solar para gerar vapor.

Os projetos, em sua maioria, são de pequeno porte para essa fonte energética, devido os elevados custos para irrigação. Reis (2012) afirma que em longo prazo a geração de energia fotovoltaica poderá ser considerada uma forma não convencional muito atraente na geração de eletricidade pra o Brasil e para o mundo.

Portanto, diante das variadas fontes de energia devem ser observadas e utilizadas aquelas que provocam o menor impacto ambiental possível, com um custo mínimo de operação e reduzido na implantação. As fontes alternativas parecem ser a melhor opção, mesmo com altos investimentos iniciais, mas que são absorvidos durante o tempo de vida do projeto. Estes custos deverão ser reduzidos com o tempo, pois novas tecnologias estão surgindo, e estas, com a substituição de matérias primas na confecção de sua composição física poderão ser mais acessíveis aos agricultores rurais.

2.5Sistemas de Irrigação

Segundo Mello (1993), a técnica da irrigação pode ser definida como sendo “*a aplicação artificial de água ao solo, em quantidades adequadas, visando proporcionar a umidade adequada ao desenvolvimento normal das plantas nele cultivadas, a fim de suprir a falta ou a má distribuição das chuvas*”.

Para Almeida (1995), irrigação é a “*aplicação de água na lavoura com o objetivo de manter o nível de umidade do solo adequado ao metabolismo da planta de sorte a conseguir maior metabolismo e produção*”.

É através da irrigação que a produção agrícola pode ser intensificada com regularização e disponibilidade durante o ano de diferentes culturas, pois essa prática permite uma produção na contra estação. Reduz ainda as incertezas, prevenindo o agricultor contra possíveis irregularidades de chuvas no decorrer das estações.

Em muitas regiões do País a irrigação é um fator tecnológico fundamental para a produção agrícola, devido a reduzida precipitação pluviométrica e distribuição irregular de chuvas no decorrer do ano. Esse processo garante o atendimento as demandas de

água das culturas locais, podendo aumentar a produtividade, porém com aumento de custos de produção, que pode ser compensado se existir planejamento, escolha adequada de insumos e aplicação adequada dos recursos, sem esquecer das técnicas e cuidados agrícolas envolvidos.

Com essa perspectiva, o que é preciso saber é a quantidade de água que deve ser fornecida ao solo e a planta para atender as suas necessidades. Estes elementos são fundamentais para serem dimensionadas as instalações de bombeamento de água para o processo de irrigação. Com isso, o uso da água no País tem múltiplos usos, Na irrigação observam-se os maiores consumos.

Os componentes principais de um sistema de irrigação são:

- Manancial: podendo ser um rio, um lago, um poço ou um córrego qualquer.
- Captação: compõe-se de canalização de entrada, conjunto motobomba e canalização de saída.
- Adutoras: são as canalizações, geralmente de PVC que levam água bruta até um corpo receptor, como um reservatório de distribuição.
- Reservatórios: onde se acondiciona água para uso e distribuição por gravidade.
- Distribuição: são os componentes dos sistemas de irrigação: do reservatório até chegar às plantas.

No planeta o crescimento da irrigação até 2025 atingirá uma área de 330 milhões de hectares, correspondente a um aumento de 22% (SHIKLOMANOV, 2000).

Em um contexto geral no País, há uma variação da eficiência da irrigação, conforme a região e o tipo de irrigação aplicada como pode ser visto na Tab. 2.1 e na Tab. 2.2. Pode-se perceber na primeira tabela que o método de irrigação localizada possui maior eficiência que os outros, sendo assim, quando possível, recomendado para ser utilizado. Na segunda tabela verifica-se que nas regiões Sudeste e Nordeste há uma maior eficiência na irrigação. Esse fator deve-se aos constantes avanços ocorridos nessas regiões, aliado ao fato de dependência de água por irrigação que pode contribuir com seu desenvolvimento, além da carência de água de chuva em alguns períodos de seca prolongada na região Nordeste e no Estado de Minas Gerais.

Tabela 2.1: Eficiência e uso de energia por método de irrigação. Christofidis, 1999.

Método de irrigação	Eficiência de irrigação (%)	Uso de energia (kWh/m³)
Superfície	40 a 75	0,03 a 0,3
Aspersão	60 a 85	0,2 a 0,6
Localizada	80 a 95	0,1 a 0,4

Tabela 2.2: Eficiência de irrigação média em diferentes regiões. Christofidis, 1999.

Região (Brasil)	Água derivada dos mananciais (m³/ha/ano)	Água consumida pelos cultivos (m³/ha/ano)	Eficiência de irrigação (%)
Norte	9.657	5.323	55,1
Nordeste	16.380	10.780	65,8
Sudeste	10.659	6.985	65,5
Sul	11.457	7.128	62,2
Centro-oeste	7.941	2.442	30,8
Brasil	56.094	32.658	58,22

De um modo geral, nas culturas irrigadas em que se deseja uma máxima produtividade, há uma dependência dos fatores seguintes: energia, água, mão de obra e as instalações de transporte da água, com relação harmônica entre estes para um perfeito ajuste desse sistema, a fim de não comprometer o planejamento traçado.

Com a agricultura irrigada espera-se um aumento substancial na produção de alimentos, o que resulta em desenvolvimento sustentável no meio rural, gerando empregos e renda durante todo o ano. Portanto, é uma estratégia sustentável para a produção agrícola, com cuidado e respeito ao meio ambiente, mantendo o homem no campo e estabilizando as relações sociais e econômicas na região.

Entre os anos de 1960 e 2001, como destaca Maeda (2010), houve uma multiplicação de aproximadamente dez vezes da agricultura irrigada, passando de 320.000 para 3.113.000 de hectares. Dados do IBGE (2010) mostraram a evolução de 1960 a 2006 (Tab. 2.3).

Tabela 2.3: Evolução da área irrigada no Brasil. IBGE, 2010.

Região	1960	1970	1975	1980	1985	1995	2006
Norte	457	5.640	5.216	19.189	43.224	83.023	148.870
Nordeste	51.774	115.971	163.358	256.738	366.826	751.887	1.045.123
Sudeste	116.174	184.618	347.690	428.821	599.564	929.189	1.291.578
Sul	285.391	474.663	535.076	724.568	886.964	1.096.592	1.332.359
Centro-oeste	1.637	14.385	35.490	47.216	63.221	260.952	503.714
Total	455.433	795.291	1.085.831	1.476.532	1.959.819	3.121.644	4.321.644

Para um uso potencial de irrigação no território brasileiro, estima-se a disponibilidade de quase 15 milhões de hectares, porém, atualmente são ocupados somente 4,3 milhões. Essa área potencial pode chegar a quase 30 milhões de hectares se forem somadas as demais áreas disponíveis, o que representa aproximadamente 3,5% do território Nacional. Para atender essa demanda faz-se necessário o consumo de quase 35 bilhões de metros cúbicos de água por ano que podem ser obtidos nos diversos mananciais existentes (EMBRAPA, 2010).

Dados da ONU demonstram que no mundo inteiro do total de área cultivada, existem 1/6 de áreas irrigadas que respondem a 1/3 da produção mundial. Nas áreas irrigadas há um consumo de 72% dos recursos hídricos disponíveis. Nos setores industriais e domésticos o consumo é de 19% e 9% respectivamente (Maeda, 2010).

Nesse contexto, há o desafio de garantir o aporte de água para a agricultura irrigada, pois há a crescente demanda de outros setores, além de problemas relacionados à poluição, a degradação ambiental, o desperdício desse recurso, o uso de agrotóxicos, dentre outros. Para os irrigantes, a problemática é acentuada diante da ausência de capacitação técnica e não aplicabilidade de tecnologias que são aplicadas em países desenvolvidos. Essa ignorância no manejo da irrigação, as necessidades hídricas reais, a operação de equipamentos, levam a aplicações excessivas ou deficitárias de água, provocando desperdícios e baixo rendimento da cultura que pode ser afetada pela pouca ou grande quantidade de água.

Logo, o uso da água deve ser de forma racional, pois seu excesso, além de proporcionar maiores gastos com energia, com redução de receita líquida, provoca a

retirada de nutrientes por lixiviação, o que causa o empobrecimento do solo e consequente aumento de custos com compras de fertilizantes, com afirma Pereira *et al.* (2001). Cast (1988) afirma que as tarifas pagas com energia elétrica na irrigação são as mais importantes no custo final, podendo responder por mais de 50% desse custo, quando se considera a água sendo bombeada em poços artesianos. Portanto, esse custo torna-se o maior custo variável.

Segundo Mantovani (2007) a irrigação não pode ser considerada uma técnica isolada, mas como componente de um conjunto de técnicas que proporcionam uma produção econômica de determinada cultura com manejos adequados dos recursos naturais. Nesse sentido, deve ser levado em conta: a rotação de culturas, a proteção do solo, a fertilidade do solo, o manejo integrado de pragas e doenças, a mecanização, etc., visando um a produção integrada e uma melhor inserção no mercado.

Os projetos de irrigação devem sempre visar o aumento de produção, a economia de água, redução de deteriorização do solo, perda de nutrientes, etc. Em regiões semiáridas, com limitação de água a produção no processo de irrigação deve a maior possível, com critérios de fornecimento de água às plantas bem definidas para evitar perdas na área a ser cultivada.

Mesmo diante de todos os benefícios da irrigação, os projetos causam danos ambientais ao meio ambiente relacionado à qualidade do solo e da água, dentre outros. Como impactos principais têm-se: i) modificação do meio ambiente; ii) consumo exagerado de disponibilidade hídrica da região; iii) contaminação de rios e outras fontes de água; iv) salinização do solo; e, v) degradação do solo que pode levar à desertificação (MMA, 1997 *in LIMA Et Al.*, 1999).

O consumo exagerado e desperdício de água é o que mais ocorre. Geralmente o produtor rural não tem projeto, desconhece os critérios de controle de irrigação, não faz estimativa de vazão, e, temendo que a cultura sofra estresse físico, irriga de forma exagerada, o que prejudica a planta e o solo, além de reduzir o potencial hídrico da região e desperdiçar energia (CEMIG, 1993, *In Costa*, 2005). Com um manejo adequado da lâmina d'água, baseado na evapotranspiração da cultura, conforme Valiati e Schmidt (2006), pode haver uma economia de quase 60% de água.

O excesso de água no solo prejudica o desenvolvimento vegetativo e o rendimento, pela insuficiência de oxigênio nas raízes, redução de atividade metabólica,

aumento da resistência ao movimento da água através de raízes e acumulação de compostos químicos (SILVEIRA & STONE, 2001, *In* LUENENBERG, 2009).

Por outro lado, a insuficiência de água também prejudica o desenvolvimento da cultura. Como a água possibilita a expansão celular, sua limitação reduz o crescimento de células e tecidos, menor incremento em cultura de planta, número de folhas e área foliar (CARMO Et Al, 2003).

A captação d'água pode ocorrer nas mais diversas formas possíveis, dependendo da disponibilidade em que os recursos hídricos se apresentam. Em condutos livres, como os rios, córregos e canais d'água, são comuns o uso de vertedores e comportas.

Os parâmetros de irrigação relativos à quantidade de água, tempo, eficiência e outros utilizados no dimensionamento de um projeto são relacionados por Azevedo Netto (1998): lâmina líquida, eficiência de irrigação (na aplicação da água), lâmina bruta, turno de rega (turno de irrigação menos o intervalo de irrigação) e velocidade de infiltração básica.

De acordo com o autor, quando a irrigação for por aspersão são usados também: intensidade de aplicação, número de horas de funcionamento do sistema, número de posições por dia, período de irrigação, vazão requerida pelo sistema. Em irrigação localizada adota-se a manutenção da umidade de solo próxima à capacidade de campo e turno da rega diária.

Para um projeto de irrigação existem três etapas apontadas por Mendonça &Rassini (2005):

- Levantamento de dados básicos: vazão disponível e fonte de água, velocidade de infiltração de água e armazenamento de água no solo e evapotranspiração máxima da(s) cultura(s) a ser(em) plantadas.

- Estimativa da demanda e da periodicidade de aplicação de água (lâmina d'água e turno de rega).

- Dimensionamento hidráulico para atender a demanda e a periodicidade estimadas na primeira etapa.

Como dados básicos para a elaboração de projetos de irrigação, os autores apontaram as seguintes:

- Vazão mínima disponível.

- Evapotranspiração de referência.
- Déficit hídrico (mensal, semanal, diário).
- Área máxima irrigável (dependente da vazão mínima).
- Área do projeto.
- Tipo de solo (textura e armazenamento de água).
- Cultura(s) a ser(em) irrigada(s).

Mendonça (2007) relata em um boletim da EMBRAPA que a estimativa de demanda de água deve ser realizada com o apoio do balanço hídrico, onde se calcula o *déficit* hídrico da região em que se deseja instalar o sistema de irrigação. Esse *déficit* corresponde à diferença entre demanda e disponibilidade atmosférica de água (evapotranspiração e chuva) em períodos regulares de tempo, podendo ser dias, semanas ou meses, sendo mais aconselhável, para a irrigação, períodos semanais ou inferiores, devido à ausência de chuvas frequentes.

Na Figura 2.1 mostra-se um croqui da movimentação de um sistema de irrigação por aspersão através do uso de mangueiras.

A irrigação por aspersão ocorre quando na extremidade da linha de irrigação, existem aspersores que operam sobre pressão, lançando jatos d'água no ar, que, fracionado em gotas, cai sobre o terreno em forma de chuva.

A água é conduzida da motobomba até os aspersores usando tubulações de materiais como: PVC rígido, polietileno, alumínio, ferro fundido, cimento-amianto, concreto, aço zinkado. Em geral esses tubos possuem um comprimento padrão de 6 m. O conjunto das tubulações no sistema de irrigação por aspersão é formado por: linha principal, linhas secundárias e linhas laterais.

Segundo Bernardo (2006) a linha principal conduz água da motobomba até as linhas secundárias ou laterais, sendo, geralmente fixas. Caso existam linhas secundárias, estas fazem a conexão entre as linhas principais e laterais, sendo fixas. Já as linhas laterais conduzem a água das linhas principais ou secundárias aos aspersores (Fig. 2.2).

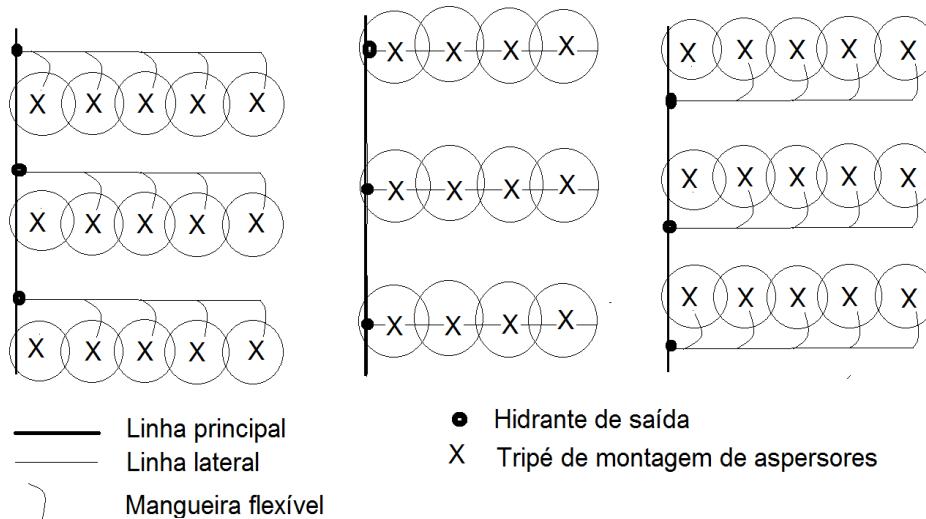


Figura 2.1: Croqui da movimentação de um sistema de irrigação por mangueira. Adaptado de Mantovani (2007).

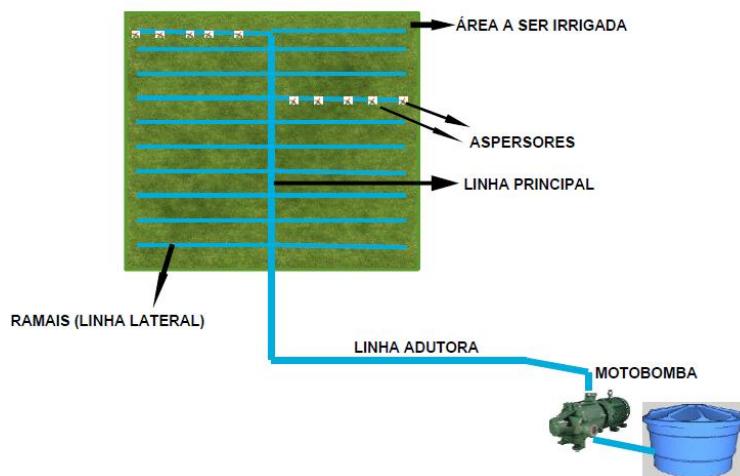


Figura 2.2: Ligação de uma linha de irrigação: reservatório aos aspersores. Thebe, 2012.

A Figura 2.3 mostra um sistema de irrigação por gotejamento com distribuição de água por bombeamento até os reservatórios através da linha principal, com linhas secundárias transportando a água às linhas de derivação e daí as linhas laterais chegando até os microaspersores.

Para o dimensionamento da linha principal, recalque e sucção, a base é a velocidade média de escoamento em condutos forçados (de 1 a 2 m/s). Na irrigação é comum usar 1,5 m/s. Com isso, pode-se calcular o diâmetro usando-se a Eq. (2.1), denominada de Equação da Continuidade.

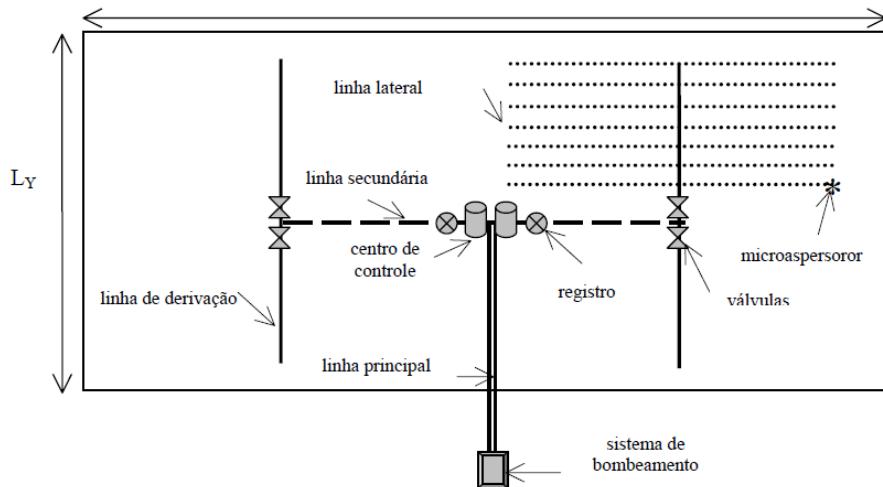


Figura 2.3: Layout de um sistema de microaspersão com quatro subunidades. Lucena, 2010.

$$Q = AxV \rightarrow Q = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)xV \quad (2.1)$$

A perda de carga é calculada pela forma da Eq. (2.2) (Hazen-Williams) abaixo.

$$hf = 10,646 \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,85} \times \frac{L}{D^{4,87}} \quad (2.2)$$

Para o dimensionamento da linha lateral, deve haver condições adequadas e homogêneas para o funcionamento dos aspersores, sendo a equação de Hazen-Williams usada para o dimensionamento. Para garantir as condições citadas, deve-se permitir uma variação de pressão, ao longo da linha lateral de no máximo 20% da pressão de serviço do aspersor.

No caso do conjunto motobomba, Mantovani (2007) esclarece que o cálculo hidráulico possibilita a escolha de uma motobomba que forneça água para os aspersores segundo as vazões e pressões requeridas pelo projeto. Os valores estão disponíveis nos catálogos de fabricantes. Para o cálculo de consumo de energia, explica o autor, utiliza-se o valor da potência absorvida pelo motor, levando em conta a eficiência do motor.

Há uma recomendação de um acréscimo de potência instalada para dar maior segurança no uso do equipamento – utilização de motores com folga. A norma ABNT 7094 apresenta tabela com as folgas devidas (ABNT, 2003). Essa porcentagem de sobrecarga do motor elétrico (fator de serviço – FS) atende, além das sobrecargas instantâneas, as que estão em condições de sobrecargas em regime contínuo, sendo um fator multiplicador da potência nominal, que é a potência mecânica máxima que o motor pode fornecer ao eixo em regime de trabalho em condições normais (potência de saída do motor) (MONTOVANI, 2007).

A irrigação localizada tem aumentado muito nos últimos anos por fatores como a otimização no uso da água e eficiência sobre a produção. Comparando-se os dois tipos de irrigação localizada obtém-se os resultados apontados na Tab. 2.4.

Na irrigação por gotejamento forma-se na superfície da área molhada uma forma circular semelhante a um bulbo de cebola. Quando os pontos de gotejamento são próximos uns dos outros, forma-se uma faixa molhada contínua. Os gotejadores são peças conectadas às linhas laterais, com capacidade pra dissipar a pressão disponível na linha lateral e aplicar vazões pequenas e constantes, sendo as peças principais do sistema de irrigação por gotejamento (BERNARDO, 2006).

Tabela 2.4: Comparaçāo entre os dois principais sistemas de irrigaçāo localizada. Montavani, 2007.

	Gotejamento	Microaspersão
Lançamento no Brasil	1972	1982
Vazão	2 – 10 (l/h)	20 – 150 (l/h)
Forma de aplicação	Gota a gota	Spray ou pequenos jatos
	Café	
	Tomate	Abacate
	Morango	Citros
Cultivos mais comuns	Melão	Banana
	Pimenta	Manga
	Mamão	Uva
	Em vasos	Mamão
	Outras	Outras

Pelo observado na literatura, diante dos vários tipos de irrigação, a mais eficiente é o sistema por gotejamento. Este desperdiça menos água que os outros sistemas, podendo se adaptar a qualquer situação e localização. É o sistema adequado para regiões

com grande carência d'água ou para ser utilizado em períodos de estiagem. É fácil de instalar e não necessita de recursos profissionais. Seus componentes são: tubulações, conexões, bicos, válvulas e controladores. Estes componentes são baratos podendo ser adquiridos em lojas especializadas. Com o desperdício baixo, evita doenças em plantas, pois a água vai direto para o local onde é necessário, possuindo eficiência de mais de 90%, enquanto outros sistemas possuem eficiência que variam entre 50 e 70%.

Como motivador desse sistema tem-se o fato de que o melhor uso da água disponível no solo e melhor desempenho da planta podem ser obtidos evitando-se déficit de água mantendo sempre em umidade favorável ao sistema radicular. Com isso, mantém-se sempre a cultura com umidade do solo próximo a umidade de campo (OLITTA, 1984).

Bernardo (2006) afirma que, caso o sistema seja fixo (como ocorre na maioria das vezes), seus custos ficam mais elevados, limitando seu uso para culturas mais nobres com alta capacidade de retorno. Isso se deve principalmente ao grande numero de aspersores por unidade de área. Aumentando-se o distanciamento entre as plantas, maior será o espaçamento entre os emissores e menor será o custo do sistema. Porém, com o grande desenvolvimento da irrigação no País, com maior competitividade no agronegócio brasileiro, aumentaram os investimentos nesse tipo de irrigação com políticas de implantação de fábricas para disponibilizar equipamentos a custos menores.

Na irrigação localizada as bombas comumente usadas são as centrífugas de eixo horizontal, sendo seus motores elétricos e a diesel. O dimensionamento correto permitirá utilizar somente o necessário na cultura irrigada. A água pode ser desperdiçada pelo uso em excesso, o que aumenta sua taxa de infiltração no solo, precipitação e evapotranspiração acima do desejado.

Alguns desses custos poderão ser minimizados com práticas diferenciadas e tecnologias adequadas. Por exemplo, os custos com energia podem ser reduzidos com a utilização de bombas mais econômicas ou específicas para as finalidades desejadas; pode ser reduzida ainda (ou eliminada) com fontes de energia que não exigem cobrança, como a eólica e solar, ou com o emprego de energia hidráulica que alimentará a bomba.

No caso das bombas, deve-se ter a certeza da que melhor se adapta ás condições descritas no projeto. No caso da irrigação por aspersão, a mais comum é formada por bombas de pressão ou centrífugas de eixo horizontal ou do tipo turbina e por motores

elétricos ou de combustão com seus devidos acessórios que serão descritos oportunamente (MELLO, 1993).

De um modo geral, os componentes do sistema de irrigação que deverão ser levados em conta para composição de custos são os seguintes:

- Motobomba;
- Cabeças de controle, que se localiza após a bomba e se constitui de: Medidor de vazão; Filtros (areia e tela); Injetor de fertilizantes; Válvulas de controle de pressão; Registros e manômetros.
- Linha principal (LP), sendo constituída por tubos em polietileno ou PVC, podendo ser enterrada ou superficial.
- Linha de derivação (LD) que transporta a água da LP até as linhas laterais. São sempre em polietileno ou em PVC.
- Linha lateral (LL) em tubos de polietileno.
- Emissores, que podem ser gotejadores ou microaspersores.

Por aspersão convencional, os componentes são os seguintes (MONTOVANI, 2007): sistema de bombeamento, tubulações, acessórios e aspersores. Este se caracteriza por instalar o aspersor sobre um tripé, e o acoplamento à linha lateral é feito por meio de mangueiras flexíveis (Fig. 2.4 & 2.5). Como vantagem desse sistema tem-se a diminuição do número de mudanças das linhas laterais, com uma montagem, irrigam-se pelo menos três posições. O autor salienta que esse sistema vem sendo utilizado com sucesso em pequenas propriedades e na irrigação de fruteiras, denominado subcopia.

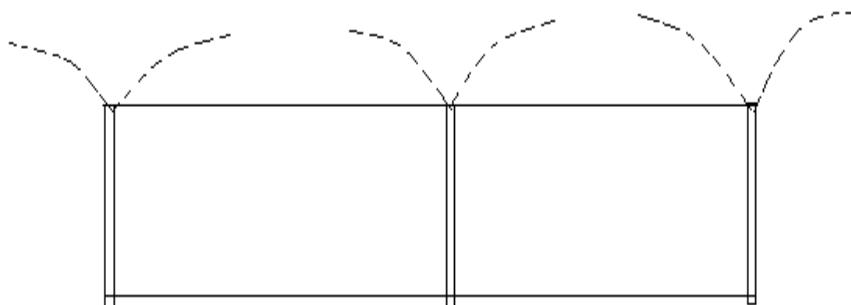


Figura 2.4: Linha lateral de aspersão. Adaptado de Carvalho, 2008.

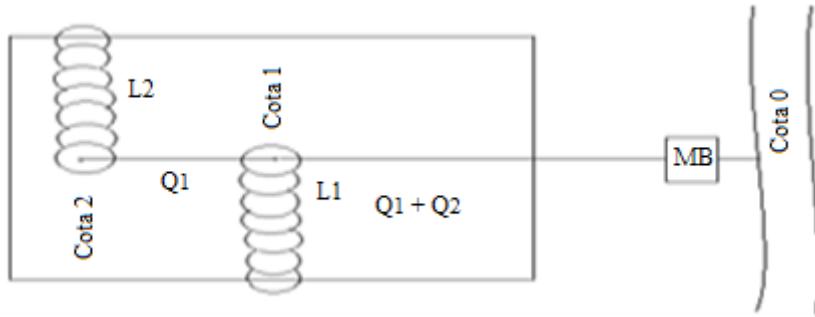


Figura 2.5: Sistema de aspersão convencional com duas linhas laterais. Adaptado de Carvalho, 2008.

*MB = Motobomba. L1 = Linha lateral 1; L2 = Linha lateral 2.

2.6 Princípios, Seleção e Acionamento de Bombas

Conforme Lopes (2011), Bomba é uma máquina hidráulica que recebe energia mecânica através da força motriz de um motor, e converte-a em energia hidráulica que por sua vez transmite força ao fluido o qual é transportado de um ponto a outro. Sua classificação é mostrada na Fig. 2.6.

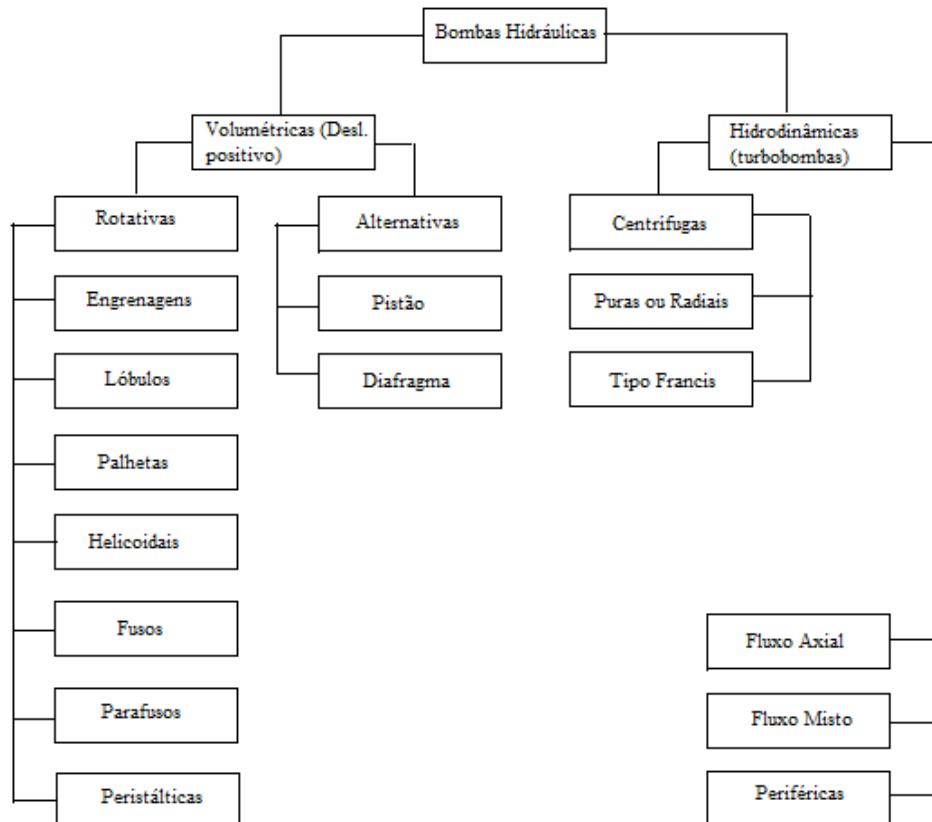


Figura 2.6: Diagrama de blocos dos tipos de bombas hidráulicas. Lopes, 2011.

Conforme Black (1979) as bombas centrífugas são projetadas principalmente com relação a: i) Entrada (admissão simples ou dupla; ii) Estágio de funcionamento (simples ou múltiplos); iii) Produção (grande volume / pequena carga; volume médio / carga média; pequeno volume / carga alta).

O rendimento de uma bomba centrífuga é determinado pelo tipo de rotor, segundo afirma Black (1979), como a situação apresentada na irrigação. A seleção do tipo de rotor é de suma importância para uma operação satisfatória e econômica da bomba. O autor define que um alto rendimento pode ser obtido com o rotor do tipo aberto sob determinadas condições, tendo-se cuidado com a curvatura das pás e reduzindo-se as folgas laterais. Esse rotor é usado para recalcar grandes quantidades de água e pequenas cargas.

A bomba rotativa (deslocamento positivo) é usada para o fornecimento de energia ao fluido nos sistemas hidráulicos. Usada com frequência nas máquinas operatrizes, aviões, automóveis, prensas e transmissões em equipamentos móveis, esta colhe continuamente o líquido da câmara, enquanto a centrífuga prevê velocidade à corrente fluida. Requer vazões mais elevadas.

A bomba alternativa possui um movimento de “vai e vem” (BLACK, 1979), distinguindo das bombas centrifugas e rotativas que possuem movimento circular. Nesta, o movimento alternativo do pistão é convertido em movimento circular por meio de uma biela, sendo necessários três elementos para seu funcionamento: pistão ou êmbolo; válvula de admissão e válvula de descarga. São especificadas para serviços onde se requer cargas elevadas e vazões baixas.

De uma forma geral, o rendimento de uma bomba é a relação entre o trabalho útil desenvolvido por um equipamento de acionamento e a energia para produzir aquele trabalho. Há vários tipos de rendimento (BLACK, 1979), sendo: hidráulico, volumétrico, térmico, mecânico e rendimento total. O rendimento hidráulico é a relação entre a coluna total (altura dinâmica de recalque mais altura dinâmica de succão) e esta mesma coluna dinâmica total acionada às perdas hidráulicas. O rendimento volumétrico é a relação entre a capacidade e o deslocamento. O rendimento térmico é a relação entre o calor utilizado pela bomba para a realização de trabalho útil e o calor fornecido. O rendimento mecânico é a relação entre potência indicada no terminal de água e a potência indicada no terminal de vapor.

Uma bomba deve ser dimensionada para atender determinadas faixas de recalque de uma vazão do líquido que é transportado a uma velocidade e a uma já conhecida altura geométrica. Essa vazão é determinada de acordo com o propósito que se destina. A velocidade é definida pelos fabricantes, de tal forma que a velocidade máxima de escoamento dentro da tubulação recomendada fique em torno de 2 m/s. Esse valor representa o equilíbrio entre custo de instalação e capacidade (custo) da bomba a ser instalada.

A velocidade pode variar conforme a redução ou aumento do diâmetro da tubulação. Recomenda-se que o diâmetro de sucção tenha um diâmetro a mais que o de recalque (para bitolas comerciais). Com isso, há necessariamente um aumento de velocidade quando o líquido passa da sucção para o recalque. Resta então estabelecer as outras variáveis.

Portanto, quatro variáveis devem ser obtidas para a definição da bomba: vazão; comprimento do tubo; altura geométrica e diâmetro da tubulação. No caso de projetos de bombeamento para irrigação, a vazão deve ser suficiente para atender as demandas das culturas que irá irrigar. Para encontrar a vazão para projetos de irrigação, deve-se ter como dado principal o *per capta* da cultura a ser irrigada ou a área plantada, definindo-se a vazão por unidade de área. Esses valores são encontrados em tabelas, conforme será demonstrado posteriormente.

As diferenças entre as bombas volumétricas e as turbobombas são descritas por Matos (1998). Nas bombas volumétricas há uma proporcionalidade, uma relação constante entre descarga e a velocidade da bomba. O líquido é bombeado praticamente independe da altura e/ou pressões a serem vencidas. Nas turbobombas a vazão bombeada depende das características de projeto da bomba, rotação e das características do sistema em que está operando. Nas volumétricas o movimento do líquido dentro da bomba e o movimento do órgão impulsor são exatamente os mesmos, mesma natureza, mesma velocidade em grandeza, direção e sentido. Nas turbobombas, mesmo sendo os dois movimentos relacionados entre si, não são absolutamente iguais.

Nas volumétricas o órgão mecânico transmite energia ao fluido líquido sob forma exclusivamente de pressão, aumentando a pressão e não a velocidade. Nas turbobombas a energia transmitida pelo impelidor é sob forma cinética ou de pressão, aumentando a pressão e a velocidade.

As bombas volumétricas podem iniciar seu funcionamento com a presença de ar no seu interior. Já nas turbobombas o inicio do funcionamento deve ser feito sem a presença de ar na bomba e sistema de sucção. A bomba deve estar cheia de líquido. Nas turbobombas e rotativas a vazão de bombeamento é constante com o tempo, sendo variável nas bombas alternativas.

A bomba poderá, dependendo da economia que se deseja realizar, recalcar vazões maiores ou menores que aquela através da qual foi projetada, sendo necessário mudar com a vazão: a pressão desenvolvida (altura manométrica); a potência necessária ao acionamento; o rendimento da bomba. Com isso, cada bomba possui um campo de aplicação no que se refere às grandezas envolvidas, dentro da faixa de rendimento que se pode considerar econômica. Para atingir esse objetivo, podem-se utilizar gráficos de seleção e curvas características de bombas, fornecidas pelos fabricantes. As curvas características representam uma *performance* definida para certas condições de funcionamento. Estas curvas demonstram o comportamento das bombas, definindo as relações de dependência entre as grandezas que caracterizam o seu funcionamento.

Em sistemas de bombeamento alguns fenômenos ocorrem com determinada frequência, dentre os quais se destacam: a cavitação, o golpe de aríete e as perdas de carga.

A cavitação é um fenômeno provocado quando é gerada uma zona de pressão negativa (Gomes, 2008). Assim, o fluido tende a vaporizar, o que forma bolhas de ar. Ao sair dessa zona, o fluido retorna a pressão de trabalho, quando as bolhas de ar implodem e provocam ondas de choque (Figura 2.7). Isso causa desgaste, corrosão e prejudicam as tubulações e motores, particularmente o rotor, que será descrito em outro capítulo.

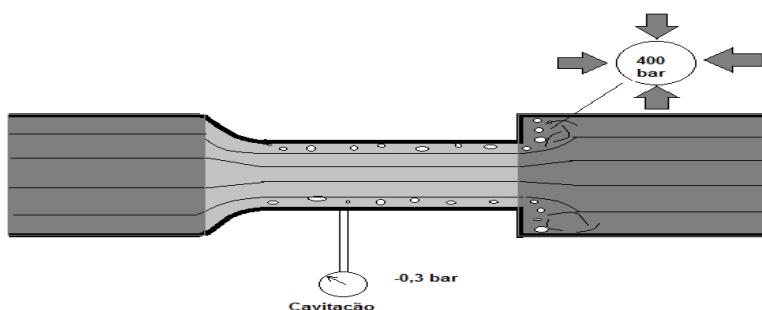


Figura 2.7: Cavitação em uma tubulação. Adaptado de Gomes (2008).

Dentre as causas da cavitação o autor aponta as seguintes: i) Filtro da linha de sucção saturado; ii) Respiro do reservatório fechado ou entupido; iii) Linha de sucção muito longa; iv) Muitas curvas na linha de sucção (perdas de cargas); v) Estrangulamento na linha de sucção; vi Altura estática da linha de sucção, e; vii) Linha de sucção congelada.

Os efeitos oriundos da cavitação irão depender: i) do tempo de duração; da intensidade; iii) as propriedades do líquido; e, iv) da resistência do material à erosão por cavitação. Este fenômeno apresenta um barulho característico, redução na altura manométrica e no rendimento.

Uma bomba em cavitação apresenta queda de rendimento, marcha irregular, vibrações e ruídos. Para evitar é necessário o planejamento com um bom projeto e fazer regularmente manutenções preventivas. A cavitação é apontada por diversos autores como o principal problema enfrentado pelo bombeamento de água.

Segundo Andrade (2011) os efeitos da cavitação são mais visíveis em um período de prazo mais longo, sendo mensurável. Com o tempo, os rotores terão perdas enormes em relação a sua massa, o que compromete o desempenho da bomba e levar a sua ruptura. Em um espaço pequeno de tempo, a cavitação compromete da *performance* da bomba, com redução de rendimento, vibração não característica e ruídos.

De acordo com Andrade (2011), para evitar a cavitação, fabricantes definem o valor da energia, em função da vazão, que deve existir no flange de sucção da bomba, a fim de que na entrada do impelidor exista uma pressão superior á da vaporização. A esse valor encontrado, dar-se o nome de NPSH (Net Positive Suction Head) que significa a altura total de sucção, referida á pressão absoluta (pressão atmosférica no local das instalações), determinada no centro de sucção, menos a tensão de vapor do líquido (Borges, 1992).

Portanto, para que não haja problema de cavitação, basta que o NPSH disponível pela bomba seja superior ao requerido. A NBR 12.214 (NORMA ABNT 12.214: 1992) recomenda que o NPSH disponível deva ser superior em pelo menos 20% e que: $NPSH_{disp} \geq NPSH_{req}$ (condição pra não ocorrer cavitação).

Logo, para que o NPSH leve a uma sucção satisfatória à bomba é fundamental que a pressão em qualquer ponto da linha não se reduza á pressão de vapor do fluido bombeado. Em outras palavras, tomar providência na sucção para que a pressão útil

para a movimentação do líquido seja sempre maior que a soma das perdas de carga na tubulação com a altura de sucção, mais as perdas internas da bomba (Schneider, 2011).

O golpe de aríete refere-se às flutuações provocadas por um súbito aumento ou diminuição da velocidade do fluxo. Estas flutuações de pressão podem ser graves o suficiente para quebrar a linha de água. Problemas potenciais de golpe de aríete podem ser considerados ao avaliar o projeto das instalações e ao realizar uma análise detalhada das oscilações de pressão, em muitos casos, para evitar avarias dispendiosas nos sistema de distribuição.

As perdas ocorridas em tubulações são classificadas em duas categorias (Potter, 2009): i) causadas pelo cisalhamento na parede nos elementos do tubo; e, ii) causadas pelos componentes da tubulação. No primeiro caso estas perdas estão distribuídas ao longo do comprimento dos elementos do tubo. No segundo caso, as perdas são tratadas como pequenas descontinuidades na linha piezométrica e nas linhas de energia, conhecidas como perdas singulares, causadas por escoamentos separados ou secundários.

Para Borges (1992), as perdas de cargas consistem em diferenças de energia inicial e energia final de um líquido, quando este flui em uma tubulação de um ponto a outro. Sendo essa forma de energia dissipada sob a forma de calor. O autor classifica essas perdas em: i) localizadas e, ii) distribuídas. As localizadas ocorrem nas conexões, válvulas, registros, medidores, etc. Estas, pela sua forma e disposição elevam a turbulência no tubo, o que provoca atrito e choque entre partículas. As perdas de cargas distribuídas ocorrem pelo movimento da água na tubulação.

Alguns elementos que interferem no deslocamento do líquido são apontados por Borges (1992): rugosidade da tubulação; viscosidade e densidade do líquido, velocidade de escoamento, grau de turbulência do fluxo, distância percorrida pelo fluido e mudança de direção do fluido.

A viscosidade, segundo Streeter (1978) é a propriedade do fluido que requer maior consideração no estudo dos escoamentos. Esta é conceituada pelo autor como sendo a propriedade de um fluido responsável por sua resistência ao cisalhamento

Com relação a velocidade, esta, segundo a mecânica dos fluidos, quanto maior dentro de uma tubulação maior será a perda de carga do mencionado fluido. Para diminuir a perda de carga, deve-se reduzir a velocidade do fluido. Com isso,

velocidades elevadas levam a um aumento do consumo de energia nas bombas e compressores, pelo aumento de perda de carga.

Pelo exposto, percebe-se que em todas as atividades necessárias ao dimensionamento de instalações que necessitem fazer o transporte de água de um ponto pra outro, é necessário calcular as perdas de cargas existentes. Estas dependem essencialmente do comprimento do tubo e sua rugosidade. Conforme a natureza do tubo modifica-se o coeficiente de rugosidade (existem tabelas com os valores da rugosidade conforme natureza e tempo de uso do tubo), além dos diâmetros equivalentes obtidos em tabelas segundo o tipo de peça que provoque perdas de cargas.

Almeida (1995) lembra que a determinação da perda de carga por atrito em tubulações retilíneas é um parâmetro de grande importância, pois afeta o sistema hidráulico, resultando em aumento de custos e incidindo no balanço da rede. As dimensões de tubulações possuem dependência da magnitude da perda por atrito a ser considerado pelo projetista. Os custos são associados com o diâmetro da tubulação. Como o diâmetro da tubulação aumenta com a vazão e com a pressão, a perda de carga por atrito diminui por unidade de comprimento, havendo então uma diminuição da energia requerida pelo conjunto motobomba (Kamand, 1988).

Nos tubos, o líquido pode deslocar-se de duas formas distintas: laminar e turbulento (Azevedo Netto, 1998). O regime é laminar quando as partículas fluidas apresentam trajetórias bem definidas que não se cruzam. Havendo movimento desordenado de partículas, a velocidade apresenta em qualquer instante uma componente transversal. De acordo com Gomes (2008) as camadas do fluido em regime laminar deslocam-se paralelamente umas às outras. Com isso, a velocidade do fluido aumenta quando vai se afastando das paredes do tubo, atingindo a velocidade máxima no eixo central do fluido. No regime turbulento, as camadas de fluido deslocam-se de maneira aleatória em relação às outras.

No caso do funcionamento de uma bomba, em um intervalo pequeno de tempo, esta acelerará a água e então começa o escoamento. Streeter (1978) afirma que a bomba criará um gradiente de pressão. Observando-se um volume de água em uma seção reta do tubo, a pressão será diferente em dois pontos distintos, levando a uma força resultante no volume de água na seção. Caso a pressão fosse a mesma nos dois lados, ter-se-ia uma força resultante nula e o volume de água continuaria o movimento com

velocidade constante. Quando a água estiver fluindo a certa velocidade, o trabalho realizado pela bomba será bem menor.

Desta forma, cada bomba tem certo campo de aplicação em termos de uso e atendimento às necessidades de campo. Com isso, para ficar mais claro e objetivo, as bombas serão descritas conforme suas limitações de uso, com definição de seu campo de aplicação para as condições de campo apresentadas. Estas serão apresentadas de acordo com os tipos mais recomendados e utilizadas na pesquisa de campo realizada.

As bombas centrífugas submersas (eixo vertical) são utilizadas em poços tubulares freáticos ou artesianos com diâmetro mínimo de quatro polegadas (101,6 mm). Devem ser resistentes a areia (máximo de 50 g/m³). O Ph deve variar de seis a nove. Geralmente são acionadas por fontes elétricas.

Para o dimensionamento deve-se ter: i) o diâmetro interno do poço; ii) a profundidade total do poço; iii) o nível estático (altura entre a tampa do poço e a lâmina da água, antes do bombeamento); iv) o nível dinâmico (altura entre a tampa do poço e a lâmina da água, uma vez alcançado o nível de equilíbrio durante o bombeamento); v) a profundidade de instalação da bomba (a profundidade de instalação deve levar em conta as características do poço. Recomenda-se que a profundidade de instalação garanta permanentemente uma coluna de água acima da bomba de no mínimo três metros bem como uma distância mínima entre a base do motor e o fundo do poço de três metros); vi) a altura de recalque externa (desnível entre a tampa do poço e o ponto mais alto da instalação); vii) o comprimento da tubulação também (desde a motobomba até o reservatório superior); viii) a vazão que o poço fornece; e, ix) a vazão que o cliente necessita por dia ou por hora.

As bombas centrífugas de eixo horizontal são dimensionadas observando as alturas de recalque e sucção. O processo de dimensionamento exposto anteriormente define a potência do conjunto motobomba e a altura manométrica a ser atingida, com base na vazão, segundo as necessidades de uso. Para a altura manométrica, não se deve esquecer de considerar as perdas de carga. Essas informações devem ser observadas então nos catálogos dos fabricantes que apontam a bomba adequada para cada situação.

Com relação à vazão, deve-se ter o cuidado de observar o valor solicitado em relação à vazão disponível na fonte, de tal forma que esta seja maior que a demanda requerida.

No processo de escolha podem-se utilizar as curvas características de bombas fornecidas pelos fabricantes. Estas traduzem o seu funcionamento através de gráficos, com interdependência entre as grandezas operacionais. As curvas são função do tipo de bomba, do tipo de rotor, das dimensões da bomba, da rotação do acionador e da rugosidade interna da carcaça e do rotor. Os gráficos cartesianos representam o funcionamento médio de um modelo fabricado em série e o seu funcionamento onde as curvas foram testadas em laboratórios. No caso de uma bomba multiestágio que pode ser usado em processos de irrigação, consulta-se a curva de posse da vazão exigida para verificar se a bomba pode elevar a água na altura desejada.

Conforme Black (1979) as bombas usadas no serviço de irrigação de grande porte caracterizam-se por apresentarem grandes vazões e baixas cargas. Nas pequenas irrigações, há necessidade de pequenas e médias vazões com carga elevadas. No primeiro caso recomenda-se o uso de bombas centrífugas axiais. No segundo caso é aconselhado o uso de bombas centrífugas radiais.

Havendo uma altura manométrica elevada pode-se examinar a possibilidade de uso de bombas em série. Nesse caso, a altura manométrica ultrapassa os valores alcançados pelas bombas multiestágio. Assim, a descarga de cada bomba é conectada à sucção da seguinte, de tal forma que a vazão será a mesma em todas as bombas enquanto que a pressão de descarga desenvolvida será a soma de cada uma das unidades (MATTOS, 1998).

O autor também sugere o uso de bombas em paralelo quando a vazão exigida for muito elevada. A segurança maior é a de que, havendo uma falha de uma das bombas, não se interrompe o fluxo, apenas diminui a vazão, o que não se verifica no caso de ter apenas uma bomba ou quando estas estiverem em série.

Em um dado projeto de bomba, esta deve recalcar uma vazão a uma altura manométrica com o maior rendimento possível. Em uma faixa econômica, uma bomba poderá recalcar vazões maiores ou menores que as de projeto. Se a vazão variar, varia: a pressão, o rendimento da bomba, o NPSH e a potência necessária ao acionamento. As curvas características são diagramas que retratam o real comportamento da bomba, que mostra o relacionamento entre as grandezas que caracterizam seu funcionamento.

As principais curvas características são: Altura manométrica x vazão; Potência x vazão; Rendimento x vazão; NPSH requerido x vazão. Estas podem ser representadas

de forma geral ou de forma específica conforme determinado fabricante que definirá suas curvas. O rendimento é definido como sendo a relação entre a potência útil cedida pela bomba e a potência absorvida pela bomba (MATTOS, 1998).

As Bombas centrífugas de eixo horizontal e vertical são utilizadas para bombeamento de água em situações de existência de lâminas d'água superficiais e poços. Com isso, estes tipos de bombas só devem ser usadas em regiões que possuem rios e córregos perenes, poços lagos, açudes e lagoas que mantenham níveis de água possíveis de serem bombeados (lâmina d'água mínima para permitir sucção) (Fig. 2.8).

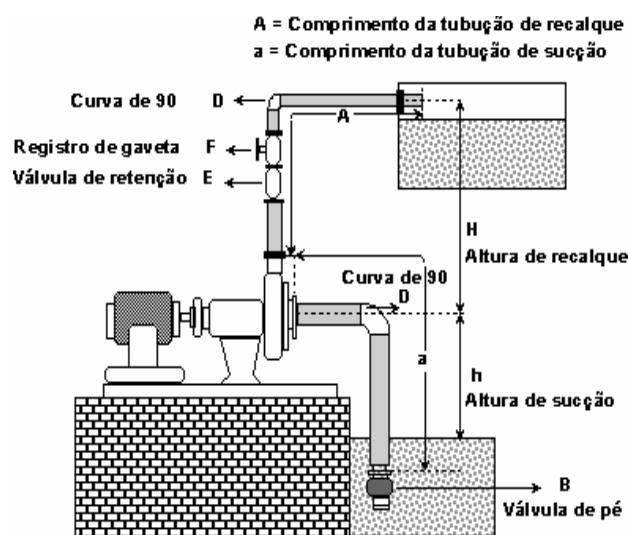


Figura 2.8: Representação de instalação de bomba de eixo horizontal. Lima, 2009.

Geralmente são acionadas por energia elétrica proveniente de fontes hídricas (hidrelétricas). Estas são mais viáveis do ponto de vista prático, pois possuem vantagens relacionadas à energia elétrica de baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando, construção simples, custos de aquisição e manutenção reduzida, grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos. Como desvantagens têm a necessidade de serem instaladas próximas de rede elétricas para se manter o baixo custo de implantação, além de um reduzido ciclo de vida do produto que em média situa-se entre 4 e 5 anos de vida útil. Atualmente, a grande maioria das bombas são acionadas por motores elétricos em corrente alternada.

Lopes (2011) esclarece que em uma quantidade menor, as bombas são acionadas também por motores de combustão interna e por turbinas a vapor ou a gás e motores hidráulicos. Em seguida vêm as bombas acionadas diretamente por ar comprimido e as acionadas por cataventos. Os motores das bombas podem ainda ser acionados por eletricidade advinda do sistema de distribuição ou de sistema fotovoltaico, eólico-elétrico e outros em localidades remotas.

Os Fatores que estão relacionados à escolha de uma bomba são: i) a quantidade de líquido a transportar; ii) tamanho da bomba; iii) necessidade de usar mais do que uma bomba em paralelo; iv) a carga a vencer (que depende da pressão, da cota vertical do reservatório a jusante e das perdas por atrito); v) a natureza do líquido a bombear; vi) a fonte de energia; vii) o custo e; viii) a eficiência mecânica da bomba.

Uma bomba para ser selecionada depende das condições econômicas e técnicas. Com relação aos critérios técnicos, estes se relacionam às condições locais que possibilitam a escolha baseada nos seguintes parâmetros: fontes de água existentes, fontes de energia disponíveis, área irrigada; vazão disponível, vazão necessária, desnível, distância da fonte de água à região irrigada ou reservatório e outros relacionados.

Um aspecto que influí muito no projeto é o reservatório de água. A água chega ao reservatório por bombeamento e deve estar localizado de tal forma que permita o escoamento da água por gravidade para toda a cultura irrigada, devendo ter capacidade para suprir as demandas. Conforme Eleotero (2008) suas principais finalidades são: regularizar vazão; proporcionar segurança ao abastecimento; reservar água para incêndio,e; regularizar pressões.

Para Tsutiya (2005), além destas finalidades tem-se ainda: transporte de água fora do horário de pico elétrico e aumento nos rendimentos do conjunto elevatório. O inconveniente da instalação dos reservatórios resume-se ao aumento de custos e localização para atender as variações de pressões.

As bombas centrífugas que funcionam com motor a gasolina ou diesel são bombas que são acionadas em situações de necessidade do uso por economia de energia elétrica ou quando não se dispõe dessa fonte energética.

Mas o que é mais comum é que essas bombas prestam serviços onde as fontes de energia são limitadas ou inexistentes. As bombas são perfeitas para gerar pressão em

aplicações de pulverização ou transferência. Estas estão disponíveis completas ou sem motor. Unidades completas vêm montadas sobre o motor especificado, prontas para instalação e operação. Unidades sem o motor vêm com todos os acessórios necessários para montagem sobre o motor especificado.

Na conclusão de sua pesquisa, Michels (2009) define as aplicações mais importantes de uma motobomba acionada por painéis fotovoltaicos (FV). Estão nas residências remotas distantes da rede elétrica, nos bebedouros para animais e na irrigação de culturas de baixo consumo de água. Diante disso, o sistema pode bombear água em qualquer região que tenha capacidade máxima de 53.053l.mês^{-1} ou $1.768,5\text{l.dia}^{-1}$. Este sistema em situação real de trabalho, bombeando água a 20 m de altura apresentou eficiência máxima de 9,58% no solstício de inverno e valor mínimo de 8,57% no solstício de verão, considerando dias limpos (sem interferência de nuvens).

Para a instalação da bomba, existem duas formas (SunLab Power, 2009):

- Direta: o painel FV fornece energia diretamente à bomba, o que permite seu funcionamento ininterrupto enquanto houver insolação. Nesse caso, o custo do sistema é menor e é mais simples, pois não há adição de baterias, inversor ou controlador de carga, com a desvantagem de limitação do bombeamento às variações de insolação (Fig. 2.9.a).
- Indireta: aciona-se ao sistema FV baterias e um controlador para armazenamento de energia para necessidades posteriores de bombeamento ou outros usos (Fig. 2.9.b).

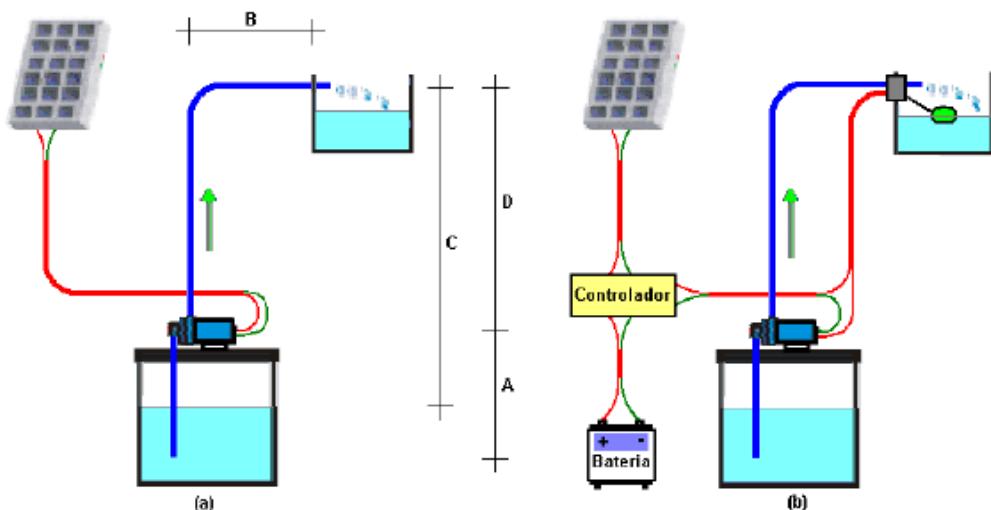


Figura 2.9: Sistemas de bombeamento fotovoltaico. SunLab Power, 2009.

2.7 Bombeamento Usando Fontes Energéticas Variáveis

A Fonte hidráulica / hidrelétrica gera a eletricidade fornecida pelas concessionárias de energia. As bombas mais usadas para a fonte elétrica na região são as centrífugas. Estas apresentam custos de instalação que variam dependendo de vários fatores dentre o qual sua potência que aumenta conforme a demanda e altura que influenciam outros fatores.

Na captação observou-se a retirada da água de fontes superficiais com a presença de rios, riachos e açudes, sendo esta a situação que apresenta maior satisfação e onde os custos são mais reduzidos em curto prazo. Outra situação surge pela necessidade de abertura de poços para captação subterrânea, que encarecem os custos e onde nem sempre há vazão suficiente para atender o projeto de irrigação, o que provoca perda de tempo, de recursos financeiros, materiais e humanos, resultando em insatisfação do agricultor.

Em uma análise mais racional, como a energia elétrica tem um custo mensal, essas bombas devem ser evitadas caso haja disponibilidade de acionamento com fontes alternativas, como a solar, a potencial e a eólica. Nesse caso, analisam-se os custos com implantação dessas fontes. Em caso de baixas vazões e grandes alturas de recalque, podem ser usadas as bombas com acionamento potencial da água, que possuem um custo de implantação relativamente baixo (custo fixo) e custo de operação e manutenção insignificantes (custo variável).

Conforme relata Geller (1994) para se maximizar a eficiência energética, usando energia elétrica, deve-se realizar um serviço ou a produção de um bem com quantidades de energia inferiores a usada habitualmente sem prejuízos a qualidade, conforto e eficiência. Isso significa produzir menos energia resultando em um mesmo resultado com redução de custos com a eletricidade consumida, com manutenção dos equipamentos e outros custos relacionados.

Para essa fonte de energia, havendo uma impossibilidade de redução de consumo, a alternativa que parece ser a mais conveniente é o uso em horários fora de ponta (de menor consumo), onde o custo unitário é menor devido a menor variação de demanda como mostra a Fig. 2.10.

Eleotero (2008) afirma que para um melhor sistema de geração são usados os horários fora de ponta com a energia gerada pelas usinas hidrelétricas, mantendo-se o suprimento de carga na base. Aumentando o consumo é adicionada a energia gerada pelas termelétricas que têm maior custo e encarecem o horário de ponta (de maior consumo).

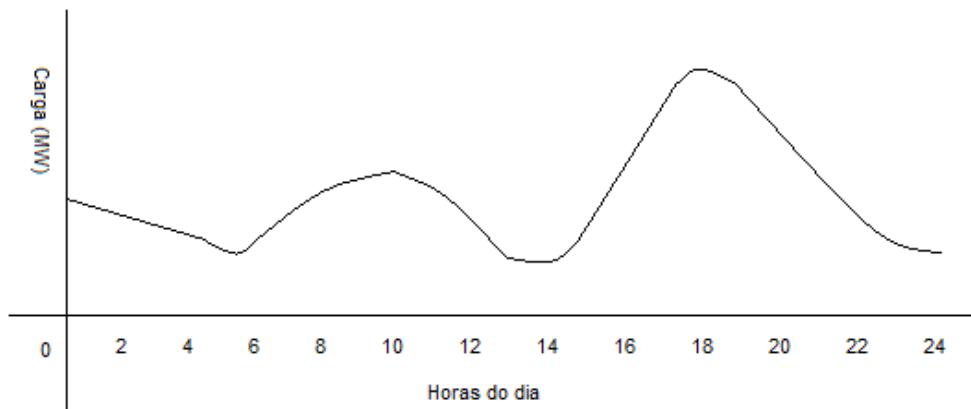


Figura 2.10: Curva de Carga típica do Sistema Elétrico nacional. Adaptado de Silva Junior, 2005, in Eleotero, 2008.

Segundo Anhalt (1987), a média anual de irradiação global no território brasileiro tem uma boa uniformidade, com médias anuais altas em todo o País, sendo que o valor máximo observado encontra-se no estado da Bahia ($6,5\text{ kWh/m}^2$) e a menor em Santa Catarina ($4,25 \text{ kWh/m}^2$). Esses valores superam a grande maioria dos países europeus, como Alemanha, França e Espanha que não atingem $2,00 \text{ kWh/m}^2$. A diferença é que nesses países os projetos de energia solar são altamente disseminados e apoiados pelos seus governos.

Por falta de acessibilidade, muitos estados não possuem projetos avançados de energia solar, só alguns isolados. Nessas regiões há insuficiência de distribuição de energia elétrica. Essas redes isoladas, afirma o autor, particularmente da Amazônia, fornecem energia para apenas 3% da população. Grande parte não é acessível, o que aumenta os custos e diminui a confiabilidade no fornecimento de energia.

Conforme Anhalt (1987) para uma adequada utilização e dimensionamento deve-se considerar:

- Fonte de água (poço, cisterna, lago, poço, etc.);

- Profundidade do local da fonte de água;
- Distância e elevação da bomba até o reservatório;
- Demanda de água por um período definido.

A ANEEL definiu os padrões dos Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermittentes – SIGFI (ANEEL), com regulamentos para as concessionárias em aplicações dos sistemas descentralizadas. O consumo diário e autonomia foram definidos com a disponibilidade mensal garantida

A manutenção do sistema solar está restrita às trocas de bateria ou falhas nos componentes (controladores ou inversores). Estudos demonstram que, comparando-se sistemas de energia solar em relação com os da rede comum, reduzem-se os custos variáveis em quatro vezes, considerando-se todos os parâmetros de custos envolvidos.

Cada fabricante comercializa o seu produto e fornece tabelas para a obtenção de informações do produto que mais se adéqua às suas necessidades segundo sua aplicação.

As bombas acionadas por fontes: elétrica, combustão e solar dividem-se em:

- Quanto à Montagem: superficial ou submersa;
- Tipo de bomba: pistão, centrífuga, diafragma, parafuso;
- Quanto a disposição do eixo:
 - Bomba de eixo horizontal: usada para rios, córregos, barragens, etc.
 - Bomba de eixo vertical: usada para poços.
- Quanto ao número de rotores dentro da carcaça:
 - Bombas de simples estágio ou monoestágio: a bomba possui um único rotor dentro da carcaça. Usada para $H_{man} \leq 100$ m.
 - Bombas de múltiplo estágio ou multicelular: a bomba possui dois ou mais rotores dentro da carcaça. Essa associação permite a elevação da água a alturas maiores que 100 m.
- Quanto ao tipo de rotor:
 - Rotor aberto: bomba de pequenas dimensões; pequena resistência estrutural; baixo rendimento; usada para líquidos sujos.
 - Rotor fechado: bomba usada para líquidos limpos; evita a recirculação da água; maior rendimento; é o tipo mais usado.

- Rotor semiaberto ou semifechado: dificulta o entupimento; deve ser usada para líquidos sujos.
- Quanto à posição do eixo da bomba em relação ao nível de água:
 - Bomba de sucção positiva: o eixo da bomba situa-se acima do nível de água; é a situação mais encontrada.
 - Bomba de sucção negativa: o eixo da bomba situa-se abaixo do nível de água; evita a cavitação; deve ser usada sempre que possível.
- Tipo de motor:
 - Corrente continua de baixa potência;
 - Corrente alternada com inversor;
 - Externo ou corrente alternada com sistema;
 - Eletrônico embutido na bomba.

O dimensionamento pode ser realizado usando gráficos que dependem de informações climáticas locais, demandas de água e altura manométrica.

Analizando o ciclo de vida da bomba solar e o da bomba alimentada por motor diesel, percebe-se uma vantagem do modelo solar após três anos de uso, levando-se em conta uma manutenção periódica da bomba solar e custos da operação, combustível e manutenção da bomba diesel. Na Fig. 2.11 fez-se uma comparação do ciclo de vida relacionando-se os modelos de bombas solares e diesel.

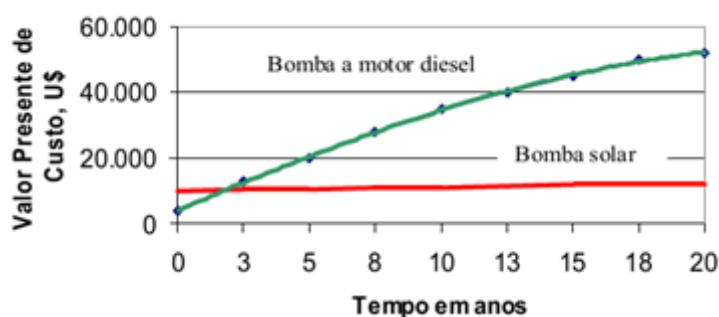


Figura 2.11: Análise econômica de bombas solares e a motor diesel. Anauger, 2013.

Para Fiorentino (2005) com os avanços tecnológicos alcançados na área fotovoltaica, com o aumento da eficiência das células, com novas formas e geometrias dos painéis e com a possibilidade de redução de custos cada vez maiores aumentando a

demandas, pode-se, enfim, colocar a energia fotovoltaica entre as opções viáveis economicamente para diversos fins.

As bombas mais usadas em todo o País são as do tipo centrífugas radiais. Estas podem ser de eixo horizontal ou vertical. A forma de energia para acionamento do motor predominante é de energia elétrica tendo como fonte a hidráulica proveniente de usinas hidrelétricas distribuídas no território Nacional.

De outra forma, os tipos de bombeamento objetos de estudo são: i) a bomba elétrica (mais comum quando existe a energia elétrica, tendo, nesse caso menor complexidade de instalação); ii) motobomba diesel e/ou a gasolina (sendo uma opção mais comum não havendo a energia elétrica); iii) bombeamento a energia renovável (bombeamento solar fotovoltaico).

Para cada tipo de bombeamento apresentado existem soluções. Em áreas pequenas, sem acesso à eletricidade pode-se usar um sistema de irrigação por gotejamento tendo como fonte acionadora da bomba, o sistema fotovoltaico. Sistemas que usam geradores elétricos com fontes de diesel, gasolina ou etanol, são mais caros e com alta complexidade na instalação. Porém, em termos de flexibilidade e viabilidade a motobomba diesel possui um sistema de bombeamento mais adequado.

Os componentes do sistema de bombeamento acionados por energia elétrica e que compõem os custos fixos são: conjunto motobomba; acessórios hidráulicos; acessórios elétricos; acessórios mecânicos; tubulação; fiação; edificação da casa de bombas; demais obras civis e depreciação. Os componentes que compõem os custos variáveis são: consumo de energia; manutenção e reparos.

Os componentes do sistema de bombeamento acionados por diesel e que compõem os custos fixos são: conjunto motobomba; acessórios hidráulicos; acessórios mecânicos; tubulação; edificação da casa de bombas; demais obras civis e depreciação. Os componentes que compõem os custos variáveis são: consumo de diesel; manutenção e reparos.

Os componentes do sistema de bombeamento acionados por energia solar e que compõem os custos fixos são: conjunto motobomba; acessórios hidráulicos; acessórios mecânicos; acessórios solares (painel solar; bateria; inversor; controlador de carga); tubulação; fiação; edificação da casa de bombas; demais obras civis e depreciação. Os componentes que compõem os custos variáveis são: manutenção e reparos.

Os custos com bombeamento, especificamente com energia dependem e são função de várias variáveis: vazão (Q); comprimento da tubulação (L); desnível geométrico (H_g) e tipo de energia (T_m), como denomina Carvalho & Reis: CUSTO ($R\$$) = $f(Q, f, L, H_g, T_m)$.

2.8 Seleção de Bombas

O dimensionamento de um sistema de bombeamento para atender determinada demanda durante certo período de tempo e altura de recalque definida segue o roteiro abaixo, sendo o adotado para esse trabalho (MELLO & YANAGI Jr., 2010):

- i. Fornecer a composição das linhas de recalque e sucção com suas respectivas quantidades;
- ii. Fornecer o tamanho da canalização de recalque, e as alturas de recalque (h_r) e sucção (h_s);
- iii. Definir a velocidade pelo critério da velocidade econômica, por ser simples e eficiente, onde esta varia entre 0,5 e 2 m/s ;
- iv. Determinar o diâmetro, onde a velocidade é fornecida segundo a Eq. (2.3).

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.3)$$

Sendo a área dada pela Eq. (2.4).

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.4)$$

- v. Sobre o valor calculado, adota-se um diâmetro comercial imediatamente superior para a tubulação de sucção e um diâmetro comercial imediatamente inferior para a tubulação de recalque.
- vi. A escolha da bomba é feita com base no traçado da curva do sistema e no cálculo das perdas de carga.

- vii. Perda de carga na sucção: sendo conhecido o comprimento da tubulação de sucção, procede-se a definição do comprimento equivalente, que deve ser obtido somando-se os comprimentos equivalentes das peças que compõem a sucção. Nas tabelas cruzam-se as peças existentes com o diâmetro já definido de sucção.
- viii. Utiliza-se a Eq. (2.5) de Hazen-willians pra o cálculo da perda de carga (h_f) na sucção.

$$h_f = J \cdot L \quad (2.5)$$

Onde “J” é dado pela Eq. (2.6).

$$J = \left[\frac{4 \cdot Q}{0,355 \cdot \pi \cdot C \cdot D^{2,63}} \right]^{1,852} \quad (2.6)$$

- ix. Segue-se o mesmo procedimento para a tubulação de recalque.
- x. Calcula-se a perda de carga total ($h_{f\text{total}}$), através da Eq. (2.7).

$$h_{f\text{total}} = h_{fsuc\,\ddot{\text{c}}\,\text{ao}} + h_{frecalque} \quad (2.7)$$

- xi. Calcula-se a altura geométrica (H_g) usando a Eq. (2.8).

$$H_g = h_r + h_s \quad (2.8)$$

- xii. Define-se a altura manométrica (H_{man}) usando a Eq. (2.9).

$$H_{man} = H_g + h_{f\text{total}} \quad (2.9)$$

- xiii. Definição da equação do sistema. Esta é obtida substituindo o valor da altura manométrica e geométrica encontradas nas equações anteriores e da vazão fornecida no início em m^3/h . Calcula-se o valor de “k” na equação abaixo e

depois, na mesma equação, coloca-se os valores de H_g e “k”, deixando como incógnitas H_{man} e Q (em m^3/h), conforme pode ser visto na Eq. (2.10).

$$H_{man} = H_g + k \cdot Q^{1,852} \quad (2.10)$$

Sendo: k = coeficiente da equação.

De acordo com Mello & Yanagi (2010), para um determinado projeto de irrigação, sendo conhecida a vazão necessária e a altura manométrica, basta substituir esses valores na equação obtida acima para encontrar o valor de “k”, que completaria a equação. Definida a equação, constrói-se a curva do sistema, proporcionando uma tabela de valores de vazão pela altura geométrica, podendo ser plotado os valores no gráfico $H_{man} \times Q$. Unindo-os, tem-se a curva do sistema,

- xiv. Determinar o rendimento / eficiência da bomba centrífuga com base na curva característica ou em tabelas específicas.
- xv. Definir a potência da bomba (em cv) usando a Eq. (2.11).

$$P_B = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{75 \cdot \eta_B} \quad (2.11)$$

- xvi. Determinar o rendimento / eficiência do motor elétrico com base curva característica ou em tabelas específicas.
- xvii. Determinar a potência do motor que aciona a bomba. Para isso usar a Eq. (2.12).

$$P_{MB} = \frac{P_B}{\eta_B} \quad (2.12)$$

- xviii. Determinar o $NPSH_{requerido}$. O $NPSH_{requerido}$ é obtido diretamente na curva $NPSH \times Vazão$ como mostra a Fig. 2.12.
- xix. O $NPSH_{disponível}$ é calculado através da Eq. 2.13. Deve-se conhecer a pressão correspondente, a altitude local e a temperatura do fluido bombeado para a definição do peso específico e da pressão de vapor.

$$NPSH_{disponível} = H_{atm} - H_S - H_v - \Delta h_S \quad (2.13)$$

- xx. Compara-se o $NPSH_{disponível}$ com o $NPSH_{requerido}$. Se $NPSH_{disponível} > NPSH_{requerido}$ não haverá problema de cavitação na instalação.

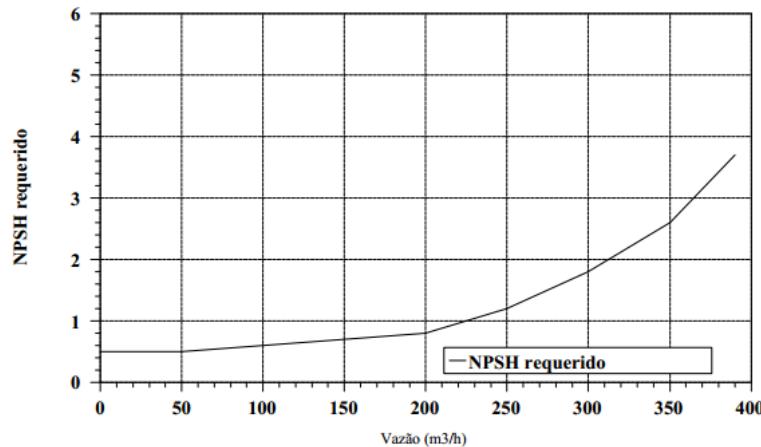


Figura 2.12: Curva característica: NPSH x Vazão. Borges, 1992.

2.9 Dimensionamento de Sistemas com Energia Solar.

Porém, existem fontes de energia disponíveis em todo o território Nacional e que não dependem de acessibilidade, pois se encontram disponíveis no meio, como o sistema de bombeamento através de energia solar fotovoltaica que pode ser a solução para essa problemática, aumentando a produtividade em sistemas de irrigação, além de reduzir substancialmente os custos de operação/manutenção.

Inúmeras comunidades no Brasil, particularmente nas regiões Norte e Nordeste não possuem distribuição de energia elétrica. Para atender essa demanda vem-se utilizando de fontes alternativas de energia, como a solar fotovoltaica, que pode ser usada para acionamento de bombas de água. Suas vantagens podem ser analisadas sob diversos aspectos. Primeiro que a fonte solar ocorre com certa abundância em todo o planeta. A tecnologia atualmente existente já se encontra consolidada, com alta confiabilidade e uma vida útil que pode atingir até 25 anos. Evita-se com essa fonte de

energia o transporte de e custos de aquisição de combustível, além do envio de gases poluentes ao meio ambiente.

Os módulos fotovoltaicos têm referências de médias em padrões internacionais que são usados pelos fabricantes. A potência produzida é expressa em W_p (Watts pico). A produção dos módulos fotovoltaicos varia diretamente proporcional à irradiação.

Para a obtenção de um sistema de bombeamento por energia solar deve-se verificar inicialmente o potencial energético obtido pela média anual de irradiação global.

Como já foi descrito, o Brasil possui esse potencial, pois seu território possui grande parte situada no cinturão intertropical, isto é, entre os trópicos de câncer e de capricórnio. Essa região possui os mais altos índices de insolação do planeta. O sol está posicionado perpendicularmente ao equador, atravessando uma menor camada atmosférica em relação a outras latitudes, resultando em menor “filtragem” dos raios solares, o que ocasiona maior intensidade de luminosidade por dia na média anual (Beneduce, 1999).

Portanto, para a instalação de um sistema de bombeamento aproveitando a energia solar, necessita-se principalmente de intensidade luminosa com potencial energético que permita o funcionamento da bomba para a demanda recomendada. Além disso, é necessário espaço adequado para a instalação do equipamento, livre de obstáculos que possibilitem a passagem da luz solar. É necessário haver insolação, que se refere ao tempo disponível que há luz solar suficiente para a demanda dimensionada. O equipamento deve ser instalado em uma latitude/longitude que permita um grau de inclinação adequado para a captação da luz solar.

As regiões Norte e Nordeste são as menos assistidas por redes de energia elétrica. Estas apresentam menores índices de desenvolvimento, menores renda “*per capita*”, menor expectativa de vida e maiores índices de analfabetismo e mortalidade infantil. Nesse sentido, é fato conhecido que a energia é fator motivador de desenvolvimento, pois: gera emprego, através de uma maior economia; gera trabalho noturno; leva mais informações; conserva medicamentos e possibilita o bombeamento de água, sendo esses dois últimos, fatores de melhorias na saúde pública. No caso da energia elétrica, esta não está disponível em muitas comunidades isoladas por estarem

longe das linhas de transmissão. A busca de autossuficiência energética poderia ser obtida por fontes alternativas, como a solar.

No bombeamento de água para irrigação, usando energia solar fotovoltaica, convém usar sistemas com: microaspersores, gotejadores e xique-xique (sistema que consiste na aplicação de água, através de tubos perfurados, com diâmetro de furo de, no máximo, 1,6 mm (BERNARDO, 2006)). Não é aconselhável o uso de irrigadores do tipo canhão, por serem bastante onerosos.

A energia funciona em corrente contínua de 12 volts. Para correntes alternadas de 110 e 220 volts usam-se inversores. Estes oneram o sistema e dissipam parte da energia produzida.

Um sistema de bombeamento fotovoltaico é composto em geral por: gerador fotovoltaico; sistema de acondicionamento de potência; conjunto motobomba e equipamentos acessórios / complementares, como observado na Fig. 2.13.

Segundo Sá (2010) as células fotovoltaicas possuem rendimento que são obtidas pela relação entre a potência da luz incidente e a potência elétrica disponível nos terminais. O rendimento máximo para as células de silício é de 24,4%. Cada célula tem 100 mm², gerando em seus sistemas uma tensão entre 0,5 e 1 V. São montados em série para alcançar tensões da ordem de 12 V em CC, definindo assim um módulo.

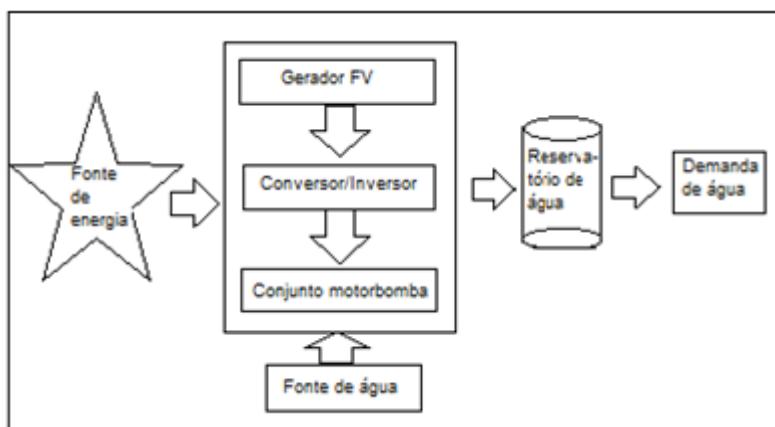


Fig. 2.13: Diagrama de um sistema fotovoltaico de bombeamento. Modificado de Fraindenrach, 2002.

Os módulos fotovoltaicos possuem garantia de fábrica que varia entre dois e trinta por defeitos de fabricação, afirma Solenerg (2008). A vida útil é estimada em

trinta anos (ALDABÓ, 2002; CRESESB, 2005). A manutenção requer basicamente em verificar a projeção de sombras de árvores e outras projeções em alguma parte dos módulos fotovoltaicos e observar se as ligações elétricas estão sem problemas de ajustes ou de oxidação.

Os fatores que influenciam e afetam a potência de saída dos painéis são:

- i) Sombreamento devido a projeção do que se encontra ao seu redor;
- ii) Intensidade luminosa;
- iii) Inclinação;
- iv) Temperatura das células;
- v) Nebulosidade.

De forma simplificada, o sistema de bombeamento através de energia solar é composto de (SÁ, 2010):

- i) Baterias: armazenam energia química e a disponibiliza sob a forma de energia elétrica. Podem ser: recarregáveis e não recarregáveis.
 - a. Recarregáveis: compostas por células primárias. Possuem vida útil limitada (cerca de dois anos, com garantia de fábrica de um ano). Seu ciclo chega ao fim quando descarregadas. Possuem baixa potência.
 - b. Não recarregáveis: compostos por células secundárias. São chamadas de baterias de armazenamento. Possuem uso geral e funcionam em longos períodos (entre dois e quatro anos, com garantia de fábrica de 2 anos).
- ii) Inversores: dispositivo elétrico que utiliza um mecanismo de chaveamento (transistores, IGBT ou Mosfei). Alteram o fluxo de corrente, convertendo corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). A tensão de entrada é de 12,24 ou 48 V (CC) e converte 127 ou 220 V (CA). Seu ciclo de vida é superior a 10 anos e garantia de fábrica de três anos. Os tipos de inversores são:
 - a. Inversores de onda quadrada: apresentam muitos harmônicos na saída. Geralmente utilizados para cargas resistivas.
 - b. Inversores de onda quadrada modificada: menor distorção harmônica e a forma de onda na saída aproxima-se mais de uma onda senoidal. Adequado para alimentar lâmpadas, equipamentos eletrônicos e motores.

- c. PWM: baixa distorção harmônica. Não indicada para equipamentos muito sensíveis por apresentar picos de tensão e, com isso, pode atrapalhar o funcionamento do equipamento.
- iii) Controladores de carga: responsáveis pela máxima transferência de potência do arranjo fotovoltaico para o banco de baterias com a finalidade de carregá-las corretamente. É função de proteção contra corrente reversa, carga e descarga excessiva das baterias e sobrecorrentes. Assim como os inversores, possui ciclo de vida superior a dez anos e garantia de fábrica de três anos.
- iv) Arranjo fotovoltaico: A energia solar fotovoltaica origina-se através de módulos fotovoltaicos que geram energia elétrica em corrente contínua. Os módulos são compostos por materiais semicondutores que reagem na presença de luz deslocando elétrons. É a chamada fotossíntese eletrônica. O sistema possui confiabilidade e tempo de vida longo (em torno de 25 anos), sem manutenção, apenas com simples limpeza que permite uma maior penetração aumentando a eficiência do sistema. Estes dispensam operadores e funcionam automaticamente. Possuem maior flexibilidade, pois possibilitam ampliação, redução ou transferência. Sua fonte é inesgotável e não polui o meio ambiente. Sua maior limitação é o preço levado na instalação e por conta do valor dos equipamentos que compõem o sistema.
- v) Motobombas: adicionam energia ao líquido, facilitando os movimentos. As bombas centrífugas são as mais usadas para bombeamento de água. Preferencialmente devem ser autoescorvantes (retiram água de um reservatório em um nível inferior a ela, não precisando trabalhar inundada em um líquido). Devem ter:
 - a. Resistência;
 - b. Facilidade de operação;
 - c. Manutenção simplificada;
 - d. Alto rendimento
 - e. Economia.

Para o dimensionamento de energia solar propõe-se para essa tese o roteiro descrito abaixo que deve prever e/ou definir:

- A potencialidade energética solar da região. Essa informação deve ser informada no início, pois, caso na região não exista radiação solar em quantidade e qualidade suficiente, o uso de energia solar fica comprometido. O investimento é alto e não vale a pena investir em regiões com valores abaixo das médias definidas como adequadas. A CRESESB através do programa SunData fornece em sua página um cálculo da radiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional e constitui-se em uma tentativa desse órgão em oferecer uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Nesse programa, para saber a radiação diária média, em kW.h/m².dia, entra-se com as latitudes e longitudes da região ou valores próximos.

- As necessidades do usuário. O sistema de bombeamento é função da altura manométrica e da vazão. Estas duas variáveis devem ser obtidas dimensionando-se usando os modelos já apresentados. Deve-se considerar:

- i) O comprimento linear da tubulação;
- ii) Sua bitola (diâmetro);
- iii) O “peso” das perdas de carga nas conexões;
- iv) A vazão;
- v) A velocidade da água em cada trecho;
- vi) A pressão estática.

- Com as necessidades do usuário definidas, é apontada a localização da região onde o sistema deverá funcionar.

- Definir as fontes de água disponíveis.
- Definir se na região é possível o uso de energia solar.
- Fornecer a aplicação e o detalhamento da aplicação. No caso a aplicação é agrícola sendo usada na irrigação.
- Insere-se a radiação média mensal fornecida pelo CRESESB, dada em kWh/m². dia.
- Define-se a composição do sistema (Fig. 2. 14) que deverá ser dimensionado, sendo composto por: i) arranjo fotovoltaico; ii) controlador de carga; iii) banco de baterias; iv) inversor; v) motobomba.

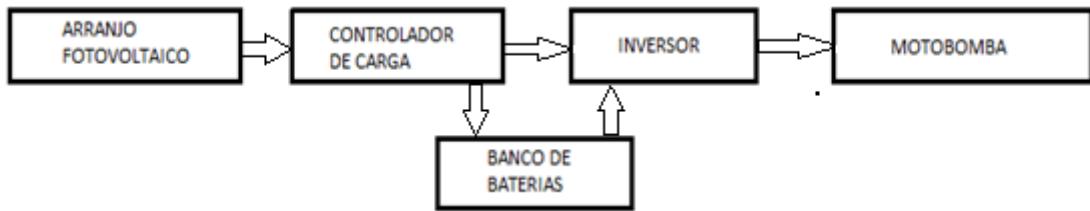


Figura 2.14: Composição do sistema fotovoltaico.CRESESB, 2005.

- Limita a forma de captação da água para a irrigação. Como exemplo escolhe-se uma captação direta de um rio, ao lado da área irrigada com altura manométrica total definida. A energia gerada pelo arranjo fotovoltaico alimentará a bomba e o seu excedente será armazenado pelo banco de baterias e poderá ser usado caso a energia gerada nos terminais disponíveis não seja suficiente para acionar a carga.
- Considerar uma vazão por metro quadrado para irrigar no verão. Por exemplo, considerando-se 6 l/m² por dia, em uma área de 8.000 m², há uma necessidade diária de bombear 48.000 l/dia.
- Escolher a bomba que será utilizada.
- Cálculo da potência elétrica máxima (P_B) obtida na Eq. (2.14).

$$P_B = V \times I \quad (2.14)$$

- Especificam-se os painéis solares.
- Energia utilizada pela bomba (E_B) dada pela Eq. (2.15)

$$E_B = P_B \times t \quad (2.15)$$

- Cálculo de horas a sol pleno (S_P): O número de horas a sol pleno é calculado com base na situação mais extrema e de maior mínimo mensal. Na Tabela, definindo-se o mês e a inclinação do arranjo fotovoltaico, obtém-se uma radiação média mensal “R”.

Para a definição do valor de S_P , tem-se o valor da Eq. (2.16).

$$S_P = \frac{R \frac{Kw}{m^2 \cdot dia}}{1 \frac{kW}{m^2}} \quad (2.16)$$

- Energia gerada por um painel fotovoltaico (E_P) segue a Eq. (2.17).

$$E_P = P_B \times S_P \quad (2.17)$$

- Número mínimo de painéis que formarão o arranjo fotovoltaico (n), segundo a Eq. (2.18).

$$n = E_B \times E_P \quad (2.18)$$

- Arredonda-se para cima o número de painéis, ligados em paralelo.
- Energia diária de suprimento (E_S), conforme a Eq. (2.19).

$$E_S = E_P \times n \quad (2.19)$$

- Energia excedente ($E_{S,}$), segundo a Eq. (2.20):

$$E_E = E_S - E_B \quad (2.20)$$

- Considerar situações extremas de escassez de radiação solar (dias chuvosos).
- Especificação da bateria.
- Autonomia do banco de baterias:

Sendo projetado para irrigação, a presença de chuva não compromete o desenvolvimento da atividade.

Três dias de autonomia dão a confiabilidade necessária ao sistema.

- Consumo da bomba (C_B), obtida pela Eq. (2.21).

$$C_B = E_B \div n' \quad (2.21)$$

- Consumo corrigido da bomba ($C_{B'}$) (levando-se em consideração a eficiência do sistema de conversão de energia (acrescentar ao sistema)) é encontrado pela Eq. (2.22).

$$C_{B'} = C_B \div 0,7 \quad (2.22)$$

- Capacidade do banco de baterias (C_R), conforme a Eq. (2.23).

$$C_R = C_{B'} \times autonomia \quad (2.23)$$

- Corrigindo-se C_R , adiciona-se mais 90% de capacidade de descarga.
- Número de baterias necessárias (N_B) é encontrado conforme a Eq. (2.24).

$$N_B = C_R \div \text{capacidade de uma bateria} (115Ah) \quad (2.24)$$

- Recarga da bateria, obtida pela Eq. (2.25).

$$E_E = E_E \div 12 \quad (2.25)$$

- Número de dias(d) necessários para recarregar a bateria fornecida pela Eq. (2.26).

$$d = C_R \div E_E \quad (2.26)$$

- Por segurança, adicionar mais painéis para um maior excedente de energia gerada.
- Nova energia excedente gerada pelos painéis ($E_{E'}$) para um novo arranjo fotovoltaico, conforme mostra a Eq. (2.27).

$$E_{E'} = C_R \times d' \quad (2.27)$$

- Transforma-se para Watt-hora.
- Nova energia diária de suprimento ($E_{S'}$) (Eq. 2.28).

$$E_{S'} = E_B + E_{E'} \quad (2.28)$$

- Número de painéis para nova energia (n') (Eq. 2.29).

$$n' = E_{S'} \div E_P \quad (2.29)$$

- Nova energia diária de suprimento ($E_S^{n'}$) (Eq. 2.30).

$$E_S^{12} = E_P \times n' \quad (2.30)$$

- Novo excedente ($E_E^{n'}$) (Eq. 2.31).

$$E_{E^{12}} = E_{S^{12}} - E_B \quad (2.31)$$

- Número de dias para recarregar a bateria ($d^{n'}$) (Eq. 2.32).

$$D^{12} = C_R \div E_{E^{12}} \quad (2.32)$$

- Escolha do inversor: Escolhido levando-se em consideração a potência total da carga, a forma de onda na saída e a corrente na saída e a corrente de partida do motor.

Para motores de indução monofásicos, a corrente de partida pode chegar a ser 6 vezes maior que a corrente nominal. Logo, deve-se usar um inversor que suporte essa corrente de pico.

- Sistema de proteção contra curto-circuito (Catálogo).
- Controladores de carga.
- Número de módulos fotovoltaicos em paralelo: n'
- Corrente de curto-circuito de módulo fotovoltaico: (8,02 A) (Eq. 2.33).

$$I_{CC}^A = n' \times 8,02 \quad (2.33)$$

- Fator multiplicador de segurança (1,25):
- Corrente mínima necessária ao controlador de carga (I_m) (Eq. 2.34).

$$I_M = 1,25 \times I_{CC}^A \quad (2.34)$$

- Número de controladores em paralelo (p) (Eq. (2.35)):

$$p = I_M \div I_R \quad (2.35)$$

2.10 Uso das Bombas nos Sistemas de Irrigação

Para determinar a bomba a ser utilizada na agricultura irrigada, deve-se inicialmente calcular o volume de água que deve ser bombeada de acordo com a cultura. A bomba será dimensionada com base nessa informação e nas seguintes: altura manométrica; vazão diária; distância da fonte ao local irrigado e tipo de energia a ser utilizada. A Fig. 2.15 mostra um sistema de bombeamento com a definição das alturas que são bases fundamentais pro seu dimensionamento. Os resultados são os seguintes: potência da bomba; diâmetro de recalque; diâmetro de sucção; pressão e velocidade do líquido.

Na aquisição de bombas deve ser observada com bastante critério a eficiência do conjunto motobomba, entre outros fatores. Os custos de aquisição, manutenção e operação representam em torno de 5%, 10% e 85% do custo total, segundo o Manual Técnico Grundfos (Grundfos, 2012). Com isso, é interessante o investimento em um conjunto de alta eficiência, que, possui um custo inicial maior, porém, com menor custo de manutenção, pela redução no consumo de energia (Tab. 2.5), em casos de bombas com acionamento elétrico.

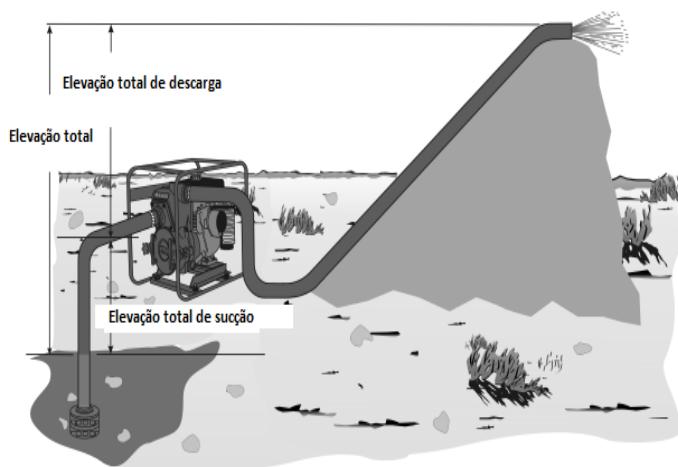


Figura 2.15: Instalação de bombeamento definindo elevações. Manual Multiquip (2010).

Tabela 2.5: Comparação entre rendimento e custo de um sistema de bombeamento. Adaptado de Montovani (2007).

Rendimento(%)	Consumo (kWh)	Gasto (R\$)	Redução (%)
50	5.450	272	
60	4.541	227	-16,7
70	3.893	195	-28,6

Fonte:

Obs.: Valores calculados considerando: um volume bombeado de um milhão de m³, uma altura manométrica total de um metro e um custo de energia de R\$ 0,05/kWh.

Sendo um componente fundamental no sistema de irrigação, o conjunto motobomba mais utilizado é a do tipo centrífuga, com eixo horizontal. É também comum o do tipo turbina de poços profundos. Os motores mais usados são os elétricos, a diesel e a gasolina.

No planejamento para definir o sistema de irrigação, é necessário a obtenção de algumas informações relevantes ao projeto, a fim de evitar perdas por dimensionamento errado. Essas informações referem-se a: tamanho e forma da área; topografia; solo; suprimento de água; cultura a ser irrigada; disponibilidade de mão de obra e clima. Quando o agricultor não estiver atento a essas informações, geralmente reduz sua produtividade pelo elevado numero de perdas, que vão desde o mau dimensionamento da motobomba a não observância de linhas laterais de inclinação que podem conduzir água por gravidade.

Para uma determinada área a ser irrigada deve ser inicialmente obtida a vazão diária, para em seguida determinar o diâmetro da canalização. Com base nessas informações, diâmetro e vazão, mais o valor da altura manométrica, obtém-se o tipo de bomba de acordo com as tabelas dos fabricantes ou com bases em outras tabelas existentes, dependendo da situação de campo e/ou fontes de energia existentes.

Por exemplo, deseja-se dimensionar a vazão diária necessária para uma cultura de melão em uma área de um hectare. Nesse caso, deve-se ter a quantidade de água *per capita* da cultura, nocaço o melão, que pode ser fornecido por cada planta (sendo necessário saber a quantidade de plantas na área, que depende do espaçamento entre elas) ou por metro quadrado. Com essa informação obtém-se a demanda diária de água.

Antes de dimensionar bomba para irrigação, para qualquer fonte de energia, é necessário que seja feito o pré-dimensionamento. Este consiste em determinar: a vazão;

a altura manométrica; o rendimento do motor e o rendimento da bomba. Esses valores são obtidos com base nas seguintes informações: área a ser irrigada; altura de lâmina d'água e horas de funcionamento da bomba.

Oliveira Filho (2010) lembra que, havendo um dimensionamento de motores acima da potência necessária, irá existir maior custo inicial, menor rendimento e menor fator de potência. A literatura recomenda que sejam feitos acréscimos na potência dos motores, chamados de fatores de segurança para o dimensionamento, que podem suprir demandas de potência segundo as condições de trabalho relacionadas às curvas características das bombas e qualidade da energia.

Como ponto de partida, é necessário o cálculo ou que seja informada a vazão necessária de água para atender determinada demanda de campo e a altura vertical, onde, daí se determina a altura manométrica que é função das perdas de cargas localizadas e ao longo do conduto.

A perda de carga localizada depende das peças que compõem a tubulação e que causam atritos internos (viscosidade) nesses pontos. Os valores dessas perdas encontram-se tabelados (comprimentos equivalentes). Esses comprimentos são fictícios e representam a peça como se estivessem distribuídas de forma linear. Portanto, existem perturbações bruscas no escoamento do líquido que causam essas perdas. As principais são: válvulas; mudanças de direção; mudanças de diâmetro; registros e outras. Esta é função da velocidade, da densidade; viscosidade do fluido etc., dentre outras.

Pode-se representar a variação de alturas manométricas em função da vazão, como a Fig. 2.16 formando uma curva denominada “curva do sistema”. Percebe-se nesse gráfico o comportamento da vazão em função das perdas de cargas adicionadas às alturas geométricas.

Para o cálculo dessas perdas pode-se somar seus valores obtidos, segundo as peças que a provocam, ou calcular através da Eq. (2.36).

$$h_e = K_s \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.36)$$

A razão entre vazão e altura manométrica é representada pelos fabricantes de tubos e muito difundida quando se faz dimensionamento de tubos.

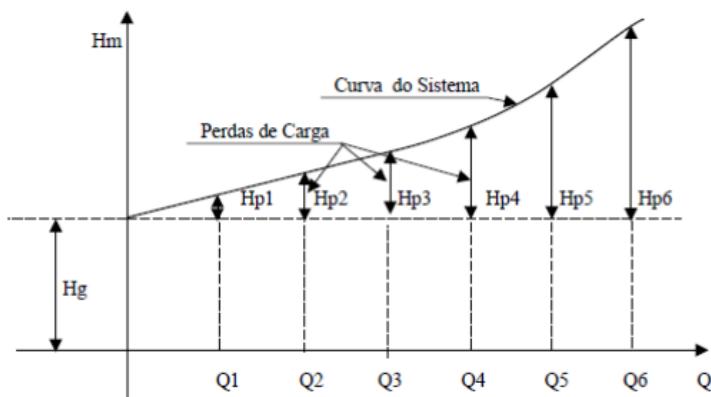


Figura 2.16: Curvas do sistema. Takami, 2005.

* H_m = Altura manométrica Total; H_g = Altura geométrica; H_p = Altura manométrica devido as perdas do sistema; Q = vazão.

Pode-se fazer também a curva característica para a relação entre vazão e potência (Fig. 2.17) e vazão x eficiência (Fig. 2.18).

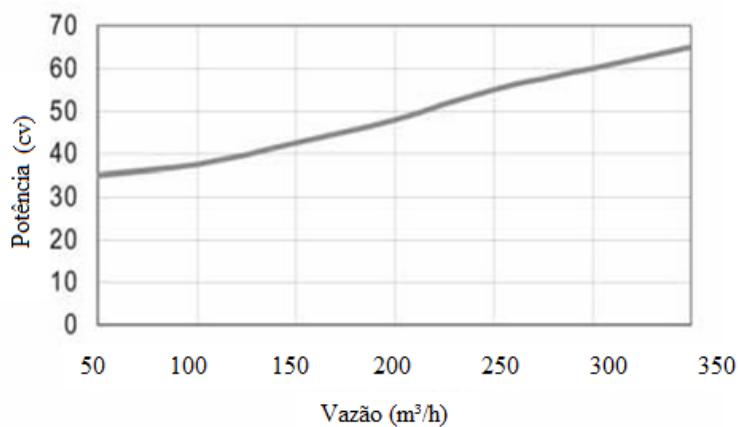


Figura 2.17: Curva: potência x vazão. Monachesi, 2005.

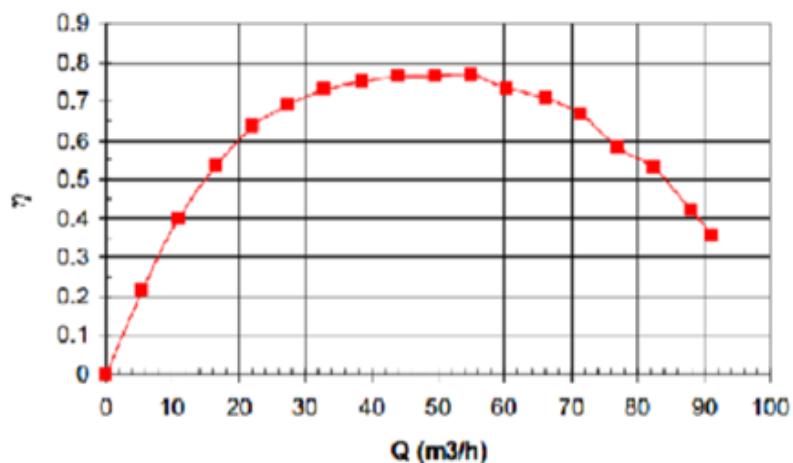


Figura 2.18: Curva: eficiência x vazão. Monachesi, 2005.

O comportamento da eficiência varia muito de bomba pra bomba. Para cada bomba específica o fabricante define em seus catálogos uma faixa de eficiência. Mas de um modo geral, o comportamento das vazões assumem em várias condições crescentes de vazão o comportamento semelhante a uma parábola como pode ser observado nas duas figuras anteriores.

A literatura traz com mais frequência o dimensionamento de instalações hidráulicas usando-se a fórmula de Hazen-Willians, descrita Eq. (2.37).

$$Q = 0,2785 \cdot C \cdot D^{2,63} \cdot \left(\frac{\Delta h}{L} \right)^{0,54} \quad (2.37)$$

Sendo: C = Coeficiente que depende da natureza (material e estado) das paredes dos tubos (Tabelado).

Para o acionamento de uma bomba por um motor, dimensiona-se pela Eq. (2.38). Recomenda-se que valor da potência seja o imediatamente superior ao necessário calculado, evitando-se assim, seu superdimensionamento.

$$P_M = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_{man}}{75 \cdot \eta_B} \quad (2.38)$$

Sendo: η_B = Rendimento da bomba (o rendimento é obtido por meio de curvas características das bombas que apresentam as relações entre altura manométrica e potência e mecânica exigida e vazão para diferentes diâmetros, rotações e modelos).

2.11 Custos dos Sistemas de Bombeamento

Em todo projeto de engenharia, é fundamental a análise econômica e financeira, particularmente nos projetos de abastecimento de água, que envolvem custos muito elevados. Os custos a serem considerados são os fixos e variáveis. Os custos fixos

referem-se aos investimentos realizados, enquanto que os custos variáveis dizem respeito aos custos de operação e manutenção que irão incidir ao longo do alcance do projeto.

Incluem-se como custos fixos (investimentos): aquisição de equipamentos hidráulicos, obras civis e montagem dos equipamentos. Como custos variáveis incluem-se operações e manutenções. As manutenções são aquelas que permitem a conservação dos equipamentos e instalações, reparo de danos em peças, reposições de peças e equipamentos, etc. As despesas de operação referem-se basicamente aos gastos com energia.

Conforme Zoller (1998) diversos parâmetros influenciam os custos de sistemas de recalque que podem ser qualitativos e quantitativos. Os qualitativos são: a qualidade e ao tipo dos equipamentos, fonte de energia e nível de automação e proteção do sistema. Os quantitativos são: i) porte do sistema (vazão, diâmetro, comprimento, comprimento e pressão necessária, desnível topográfico, potência da bomba); ii) características da estação de bombeamento (motor para acionamento, tempo de funcionamento do motor, horário e época de operação no ano, custo do combustível e tarifas de energia elétrica, porte das obras de construção civil, comprimento do ramal elétrico, potência da chave de partida e do transformador).

Os custos de implantação são os investimentos na aquisição e implantação do sistema de irrigação, sendo relevantes na seleção de sistemas e refletem nos custos operacionais dos sistemas de irrigação, como define Melo (1993). Observa o autor que os custos fixos ocorrem independentemente do numero de horas anual de operação, que são: depreciação e remuneração total do capital investido, sendo estes os seguintes: custo de elaboração do projeto, preço de equipamentos, custo de transporte, abertura e fechamento de valeta, etc. Os custos variáveis, continua o autor, são os de operação e manutenção, abrangendo gastos com energia, lubrificantes, mão de obra, infraestrutura e reparos.

Fazendo uma análise econômica, procura-se minimizar custos, principalmente daqueles que se prolongam ao longo do alcance do projeto. Os fixos têm reflexos ao longo do tempo relacionados aos juros sobre o capital remanescente somado à depreciação (depende da vida útil), onde com o aumento da vida útil do sistema, diminui-se o custo fixo.

Na distribuição de recursos disponíveis para resolver determinado problema, procura-se fazer uma avaliação e alocação desses recursos de tal maneira a obter melhores resultados a um custo mínimo, ou, ao contrário, decidir por certa alocação para obter um lucro máximo. Sviercoski (2008) defende que a expressão custo deve ser entendida não somente da forma monetária, como também como algo que se pretende minimizar, e, a expressão lucro, como algo que se quer maximizar.

2.12 Conceitos e Classificação de Custos

Para cada tipo de energia a ser utilizado, mantém-se fixo: i) a área; ii) a demanda (vazão); iii) um tipo de cultura; iv) o comprimento da tubulação; v) o desnível geométrico; e, vi) horas trabalhadas no ano. Varia-se: i) a rugosidade da tubulação; ii) o tipo de material do tubo; iii) taxas; e, iv) tarifas de demanda e de consumo (para energia elétrica). Obtém-se: i) o custo anual total para várias situações (variando no caso do uso de energia elétrica convencional); ii) o diâmetro ótimo (econômico) (Fig. 2.19).

Em todas as fontes energéticas considerou-se os preços de aquisição de motores, bombas; tubulações e acessórios. Para situações específicas de energia, deve-se considerar (Fig. 2.20):

- i) Para energia elétrica: preços reais de energia em várias modalidades definidas pela ANEEL; consumo; etc.;
- ii) Para energia à combustão: preços de combustíveis; consumo; etc.;
- iii) Para energia solar: radiação; baterias; acumuladores; conversor; bateria; etc.;

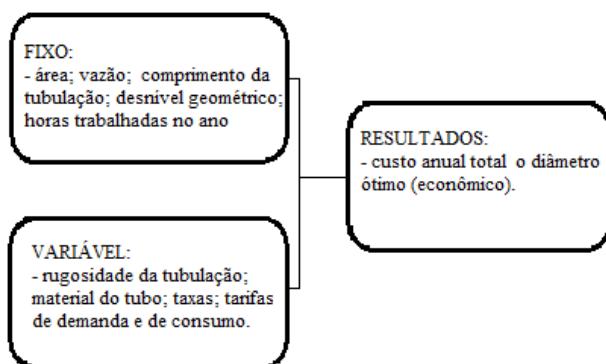


Figura2.19: Definição de custos e resultados.

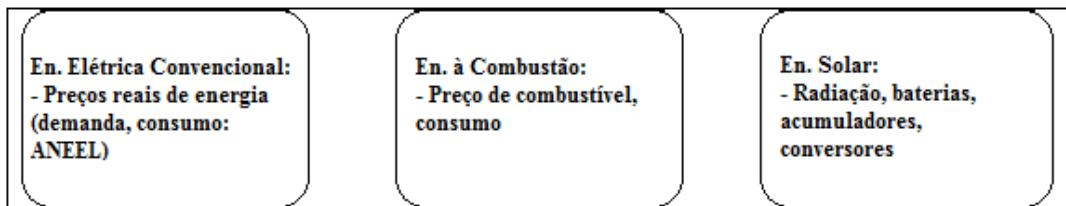


Figura2.20: Fontes energéticas e custos envolvidos.

A classificação da ANEEL para energia elétrica é a seguinte:

- Grupo A: são as unidades consumidoras atendidas em tensão de fornecimento igual ou superior a 2.300 volts. Para esses consumidores são aplicadas tarifas de demanda e de consumo. Sua estrutura é Binômia Convencional e Horosazonal (verde e azul).
- Grupo B: são as unidades consumidoras atendidas em tensão de fornecimento inferior a 2.300 volts. Para esses consumidores é aplicada somente tarifa de consumo. O sistema tarifário grupo B normalmente é aplicado à propriedades rurais que possuem transformadores instalados de até 112,5kVA.

A legislação em vigor no Brasil autoriza as concessionárias a calcular as faturas em função do: i. Consumo (kWh), ii. Demanda (kW), iii. Fator de potência, e, iv. Diferentes tipos de tarifas.

Natativa convencional é considerado somente os parâmetros da tributação. No sistema horosazonal insere-se os parâmetros da tributação mais as variações horosazonais.

O sistema tarifário horosazonal constitui-se na aplicação de preços diferenciados de demanda e consumo, segundo as horas do dia (ponta e fora de ponta) e períodos do ano (seco e úmido). O horário de ponta é composto por três horas consecutivas, entre 19 e 22 horas, exceto sábados, domingos e feriados nacionais (varia conforme a concessionária). O horário fora de ponta é o conjunto das horas complementares às da ponta. O período úmido compreende os meses de dezembro de um ano a abril do ano seguinte e o período seco são os meses restantes.

A tarifa azul consta de dois preços para demanda (ponta e fora de ponta) e quatro preços para consumo (ponta em período úmido, ponta em período seco, fora de ponta

em período úmido e fora de ponta em período seco). A tarifa verde estabelece um único preço para demanda e quatro preços para consumo, para os mesmos segmentos especificados na tarifa azul (ANEEL, 2011).

A tarifa azul destina-se a consumidores que têm alto fator de potência, com utilização constante de energia (impossibilidade de sair de ponta), estando disponível a todos os consumidores ligados em alta tensão, obrigado a aplicação a todos os consumidores ligados aos demais níveis. A verde destina-se aos consumidores com baixo fator de potência, com capacidade de modulação nos horários de ponta dos sistemas. Por essa característica deve ser opcional aos consumidores que usam vazões baixas a médias, como os agricultores rurais. Como o trabalho destina-se a família de baixa renda, nesse trabalho será utilizada a tarifa verde.

Jaguaribe (1981) classifica os sistemas de energia em dois grandes eixos relacionados a custos: sistema não convencional e sistema convencional. Em ambos dividem-se em: custo fixo da instalação; custo anual médio de manutenção; e, custo anual médio de operação.

Relativo à irrigação, Melo (2003) aponta que a energia representa a maior parcela de custo variável, podendo chegar a 70% deste. Esse custo depende do tipo de combustível do motor, da potência instalada e da eficiência do conjunto motobomba. Para a escolha do motor, Carvalho (1992) destaca que esta depende de vários fatores, tais como: potência, disponibilidade de energia, custo de energia, mobilidade, investimento inicial, etc. Para definir o motor e a fonte de energia, analisa-se o conjunto desses fatores para cada projeto.

Para definir a potência, esta está relacionada à altura manométrica do sistema, obtido pela soma da altura geométrica com as perdas de carga, que depende do diâmetro e comprimento da tubulação. Aumentando-se o diâmetro, reduz-se o consumo de energia, reduz-se a altura manométrica e potência exigida para o conjunto motobomba, porém, com maiores custos com aquisição de tubos para recalque. Ocorrendo o inverso caso o diâmetro adotado seja diminuído.

Obtendo-se o diâmetro econômico, que já se sabe que é o mais viável para a manutenção de custos com energia, propõe-se ainda definir a fonte energética mais viável. Porém, resta saber se esse diâmetro econômico é viável para outras fontes de energia: combustão e solar. Com relação à energia convencional, estudos demonstram

que a escolha de um diâmetro econômico reduz custos variáveis, e, em consequência, os custos totais.

Para qualquer situação, os custos de investimentos e operação em irrigação são elevados, conforme comenta Carvalho & Reis (2000). Com isso, faz-se necessário que critérios econômicos sejam levados em conta, não apenas e puramente critérios hidráulicos. Portanto, é vital para o empreendimento agrícola observar e proceder a identificação dos diâmetros ótimos e velocidades econômicas de tubulações para minimização dos custos em situações distintas, com avaliação de custos relacionados ao tipo de energia empregado no bombeamento.

Conforme Scaloppi (1985) (*In: Vescove, 2009*), a quantidade de energia necessária para transportar água do local de captação à área a ser irrigada é muito variável nas propriedades rurais; o consumo total depende da energia para fornecer a quantidade de água demandada na área irrigada, da quantidade de água a ser aplicada, da energia hidráulica exigida pelo sistema de irrigação e da eficiência total do sistema de bombeamento.

Alveset al (2003)(*In: Vescove, 2009*), descrevem que o custo da energia elétrica da irrigação utilizando a denominada tarifa do grupo “A horo sazonal verde com desconto” para irrigação noturna nas diferentes regiões brasileiras é a opção adequada para o agricultor desde que o tempo diário de bombeamento seja de até 21h, evitando o horário de ponta, caso contrário recomendam somente a tarifa azul com desconto para irrigação noturna.

O custo da energia, pelo exposto, depende das situações de campo apresentadas e pela forma de utilização, variando conforme tarifas descritas. Portanto, é função de: desnível geométrico (H_g); diâmetro (D), comprimento da tubulação (L); tempo de funcionamento do sistema (T); vazão (Q); característica do motor e tipo de energia (T_e). A função pode ser representada por: Custo (\$) = $f(Q, D, L, H_g, T_e, T)$.

2.13 Custo da Energia para Bombeamento

Os equipamentos elétricos possuem uma potência que pode ser expressa em Watts (W), horse-power (HP) ou em cavalo-vapor (cv). O consumo de energia elétrica é

igual a potência (W) vezes o tempo em horas (h), resultando em Watthora (Wh). Nas tarifas das concessionárias de energia são expressas em milhares de Wh (kWh) (MONACHESI, 2005). A potência mecânica é a grandeza física que determina a quantidade de energia concedida por uma fonte a cada unidade de tempo. A energia é dada pelo produto de uma força aplicada em um corpo para deslocá-lo a certa distância e a potência pode ser obtida pela relação entre a variação de energia em um certo tempo, como é mostrado na Eq. (2.39).

A energia consumida em um sistema de bombeamento com motor elétrico depende, portanto, da potência absorvida da rede elétrica. O rendimento do motor elétrico é definido pela relação entre a potência útil (aquele desenvolvida no eixo) e a potência ativa (Eq. (2.40)):

$$\eta_M = \frac{Pot\ (útil)}{Pot\ (ativa)} \quad (2.39)$$

Logo (Eq. (2.40)):

$$\eta_M = \frac{736.Pot\ (cv)}{\sqrt{3}.V.I.\cos\theta} \cdot 100 \quad (2.40)$$

Sendo a energia consumida durante certo período de tempo o produto entre a potência absorvida pelo tempo, esta pode ser medida como sendo através das Eq. (2.41 e 2.42) (Carvalho, 2008).

Para Circuitos monofásicos:

$$Pot_a(kW) = \frac{V \cdot I \cos\theta}{1000} \quad (2.41)$$

Para Circuitos trifásicos:

$$Pot_a(kW) = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\theta}{1000} \quad (2.42)$$

Sendo: $\cos\theta$ = fator de potência ($\cos\theta = Pot_a / Pot_{ap}$).

Segundo a ANEEL (2005) os valores das tarifas elétricas correspondem à quantidade de energia elétrica consumida no mês anterior multiplicada por um valor unitário denominado tarifa, o que resulta em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh), correspondente ao valor de um quilowatt (kW) consumido em uma hora.

A ANEEL classifica os consumidores por classes, sendo a classe rural aquela em que se enquadram as atividades de agropecuária, cooperativa de eletrificação rural, indústria rural, coletividade rural e serviço público de irrigação rural.

Para calcular o tempo necessário (T) que o conjunto levará para bombear o volume total de água consumida durante o dia, usa-se a Eq. (2.43) (Eleoterio, 2008):

$$T = V_{consumido} / Q_{bomba} \quad (2.43)$$

Sendo: $V_{consumido}$ = vazão total (l/dia); Q_{bomba} = vazão horária (l/h) = 20% x vazão total.

Determinando-se o tempo de operação da elevatória e a potência do motor, obtém-se o consumo de energia elétrica durante o dia, conforme a Eq. (2.44).

$$CE_{dia} = T \times P_{med} \quad (2.44)$$

Sendo: CE = Consumo de energia (kWh); T = tempo de operação (h); P_{MED} = Potência media do motor elétrico (kW).

Para uma previsão mensal, o valor encontrado do consumo elétrico diário foi multiplicado pelo número de dias no mês obtendo-se então o consumo de energia elétrica mensal como mostra a Eq. (2.45).

$$CE_{mês} = CE_{dias} \times T \quad (2.45)$$

Sendo: CE_{MES} = consumo de energia durante o mês (kWh); T = dias de operação.

Segundo Gomes (2004) o custo da energia de bombeamento para um intervalo de tempo, é determinado em função da potência da bomba, do numero de horas de funcionamento e do custo unitário da energia, conforme Eq. (2.46).

$$C_{energia} = P \cdot N_b \cdot p \quad (2.46)$$

Sendo: $C_{energia}$ = custo da energia, em unidades monetárias (\$), em um determinado intervalo de tempo; P = potência requerida, em kW; N_b = numero de horas de acionamento da bomba em um determinado intervalo de tempo, em horas; p = custo unitário de energia, em \$/kWh

Como a potência pode ser obtida pela Eq. (2.47).

$$P = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (2.47)$$

O custo da energia de bombeamento, para um intervalo de tempo é dado pela Eq. (2.48).

$$C_{energia} = \frac{9,81 \cdot Q \cdot H}{\eta} N_b p \quad (2.48)$$

Sobre o rendimento do conjunto motor-bomba, Gomes (2004) afirma que este deve ser estimado na fase de projeto, quando ainda não se dispõe das características dos equipamentos eletromecânicos, adotando-se um valor para o rendimento global, que será estimado em função do porte dos sistemas e dos equipamentos disponíveis no mercado. Para bombas centrífugas, adotam-se valores entre 60 e 80%. Esses rendimentos caem ao longo do tempo, o que provoca aumentos nas potências requeridas e nos custos unitários do sistema de bombeamento.

Os valores das tarifas (custo unitário de energia) são estabelecidos em conformidade com as fornecidas pelas concessionárias de energia elétrica, segundo a classificação determinada pela Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estruturadas por nível de tensão (alta, média, baixa), como também por classe de consumo (residencial, industrial, comercial, rural, serviços públicos, poderes públicos e iluminação pública).

O principal custo de operação relativo ao bombeamento refere-se a tarifação de energia elétrica. Nesta incidem impostos como PIS/CONFINS e ICMS, sendo que o ICMS corresponde a 86% da participação média nacional dos tributos na prestação de serviços públicos de energia elétrica. Para a área rural os tributos correspondem a 22,5% nas tarifas de energia elétrica (ABRADEE, 2007).

Segundo pesquisas, o Brasil possui um dos custos de energia elétrica mais caros do mundo, superando os Estados Unidos e México, sendo a tarifa média de R\$ 0,333/kWh.

A ANEEL classifica os consumidores de energia elétrica em classes e subclasses de consumo, que são:

- ✓ Residencial – na qual se enquadram, também, os consumidores residenciais de baixa renda cuja tarifa é estabelecida de acordo com critérios específicos;
- ✓ Industrial – na qual se enquadram as unidades consumidoras que desenvolvem atividade industrial, inclusive o transporte de matéria prima, insumo ou produto resultante do seu processamento;
- ✓ Comercial, Serviços e Outras Atividades – na qual se enquadram os serviços de transporte, comunicação e telecomunicação e outros afins;

- ✓ Rural – na qual se enquadram as atividades de agropecuária, cooperativa de eletrificação rural, indústria rural, coletividade rural e serviço público de irrigação rural;
- ✓ Poder Público – na qual se enquadram as atividades dos Poderes Públicos: Federal, Estadual ou Distrital e Municipal;
- ✓ Iluminação Pública – na qual se enquadra a iluminação de ruas, praças, jardins, estradas e outros logradouros de domínio público de uso comum e livre acesso, de responsabilidade de pessoa jurídica de direito público;
- ✓ Serviço Público – na qual se enquadram os serviços de água, esgoto e saneamento; e
- ✓ Consumo Próprio – que se refere ao fornecimento destinado ao consumo de energia elétrica da própria empresa de distribuição.

Essas tarifas são definidas segundo os componentes: demanda de potência e consumo de energia. A demanda de potência deve ser medida em kW, correspondendo à média da potência elétrica solicitada pelo consumidor à empresa que distribui energia (concessionária) em um intervalo de 15 minutos, sendo faturada pelo maior valor medido durante trinta dias. O consumo de energia é medido em KWh ou MWh, que refere-se ao valor acumulado no uso da potência elétrica fornecida ao consumidor em trinta dias.

Fixam-se as tarifas de demanda de potência em R\$/KW e as tarifas de consumo em R\$/KWh (ou R\$/MWh). Os consumidores que pagam tarifas de demanda de potência são aqueles que se encontram na estrutura tarifária e na modalidade de fornecimento onde o consumidor se enquadra. A estrutura tarifária refere-se ao conjunto de tarifas usadas nos componentes de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, segundo as modalidades de fornecimento, sendo as tarifas de energia estruturadas em dois grandes grupos de consumidores: A e B.

As do grupo A são para os consumidores atendidos por redes de alta tensão, variando de 2,3 a 230 kV, recebendo denominação com letras e algarismos indicados na tensão de fornecimento: A1; A2; A3; A4 e AS. Essas tarifas são construídas em três modalidades de fornecimento: convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde, onde a convenção por cores facilita a referência. A convencional caracteriza-se pela aplicação de consumo de energia e/ou demanda de potência que não depende das horas de utilização do dia e períodos do ano.

A tarifa horosazonal é dada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia e de demanda de potência, conforme as horas de utilização do dia e de períodos de ano, sendo que essa tarifa racionaliza o consumo de energia elétrica ao longo do dia e do ano, o que motiva o consumidor, pelo valor diferenciado das tarifas, a consumir mais energia em horário onde for mais barata.

A tarifa horosazonal verde é estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, conforme as horas de utilização do dia e dos períodos do ano, com uma única tarifa de potência, se aplicando as unidades consumidoras atendidas pelo sistema elétrico interligado com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada igual ou superior a 300 KW. Caso as unidades consumidoras atendidas pelo sistema elétrico com tensão de fornecimento inferior a 69 KV e demanda contratada inferior a 300 KW podem optar pela tarifa horosazonal nessas modalidades.

Para as unidades com tensão inferior a 2,3 KV aplicam-se as tarifas do grupo “B”, estabelecidos em classes de consumo: B1; B2; B3 e B4, sendo que as atividades rurais como irrigação se enquadram na classe B2. As tarifas desse grupo somente são estabelecidas para os componentes de consumo de energia em R\$/MWh.

Para motores de combustão interna, como o diesel, Carvalho (2008) chama a atenção sobre a determinação do motor a ser usado que depende da potência demandada. No caso de bombas a potência exigida no seu eixo deve ser a referência para a escolha do motor, prevendo-se uma folga de $\pm 25\%$. Na previsão do gasto com óleo, utiliza-se o gráfico de desempenho de cada motor para cada rotação. O consumo varia segundo essas variáveis. A Eq. (2.49) define o consumo específico de óleo diesel em função da potência do motor.

$$Ce = \left(0,03054 + \frac{0,2445}{Pot} \right)^{0,5} \quad (2.49)$$

Sendo: Ce = consumo específico de óleo diesel ($L \cdot cv^{-1} \cdot h^{-1}$); Pot = potência do motor na rotação demelhor desempenho (cv).

O custo final com combustível para bombeamento é dado pela Eq. (2.50).

$$Custo\ final\ (R\$) = Pot.\ Ce.\ P \quad (2.50)$$

Sendo: P = preço do óleo diesel ($R\$.L^{-1}$)

2.14 Custos Relacionados ao Bombeamento

Os custos relacionados aos sistemas elevatórios possuem várias influências, sendo que a maioria refere-se às condições locais encontradas. Analisando-se um caso específico, esses atributos tornam-se constantes, sendo os principais: desnível da tubulação (da captação a distribuição); comprimento do tubo e vazão demandada no caso de motor à eletricidade. Não são considerados os custos de linhas elétricas de alta tensão, prevendo-se que este deve advir da concessionária local de abastecimento de energia elétrica.

De uma forma geral, os custos associados à implantação de uma bomba para irrigação são: valor da bomba; instalações elétricas; mão-de-obra e preparação do local de instalação. Os custos relacionados a operação da bomba são: mão de obra; energia; operação e manutenção.

Estes custos são necessários para garantir a permanente utilização dos equipamentos e a confiabilidade de abastecimento. A energia elétrica, conforme explica Mesquita *et al* (2006), possui alto consumo pela bomba e dificulta a manutenção do equilíbrio financeiro, sendo menor apenas que as despesas com mão de obra. Para Tsutiva (2004) (*In: MESQUITA et al, 2006*), o consumo de energia elétrica em sistemas de abastecimento de água é da ordem de 0,6 kWh/m³ produzida.

Para compor custos de bombeamento devem ser modelados os elementos que compõem a rede de forma que contemple a variação de custo de um componente em função de sua dimensão. Santana (1999) chama a atenção para as dificuldades que existem de modelamento nos custos de manutenção devido às ordens de grandeza, sendo comum considerar somente os custos de energia, respeitando seus valores presentes.

Os custos com tubulação envolvem parâmetros ligados aos custos de aquisição e instalações das tubulações nas regiões onde deverão ser utilizados, sendo função do diâmetro interno da tubulação e de seu comprimento, tendo uma variação não linear em relação ao seu diâmetro, possibilitando um custo por unidade de comprimento, variando linearmente, nesse caso, em relação ao comprimento da tubulação. Pode ser representado pela Eq. (2.51).

$$CT = \sum_{j=1}^{NT} f(D_j, L_j) \quad (2.51)$$

Os custos totais do sistema devem se obtidos somando-se os custos de investimentos com os de operação. Devido esses gastos incidirem em tempos diferentes, é necessário a conversão dos gastos variáveis em gastos fixos, ou vice-versa. Logo, os gastos fixos devem ser convertidos em amortizações anuais ou converter as despesas anuais de exploração em valores fixos atualizados, podendo-se, assim, comparar as alternativas de projeto para se encontrar aquela que representa menor custo (investimento mais operação) (Gomes, 2004).

Para isso, isto é, converter custo fixo em amortizações anuais do capital, multiplica-se o valor presente “P” pelo fator de amortização (ou fator de recuperação de capital), dado pela Eq. (2.52).

$$a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2.52)$$

Sendo:
 a = fator de amortização anual do capital;
 i = taxa de juro anual, em decimal;
 n = número de anos relativo à vida útil das instalações ou ao alcance do projeto.

No modelo de Zoller (1998) o CAT é obtido conforme a Eq. (2.53).

$$CAT = CF + CV \quad (2.53)$$

Sendo (Eq. (2.54)):

$$CF = AMA + REA, \text{ e } CV = CABO + CAM \quad (2.54)$$

Logo (Eq. (2.55)):

$$CAT = AMA + REA + CABO + CAMR \quad (2.55)$$

Onde: CAT = custo anual total; CF = custo fixo; CV = custo variável; AMA = amortização anual; REA = remuneração anual do capital investido; CABO = custo anual com bombeamento; CAMR = custo anual com manutenção e reparos.

A variação de consumo de energia depende: do desnível existente entre a fonte de água e o destino final, do diâmetro, material e comprimento da tubulação e com o tempo de funcionamento. Com menores diâmetros, têm-se investimentos iniciais menores, porém, com o aumento de perda de carga e maiores alturas monométricas (em consequência), aumenta-se o consumo de energia elétrica. Os maiores diâmetros exigem um investimento maior, porém, haverá menor gasto operacional com menor consumo de energia. A solução final deve proporcionar um sistema hidráulicamente correto com menores custos totais.

Para ficar mais visível, a Fig. (2.21) mostra o comportamento dos custos de investimento, operacional e total com o diâmetro da tubulação de recalque.

Na opinião de Carvalho (2008) na determinação do diâmetro econômico, para custos totais mínimos, inclui-se o consumo de energia e os custos do capital investido, considerando a amortização e a taxa de juros. O autor aponta os seguintes componentes relacionados aos investimentos iniciais:

- Edificação da casa de bombas;
- Aquisição e instalação dos equipamentos hidráulicos, elétricos e mecânicos;
- Implantação de tubulações de recalque, incluindo locação, escavação, ancoragem, assentamento e abertura de valas; e,
- Aquisição de tubos.

Com isso, complementa o autor que no dimensionamento econômico da tubulação de recalque deve-se analisar o custo total do sistema, com valores diferentes de diâmetro, como pode ser exposto em seguida.

Alzamora e Tárrega (1987), citado por Freire (2000) relacionam os custos de operação e implantação. Conforme os autores, quando se aumentam os custos de operação, reduzem-se os custos de implantação e vice-versa, sendo, portanto, antagônicos. Escolhendo-se um diâmetro menor para a adutora, tem-se um custo menor de implantação, porém, um custo maior de operação, pelo aumento de energia provocado principalmente pelo aumento de velocidade e perda de carga. Optando-se por um diâmetro maior, aumentam-se os custos de implantação e reduzem-se os custos de operação, pela redução de perda de carga.

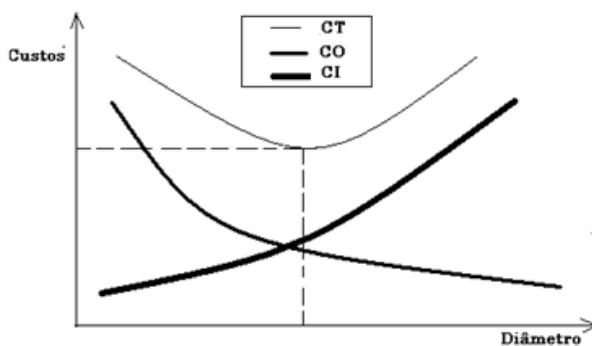


Figura 2.21: Variação dos custos de investimento, operacional e total de um sistema de bombeamento em função do diâmetro do tubo de recalque. Adaptado de Carvalho, 2008.

*CT = Custo Total; CO = Custos de Operação (Variáveis); CI = Custos de Implantação (Fixos).

Na obtenção do diâmetro econômico, deve-se achar o mínimo da função custo. Para cada valor de vazão existirá um diâmetro econômico, sendo que seu valor depende do tipo de material do tubo e da relação entre custos anuais com a operação de sistema de bombeamento e do conduto.

A expressão de Bresse, por ser muito simples na solução de um problema complexo e com muitas variáveis econômicas, deve ser aplicada apenas em pequenas instalações com diâmetro máximo de 150 mm, em funcionamento 24 horas por dia ininterruptamente. Para instalações maiores, o diâmetro obtido deve ser uma primeira aproximação do diâmetro ótimo, onde uma análise econômica selecionará alguns diâmetros comerciais acima e abaixo do valor calculado (Carvalho, 2008).

CAPÍTULO III

Metodologia

3.1 Natureza e Tipo de Pesquisa.

A pesquisa seguiu uma natureza exploratória, com a caracterização inicial do problema, classificação e definição. Quanto à área da ciência, conforme Rodrigues (2007) segue na linha teórica, sendo aplicada a uma área de conhecimento onde pretende-se investigar hipóteses sugeridas pelos modelos teóricos. A modalidade da pesquisa, além de teórica, enquadra-se como experimental, pois cria condições para interferir no aparecimento ou na modificação dos fatos para explicar o que ocorre em fenômenos correlacionados. Quanto à forma de abordagem é quantitativa, pois traduz em números opiniões e informações serem classificadas e analisadas.

3.2 Localização, Período da Pesquisa, População e Amostra.

Para essa aplicação foram utilizadas as tarifas: convencional (com e sem desconto) e horosazonal verde (com e sem desconto), nos períodos: seco e úmido, de ponta e fora de ponta. Estas são as comumente utilizadas para sistemas de irrigação.

Foi escolhida, para efeitos experimentais, a região Sudoeste do Maranhão, definindo duas áreas distintas localizadas próximas ao Município de Imperatriz – MA,

uma com cinco hectares e outra com vinte hectares. Essas áreas são de agricultores familiares, característicos da região, tomando, como base para a determinação das vazões unitárias as culturas frutíferas da goiaba, do capim Tanzânia e da banana, que têm necessidades de baixas, médias e altas vazões respectivamente.

A cidade de Imperatriz está situada na coordenada geográfica 05°31'33" S e 47°28'33" O, ficando próximo ao Estado do Tocantins, tendo como divisa o rio Tocantins, estando a aproximadamente 630 km da capital São Luis. Seus solos são relativamente férteis e não existem problemas de secas prolongadas.

A região tomada como estudo de caso situa-se em um raio de aproximadamente 70 km em relação ao centro desta cidade, que possui segundo o IBGE (2008) os seguintes municípios em seu entorno: ao Norte: Açaílândia, Cidelândia e São Francisco do Brejão; ao Sul: Governador Edson Lobão; Ao Leste: João Lisboa, Senador La Rocque e Davinópolis; a Oeste: São Miguel do Tocantins, praia Norte, Augustinópolis e Sampaio (Tocantins).

O sistema de irrigação foi definido como aquele que possui baixa vazão. O período de análise e coleta de informações está situado nos anos de 2012 e 2013 em períodos secos e períodos úmidos. O período seco é aquele onde há deficiência de chuva no decorrer do ano. O período úmido corresponde a um período do ano em que historicamente há abundância de chuvas. Esses períodos do ano são definidos pela ANEEL em acordo com as concessionárias locais de energia elétrica. Essa divisão é a base para a diferenciação de valores tarifas, onde o valor cobrado no período seco é maior que o cobrado no período úmido, devido a abundância de chuva nesse último período, o que favorece a captação nas hidrelétricas, possibilitando, assim, uma tarifa menor.

Com as duas regiões escolhidas, simularam-se seis cenários com modificações nas fontes de água, vazão unitária, tipo de cultura e áreas irrigadas. Como são quatro tipos de energia em cada situação, foram realizadas 24 simulações gerando seis quadros comparativos, informando os resultados seguintes: diâmetro; potência de bomba e motor; custos (fixos, variáveis e totais) e tipos de bombas escolhidas. Foram feitas, além destas, mais duas simulações, sendo uma considerando uma condição para uma área de um hectare e outra se mantendo iguais tarifas de consumo.

3.3 Variáveis de Estudo

As variáveis de estudo estão divididas em variáveis de entrada e de saída. As de entrada são: área; tipo de cultura; vazão unitária (consumo por cultura); comprimento das tubulações (sucção e recalque); alturas geométricas (sucção e recalque); natureza do tubo e respectiva rugosidade; fonte de água disponível; fonte de energia; tempo de funcionamento da bomba; radiação; tarifas de energia elétrica; tempos de operação do sistema (horas, dias e meses); radiação; preço e consumo de diesel; dados econômicos (desconto; taxa, valor residual); período de amortização; sol pleno; autonomia de banco de baterias; potência de um painel; capacidade de bateria e diferença de potencial.

As variáveis de saída são as seguintes: diâmetros; vazão total; potência da bomba e motor; altura manométrica; custos variáveis, fixos e totais; gráficos comparativos de análise econômicae conclusões envolvendo essas variáveis. Algumas dessas variáveis já foram inseridas no programa, possibilitando-se assim somente sua escolha dentre algumas propostas. Para a fonte de água, foram definidos: rio (e similares); poço e açude (e similares). Para os cenários foram selecionadas rio e poço. As fontes de energia são: elétrica convencional; elétrica horosazonal; combustão e solar. As bombas podem ser: centrífuga radial e axial, de eixo horizontal ou vertical.

3.4 Métodos, Instrumentos e Técnicas de Coleta de Dados

Basicamente todas as informações que abastecem o *software* são baseadas no método científico indutivo, que, conforme Rodrigues (2007), é um processo mental, que, partindo de dados particulares constatados, infere-se uma verdade geral e universal não contidas nas partes examinadas, como é descrito na Fig. 3.1.

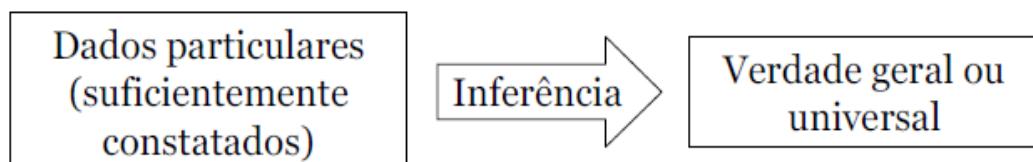


Fig. 3.1: Processo científico indutivo (Rodrigues, 2007).

3.5 Tipo, Fonte e Processamento de Informação

As informações foram processadas no *software* denominado *Irrigare 1.0* usando o código *Matlab*. Este *software* possui telas de entrada que recebem as informações e as processam, resultando em: dimensionamento das instalações; custos e gráficos.

3.6 Pré-teste e Técnicas de Análise e Sistemas Utilizados

Nas regiões definidas, conforme a fonte de água e de energia disponível foram simuladas algumas situações. Os dados de campo foram fictícios e se adéquam as necessidades que se destinam: irrigação por gotejamento em demandas pequenas e médias. A seguir na Fig. 3.2 o fluxo operacional utilizado visando-se atingir os objetivos propostos.

3.7 Materiais

O *software* desenvolvido denominado *Irrigare 1.0* possibilita analisar as informações baseados em equações constitutivas referentes aos custos anuais totais (CAT), custos anuais variáveis (CAV) e custos anuais fixos (CAF) dos sistemas elétrico convencional, elétrico horosazonal, combustão e solar, e, utilizando-se de um banco de dados possibilita obter como resultado principal o tipo de bomba e fonte de energia possível de ser usada com os custos respectivos minimizados.

O fluxograma operacional do *software Irrigare 1.0* é descrito na Fig. 3.3.

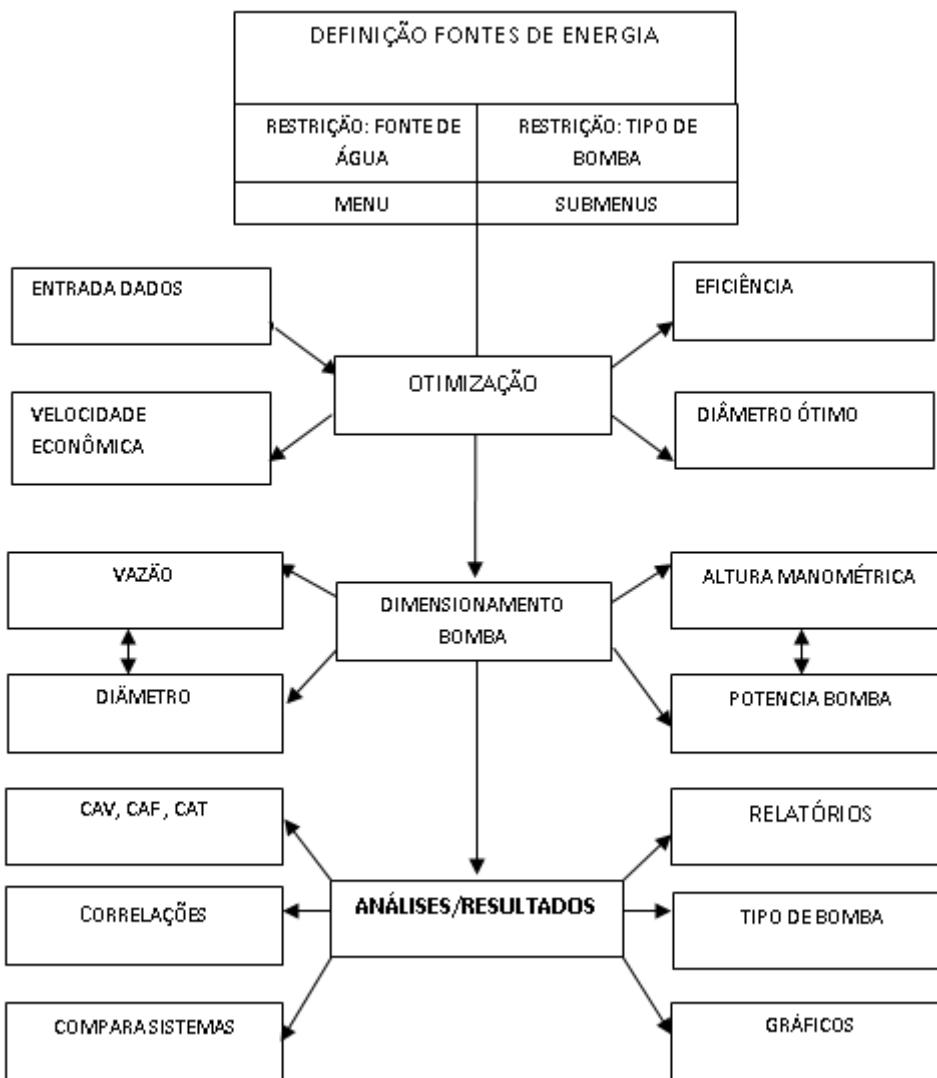
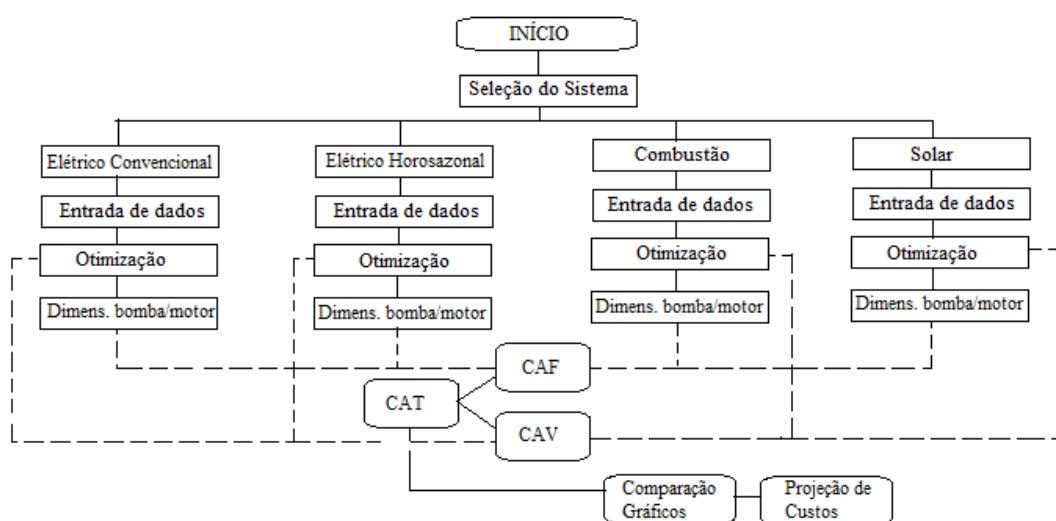
Fig. 3.2 Fluxograma do software *Irrigare 1.0*.

Figura3.3: Fluxograma do software ampliado.

3.8 Métodos

Os custos de sistemas de bombeamento envolvem os valores gastos com energia, mão de obra e manutenção, são denominados custos variáveis. Os custos de investimentos para aquisição de equipamentos, instalações e tubulações são denominados custos fixos e serão amortizados. Todos esses custos foram considerados e sua composição e preços estão em um banco de dados do programa, podendo ser modificados quando houver variação dos custos unitários e composição.

O software proposto otimiza a função CAT de cada sistema, definido como a soma do CAV e o CAF, obtendo o diâmetro ótimo segundo o critério de custo total mínimo. A função CAV leva em consideração os custos variáveis de cada sistema, a saber: custo anual de bombeamento (CABO) e custo anual de manutenção e reparos (CAMR). A função CAF considera os custos relacionados a amortização anual (AMA) e remuneração anual (REA). Nestes estão incluídos os preços de tubos, bombas, acessórios em geral, etc. No CABO estão incluídos o faturamento anual de demanda, o faturamento anual de consumo e o ajuste referente ao fator de potência. No sistema convencional não foi levada em consideração o fator de potência. O custo anual de manutenção e reparos é considerado como sendo 2% do investimento anual.

As perdas de carga consideradas foram apenas na tubulação de recalque, pois, considerando que as perdas localizadas e a extensão de canalização nas instalações de recalque em relação à linha de sucção são demasiadamente grandes nas linhas de irrigação. Nesse caso, maior perda de carga decorre da perda de carga ao longo da canalização, tendo o fator de atrito uma enorme contribuição, pois é função do diâmetro, variando conforme a redução ou aumento deste.

Para energia solar considerou-se para o CAV somente o custo anual de manutenção e reparos, sendo este como sendo 2% do CAF. Nesse sistema para o CAF considerou-se o custo relativo às placas solares, baterias e acessórios.

Uma vez realizada a otimização e por meio das telas subsequentes, em que são calculadas as principais variáveis de saída: tipo de bomba, diâmetro, potência de bomba e motor, velocidade, custos, etc., o software possibilita a comparação e definição do melhor sistema, isto é mais econômico, em que como resultado deve propor: o tipo de bomba e fonte de energia possível de ser usada com os custos respectivos minimizados.

A minimização consiste em uma proposição de custos em uma situação ideal (ótima) onde são definidas as principais variáveis de saída que forneçam resultados de custos mínimos possíveis pelo uso desses equipamentos. A análise prática do sistema proposto foi definida a partir de estudos de casos na região Sudoeste do Maranhão, nas proximidades da cidade Imperatriz, observando as condições físicas locais, em que para cada um dos casos foram analisadas as fontes de energia descritas e fontes de água.

A composição do *software* pode ser descrita conforme as etapas a seguir. Já o procedimento das informações relacionadas ao processo de escolha da bomba está ilustrado no fluxograma da Fig.3.4.

- Etapa 1: Início
- Etapa 2: Seleção do sistema
- Etapa 3: Entrada de dados
- Etapa 4: Saída de dados: otimização; dimensionamento motobomba; custos.
- Etapa 5: Resultados: custos; comparação dos sistemas
- Etapa 6: Resultados: projeção de custos

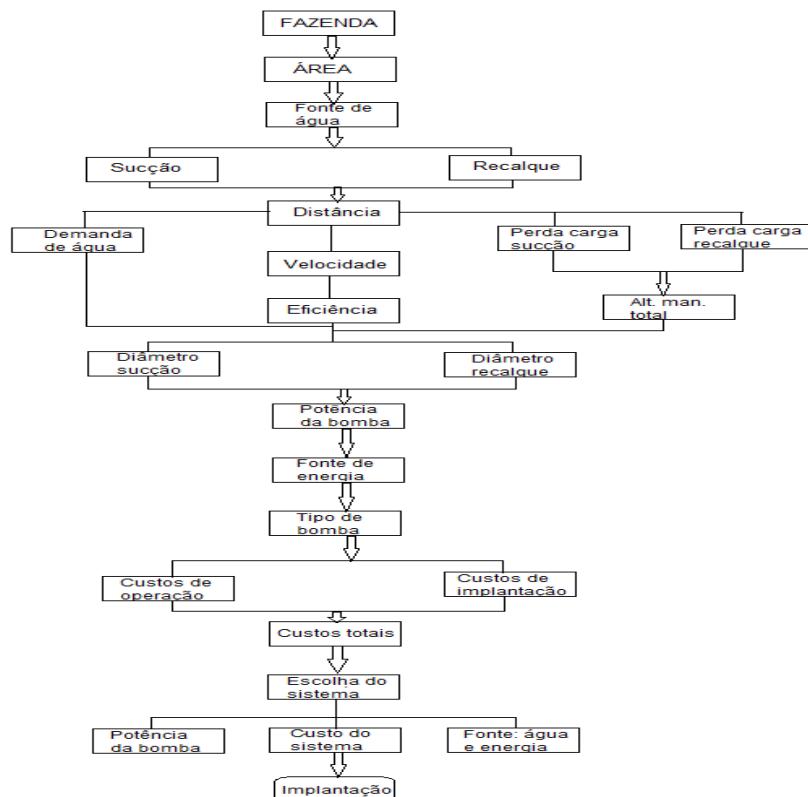


Figura 3.4: Fluxograma geral do processo de escolha da bomba.

CAPÍTULO IV

Análise Técnica e Econômica

Os valores de vazão mínimos e máximos devem ser definidos para cada fonte de energia. Estas vazões são pressupostos básicos do dimensionamento, que se inicia conhecendo as vazões unitárias da cultura a ser irrigada, a área de irrigação, as alturas de elevação e distância de bombeamento da cultura ou ao reservatório elevado. Neste caso específico, considerou-se somente à distância ao reservatório.

Deve-se também definir quais fontes de energia usar para determinados casos com base nas vazões mínimas encontradas segundo as variáveis descritas acima e as máximas conforme a fonte energética operar. Assim, determinada fonte de energia pode ser dispensada por não ser capaz de recalcar o mínimo estabelecido (dimensionado) ou ser impossibilitada segundo uma vazão máxima que não atinge.

4.1 Análise Técnica de Bombeamento com Energia Elétrica

De todas as fontes de energia a que parece ser a que mais provoca discussão, pelas tarifas cobradas e pela intensidade de uso é a energia elétrica. Os custos decorrentes de sua utilização refletem em um aumento de custos globais, já que possuem impactos significativos nos custos variáveis. Os motores das bombas utilizadas possuem capacidade de consumo de energia elevado. Nessas condições, *a priori*, o uso de energia elétrica para bombeamento tornar-se-ia inviável. No entanto, a ANEEL

disponibiliza faixas diferenciadas de consumo e demanda para os consumidores que usam essa fonte energética para recalque de sistemas de irrigação. Nessas condições, há duas faixas que oferecem condições benéficas favoráveis, sendo: i) horário especial para irrigantes, e, ii) horário fora de ponta. O horário de ponta, que corresponde a algumas horas do dia de maior consumo (definido por cada concessionária) deve ser evitado sempre.

Sendo a energia o insumo fundamental para assegurar o suprimento contínuo de um sistema de irrigação, mantendo os níveis de produção adequados, sua racionalização deve possibilitar redução acentuada de custos que podem ser obtidos com procedimentos técnicos e de hábitos, que impactam também o meio ambiente.

Procedimentos e rotinas operacionais podem ser usados para a redução do consumo. Nesse aspecto, o *software* desenvolvido nesse trabalho possibilita uma análise de variação dos custos, se for modificado o diâmetro, natureza do material (rugosidade), tarifas, taxas, velocidade de escoamento, etc. Nesse tipo de fonte energética é mais viável o aumento de custos de investimentos para possibilitar redução de custos operacionais.

Os custos variáveis envolvidos em sistemas de bombeamento utilizando energia elétrica são os que influem no dispêndio com energia, manutenção e reparos. Estes são influenciados pelos comportamentos hidráulicos (diâmetros de canalizações e potências de bomba e motor) e características físicas do sistema (altura, comprimento de linha de recalque). O custo de investimento com a bomba, motor e demais componentes compõem os custos fixos, que, como observado, influenciam os custos variáveis.

Com a implantação da estrutura tarifária da ANEEL a partir do ano 2000, permitiu-se a flexibilidade nas tarifas, possibilitando adequação do uso de equipamentos, o que significa melhoria na eficiência energética. Com isso, pode-se ajustar o funcionamento do sistema de irrigação para os horários mais econômicos, o que reduz os custos com energia elétrica.

Portanto, para esse tipo de energia têm-se dois tipos de possibilidades de ações: uma relacionada aos investimentos, caracterização física e hidráulica dos componentes, que influenciam custos fixos e redução de custos variáveis relacionados ao uso de equipamentos segundo estrutura tarifária que possibilite economia de energia e redução de custos totais.

4.2 Análise Técnica de Bombeamento com Energia à Combustão

Não havendo energia elétrica disponível, ou quando seu uso pode ser muito oneroso devido a distância de captação, é mais comum o uso de energia à combustão nas comunidades isoladas. O combustível mais usado é o diesel, classificado como energia não renovável e de impacto significativo no meio ambiente.

Conforme Machado Júnior (2005) “combustão é a reação (que provoca uma reação química) em que átomos de um material (combustível) se combinam quimicamente com átomos de oxigênio (comburente) do ar, ou seja, é a queima de material. Essa reação é exotérmica, isto é, há liberação de energia, principalmente na forma de luz e calor. Essa energia liberada pode ser aproveitada para aquecimento, cozimento, produção de energia elétrica, movimentação de meios de locomoção, etc. Os combustíveis, materiais que são passíveis de serem queimados, podem ser, dentre outros, os vegetais ou fósseis”.

Como vantagens do motor a diesel podem ser apontadas: sua mecânica e reparação são relativamente simples; possui manutenção limitada; é um motor muito resistente; no curto e médio prazo é a solução mais econômica para o bombeio de água em regiões sem eletricidade e para redução do impacto ambiental. Como desvantagens podem ser apontadas: tem um custo maior em relação ao bombeamento elétrico; é um sistema poluidor pela vazão carburante, pelas emissões de gás estufa e pelo ruído, podendo ser reduzido pelo uso de biodiesel; influencia na rentabilidade da irrigação. Os custos ambientais não estão sendo discutidos nessa tese.

No aspecto econômico, em um período de 10 anos o custo da bomba a diesel chega a ser de seis a sete vezes mais oneroso devido o combustível necessário para o sistema. Em regiões com alta rentabilidade esse custo pode ser facilmente absorvido. Em um sistema de irrigação por gotejamento, com um melhor aproveitamento de água, pode ser pago em período inferior a três anos. A Fig. 4.1 mostra a evolução de valores em diferentes tamanhos de áreas irrigadas, comparando o investimento inicial e os custos totais em 3, 5 e 10 anos.

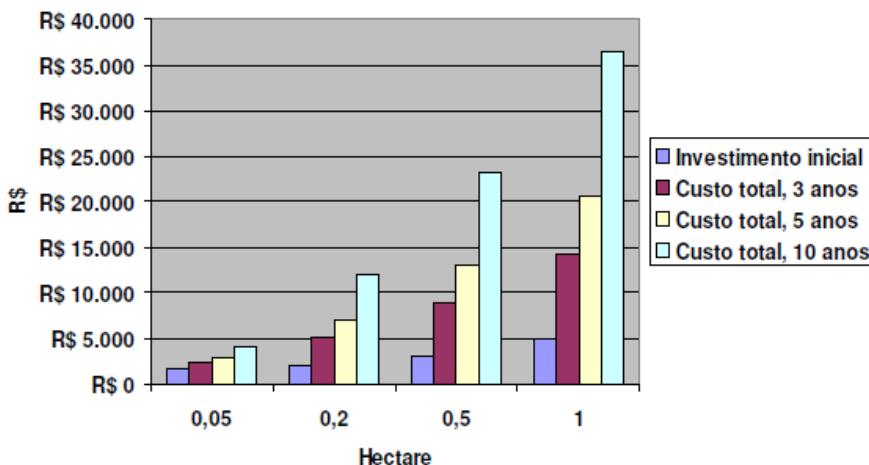


Figura 4.1: Custo atual do bombeamento diesel depois de 3, 5 e 10 anos para áreas irrigadas de tamanhos diferentes (500 m², 2.000 m², 5.000 m² e 10.000 m²). www.adaptasertao.net, 2011.

4.3 Análise Técnica de Bombeamento com Energia Solar

São apresentadas as Fig. 4.2 a 4.4 onde a fonte solar atinge valores de vazões estabelecidos conforme a radiação solar encontrada, em uma aproximação com o valor real obtido. Podem ser percebidos valores de vazão conforme radiação solar alturas de elevação, permitindo, com isso, ser apresentadas tabelas relacionando vazão e radiação, onde, segundo a vazão necessária, determina-se uma radiação ou vice-versa. Também pode se definir, fixando-se uma altura de elevação, o numero de painéis que seriam necessários de acordo com uma potência estabelecida por placa solar.

Com essas informações foram confeccionados gráficos que possibilitam uma análise mais interessante sobre essas relações.

A Figura 4.5 mostra a insolação na região de Imperatriz – MA, de acordo com as informações fornecidas pelo CRESESB (2005), durante o ano. Nesta, percebe-se uma concentração maior das horas de insolação entre os meses de abril a outubro, com incidência maior ainda nos meses de junho, julho e agosto,

Estabelecendo a potência das placas, a vazão diária e a altura de elevação, os fabricantes possuem modelos que se adéquam a pequenas vazões com custo de investimento definido, como pode ser visto na Fig. 4.6.

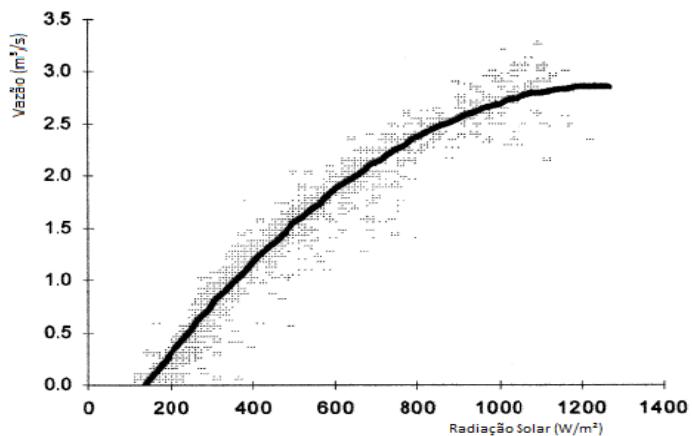


Figura 4.2: Curva Característica de bomba fotovoltaica. Fraidenraich, 1999.

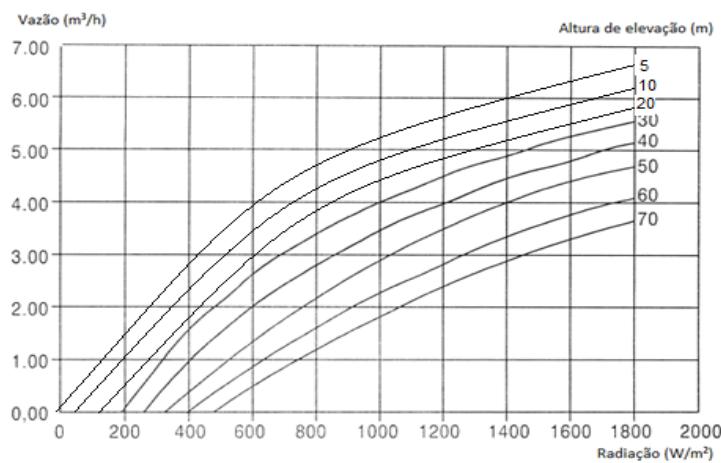


Figura 4.3: Curva característica de bomba solar (de 5 a 70 m de elevação). Adaptado de Nakin Lorentz PS600 CS-17-1 Solar.

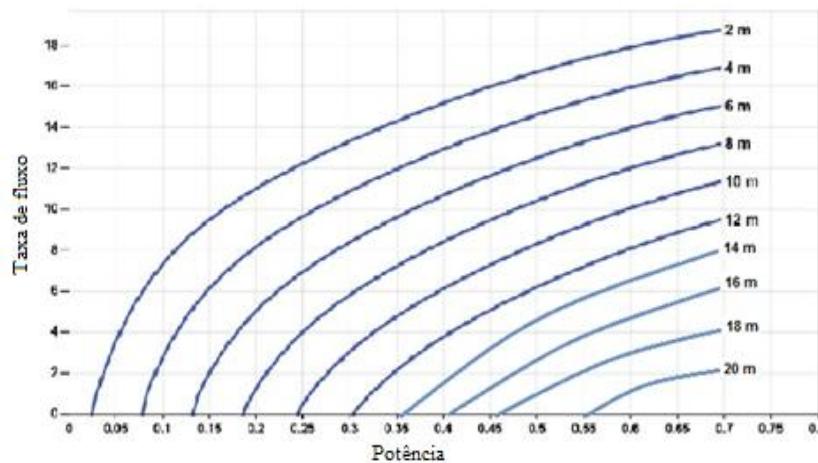


Figura 4.4: Curva característica de bomba solar (de 2 a 20 m de elevação). Adaptado de Nakin Lorentz PS600 CS-17-1 Solar.

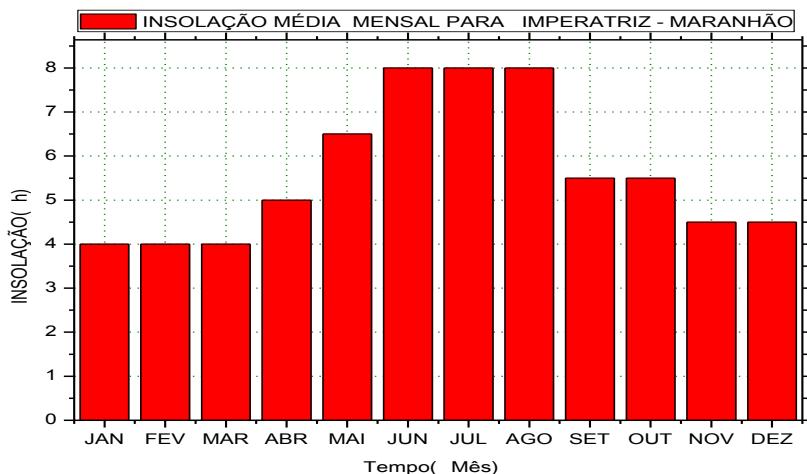


Figura 4.5: Horas de insolação no decorrer do ano - Imperatriz - MA. CRESESB, 2005.

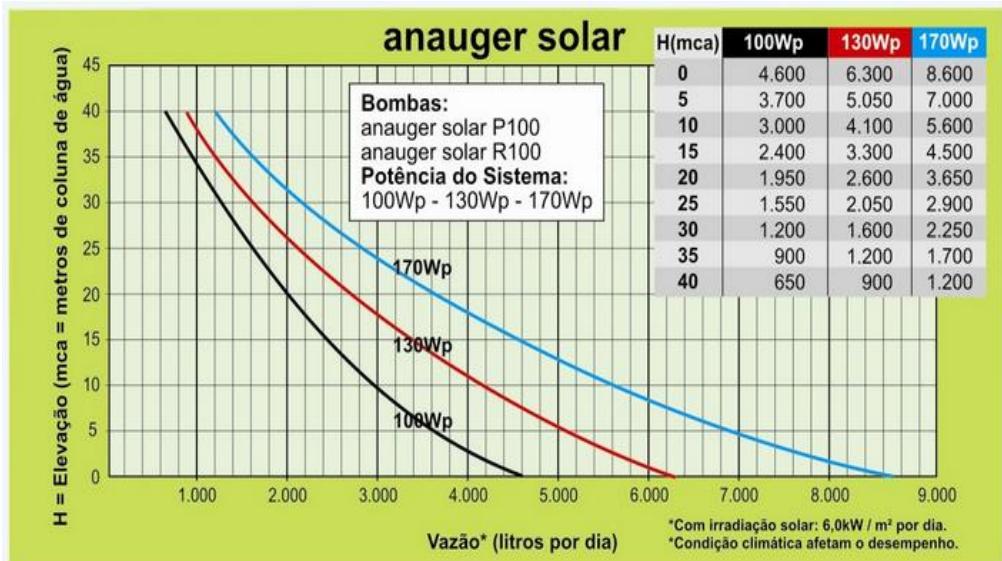


Figura 4.6: Curva: vazão x Hman = potência energia solar.

As Tabelas 4.1 a 4.4 descrevem, com base na radiação solar e nas alturas de elevação, os resultados de vazão e altura de elevação da água. Essa é uma forma prática de obtenção de resultados. A potência de pico de uma placa solar, nesse caso, fornece em média 60 W e 130 W de energia, podendo ser obtida uma média de 80 W/m². Logo, segundo determinada vazão e faixa de potência encontrada, pode-se selecionar a bomba mais adequada. Considerando-se, por exemplo, que uma cultura consuma em média 5 l/m²/dia e, definindo-se uma área de 1.000 m², tendo-se uma radiação incidente durante 5 horas (para potência de pico) nessa área seria necessário 5.000 l/dia (vazão diária).

Então, com uma vazão de 1 m³/hora (1.000 l/hora) e a radiação de 400 W/m² seria suficiente para atender essa demanda. Considerando que a demanda de pico de uma placa solar fornece 60 W de potência, seriam necessárias 7 placas solares que resultaria em 420 W, valor superior a demanda requerida (folga).

A Tabela 4.5 define parâmetros para energia solar mantendo-se uma altura constante e variando a vazão e radiação solar. Nesse caso, para as potências de 60 W e 130 W obtém-se uma quantidade determinada de placas solares.

Na irrigação por gotejamento, existe uma eficiência de 90%. Considerando, nesse caso, uma perda de 10% da água requerida para consumo, deve-se acrescentar esses 10% na vazão total da área a ser irrigada, mas isso somente para esse caso específico, podendo variar conforme a perda. Com isso, tem-se uma certeza de que a cultura estará recebendo a quantidade de água necessária para uma boa produtividade.

Tabela 4.1: Parâmetros de energia solar para h = 40 m (altura de elevação).

VAZÃO (m³/h)	RADIAÇÃO (W/m²)	Potência de placas solares e quantidade	
		P_P = 60 W	P_P = 130 W
0,5	250	5	2
1,0	400	7	4
1,5	500	9	4
2,0	600	11	5
2,5	700	12	6
3,0	850	15	7
3,5	1000	17	8
4,0	1200	20	10
4,5	1400	24	11

Tabela 4.2: Definição de parâmetros de energia solar para $h = 30\text{ m}$ (altura de elevação).

VAZÃO (m³/h)	RADIAÇÃO (W/m²)	Potência de placas solares e quantidade	
		P_P = 60 W	P_P = 130 W
0,5	250	5	2
1,0	300	5	3
1,5	400	7	4
2,0	450	8	4
2,5	580	10	5
3,0	640	11	5
3,5	800	14	7
4,0	1000	17	8
4,5	1200	20	10

Tabela 4.3: Definição de parâmetros de energia solar para $h = 10\text{ m}$ (altura de elevação).

VAZÃO (m³/h)	RADIAÇÃO (W/m²)	Potência de placas solares e quantidade	
		P_P = 60 W	P_P = 130 W
0,5	100	2	1
1,0	200	4	2
1,5	280	5	3
2,0	350	6	3
2,5	450	8	4
3,0	520	9	5
3,5	600	10	5
4,0	720	12	6
4,5	900	15	7

Tabela 4.4: Definição de parâmetros de energia solar para $h = 5$ m (altura de elevação).

VAZÃO (m ³ /h)	RADIAÇÃO (W/m ²)	Potência de placas solares e quantidade	
		P _P = 60 W	P _P = 130 W
0,5	60	1	1
1,0	120	2	1
1,5	200	4	2
2,0	280	5	3
2,5	380	7	3
3,0	420	7	4
3,5	500	9	4
4,0	600	10	5
4,5	750	13	6

Tabela 4.5: Definição de parâmetros de energia solar.

VAZÃO (m ³ /h)	RADIAÇÃO (W/m ²)	Altura de elevação (m)	Potência de placas solares e quantidade	
			P _P = 60 W	P _P = 130 W
0,5	250	40	5	2
1,0	400	40	7	4
1,5	500	40	9	4
2,0	600	40	11	5
2,5	700	40	12	6
3,0	850	40	15	7
3,5	1000	40	17	8
4,0	1200	40	21	10
4,5	1400	40	24	11

4.4 Escolha da Bomba Segundo Condições de Campo

Na definição do tipo de bomba deve ser verificada sua disponibilidade para atender determinadas demandas. No caso de uso de bomba de energia potencial, suas vazões são limitadas, o que pode limitar o alcance do projeto especificado. Com isso, as bombas potenciais (carneiro hidráulico e roda d'água) foram descartadas para esse estudo específico.

Abaixo, são definidas possibilidades de escolhas de bombas, onde alguns dados foram inseridos no *software Matlab Irrigare 1.0*, confeccionado para esse fim.

Denominando:

- 1) Tipo de Solo: Argiloso; Pedregoso; Arenoso; etc.
- 2) Tipo de cultura: Legumes; Frutos; Arbóreos; etc.
- 3) Tipo de irrigação: Gotejamento;
- 4) Tipos de bombas: Centrífuga radial de eixo horizontal (a); Centrífuga radial de eixo vertical (b); Axial.
- 5) Fontes de energia: Elétrica (x); Solar (y); combustão (z);
- 6) Fontes de água: Rio / Riacho (m); Açude / barragem / lago (n); Poço comum / Poço artesiano (p).

Têm-se as situaçõesna Fig. 6.7, tendo que atender as restrições relacionadas: alturas de elevação; vazão; potência e área irrigada.

Existindo um manancial na região (rio, açude, represa) que atenda à demanda da área irrigada, este pode ser selecionado para suprir essa demanda. Porém, pode ser que um poço ofereça condições técnicas viáveis e condições econômicas que possibilitem seu uso com um custo menor. O programa será usado para essa análise, pois condições de campo podem inviabilizar economicamente o uso da água do rio ou açude, como uma distancia significativa a fonte de consumo (área irrigada ou reservatório) com o uso de canalizações que alteram os custos fixos e aumento do consumo de energia pela potência da bomba e perdas de carga na canalização que oneram o custo variável de consumo de energia elétrica.

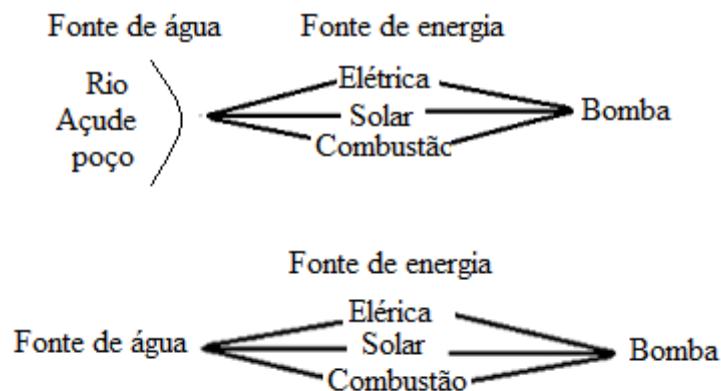


Figura 4.7: Restrições no uso de bombas.

Confronta-se também a possibilidade de uso de diferentes fontes de energia, quando, por exemplo, no uso de energia solar, eliminam-se os custos variáveis de consumo de energia, porém, com a distância de recalque ainda elevada, mantém-se os custos fixos de canalizações e acessórios quando se compararam as fontes de água através de poços e mananciais existentes.

Para a definição da bomba a escolha será feita conforme a fonte de água e fonte de energia. No caso do poço, recomenda-se sempre o uso de bombas submersas (BCEV) devido a elevada altura de succão que existiria caso fossem usadas bombas externas ao poço (BCEH).

Pensando em possíveis fontes potenciais de energia, como o carneiro hidráulico e roda d’água, estas podem ser selecionadas, porém com a limitação de vazão (atende pequenas vazões) em grandes alturas manométricas. O mesmo acontece com as bombas que funcionam através de acionamento direto através de energia solar (os fabricantes vendem o “kit” bomba e placa solar). A Tab. 4.6 dá uma ideia da possibilidade de uso de cada fonte, conforme necessidade de uso e disponibilidade hídrica.

O uso de fontes energéticas elétricas e a combustão produzem grandes vazões para acionamento de bombas de eixos verticais ou horizontais, com o aumento da potência da bomba. Sua eficiência varia conforme uma pequena, média ou grande vazão, como pode ser observada nas curvas características apresentadas.

Tabela 4.6: Possibilidade do uso de fontes de energia e água.

Bomba	Fonte de energia	Fonte (s) de água	Vazão / demanda d'água	Altura
BCEH	FEEC; FEEH; FECO; FESO.	Rio; açude; barragem.	Demandas altas.	Baixa
BCEV	FEEC; FEEH; FECO; FESO.	Poço.	Demandas altas.	Baixa
BCEH OU BCEV COM KS*	FESO	Rio; açude; barragem; poço.	Demandas baixas.	Baixa
CH**	FEPO****	Barragem.	Demandas baixas.	Alta
RD***	FEPO	Rio; barragem.	Demandas baixas.	Alta

*Kit solar; **Carneiro hidráulico; *** roda d'água; ****Fonte de energia potencial.

Obs.: A vazão de água em qualquer sistema reduz a medida que a altura manométrica aumenta e vice-versa.

A fonte solar pode acionar bombas diretamente ou acumulado em baterias. O uso direto da fonte solar feita através de kits pelos fabricantes é muito limitado no atendimento à demanda de consumo e altura de elevação. Conforme foi verificado, a maior vazão que se consegue com esses kits é de 800 litros por hora e altura máxima de elevação de 43 metros. O kit de bombeamento solar da Anauger P100 (fabricante de bombas) pode bombear até 8.600 l/dia com 180 Wp (Wats pico), porém, essa vazão é considerada baixa. Já o Kit de bombeamento solar Shurflo 9325 bombeia até 1.500L de água por dia a uma altura de 70m. O primeiro custa em torno de R\$ 2.300,00 e o segundo em torno de R\$ 4.700,00. Em ambos a bomba possui eixo vertical (usados para poços).

Essa vazão é obtida em horários de sol pleno, com potências de placas definidas e não se mantendo constante durante o dia. O custo de aquisição é relativamente baixo.

Para energia elétrica convencional foram observadas as tarifas de energia conforme classificação da ANEEL descritas anteriormente.

Os sistemas de baixa vazão definidos para essa aplicação são: por microaspersão, gotejamento e xique-xique (sistema de irrigação localizado através de tubos perfurados no subsolo). Dentre esses, optou-se pelo gotejamento, pois, além de ser de baixa vazão, possibilita um maior aproveitamento na cultura, por sua alta eficiência e eficácia, resultando em maior produtividade.

A água chegará aos gotejadores por gravidade oriunda de um reservatório abastecido por um sistema de recalque com origem em uma fonte de água definida, acionado por bombas centrífugas ou axiais, dependendo da demanda. Com isso, esse

reservatório deve manter um nível de abastecimento contínuo durante algumas horas do dia. O conjunto motobombadeverá funcionar durante um número de horas diárias fixadas que atendam as demandas.

A simulação permitiu chegar a resultados que comprovem os experimentos computacionais com base nos resultados de dimensionamento e uso de bombas para irrigação, demonstrando qual (is) sistema (s) tornam-se adequados do ponto de vista técnico e econômica para as necessidades apresentadas. Trabalhou-se com faixas de vazões que atendem demandas das culturas descritas.

Como os custos das operações do sistema de bombeamento são influenciados por fatores climáticos, fez uma coleta de dados sobre as variações climáticas na região. Nesta, os dados relativos a essas variações climáticas, solo, insolação, velocidade do vento, etc., foram tomados junto ao INMET e ao CRESESB, que possuem informações desse tipo para todas as regiões do Brasil, o que facilitou os estudos. Para a simples verificação das informações fornecidas pelo INMET foi usado em campo um equipamento para medir a radiação solar. Os dados obtidos em campo serviram apenas para a constatação da radiação solar média na região, não sendo usados na pesquisa.

O medidor de energia solar foi o modelo MES-100, também conhecido como analisador de energia solar ou analisador de energia.

A região possui as seguintes características climáticas: clima do tipo tropical subúmido com médias pluviométricas e térmicas altas. A região não sofre com secas anuais. A temperatura varia de 23 a 36 ° C, com média anual de 26,5 ° C; período de chuvas mais intensas entre novembro e abril com variações pluviométricas de 120 a 260 mm nesse período; período de chuvas menos intensas entre maio e outubro com variações pluviométricas de 5 a 85 mm, resultando em uma média pluviométrica anual de 120 mm, segundo o EMBRAPA (2012) (Fig. 4.8). Se for considerado que nos meses de novembro e abril as chuvas são escassas pelo início e fim de temporada de chuva respectivamente, restam somente quatro meses de chuvas intensas na região (dezembro, janeiro, fevereiro e março), tendo com isso, oito meses de necessidade de irrigação contínua em um intervalo de horas do dia de funcionamento da bomba para as diferentes demandas de culturas.

Os solos predominantes são dos tipos: latossolo vermelho escuro (solos minerais profundos e bem drenados); areias quartzosas (solos minerais, não hidromórficos,

textura arenosa, pouco desenvolvido e com baixa fertilidade natural) e os solos litoicos (solos rasos, muito pouco evoluídos, apresentam teores baixos de materiais primários de fácil decomposição).

Pelos dados do INMET os meses mais secos do ano situam-se entre junho a outubro e os mais chuvosos entre os meses de novembro a maio. Como já exposto, para obtenção de radiação solar, observou-se os meses de fevereiro e maio no período úmido e julho e setembro no período seco. Tomando como parâmetros um dia desses meses e considerando-os extremos em termos de variações climáticas (nebulosidade; temperatura; radiação solar; velocidade do vento; umidade e precipitação pluviométrica), pode-se fazer a avaliação proposta considerando os dados obtidos, caso influenciem nos resultados finais propostos nesse trabalho. A finalidade é a de verificar a viabilidade de uso de energia solar na região para fins de uso em sistemas de bombeamento para irrigação, o que foi devidamente comprovado.

Segundo dado do INMET a radiação solar na região de estudo alcança valores que garantem insolação excelente para uso dessa fonte energética. Os ventos possuem velocidade que chegam a 5 m/s, porém as médias abaixo de 2 m/s anuais reduzem a eficiência de um sistema com energia eólica, caso fosse utilizado.

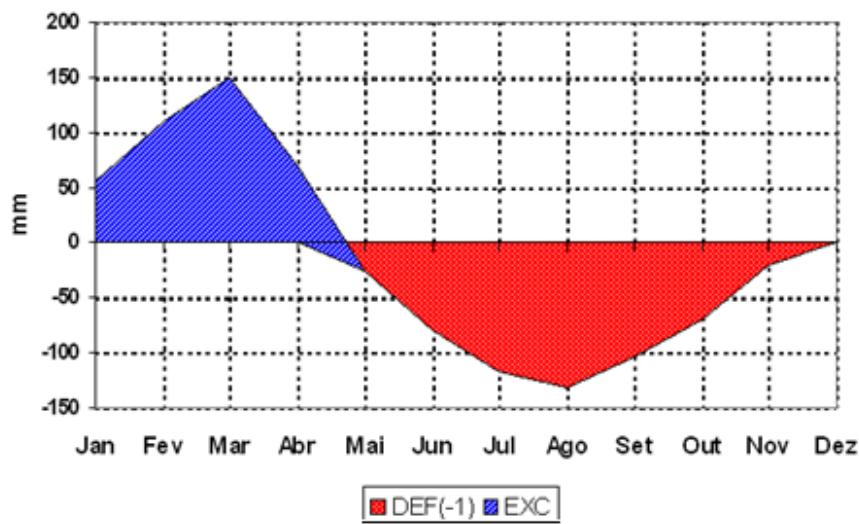


Figura 4.8: Extrato do Balanço Hídrico Mensal – Imperatriz – MA. EMBRAPA, 2012.

*DEF = Deficiência hídrica (o quanto o sistema solo-planta deixou de evapotranspirar).

** EXC = Excedente hídrico (água que não pode ser retida e drenada em profundidade = água gravitacional).

Com isso, delimitou-se o trabalho da forma apresentada na Tab. 4.7.

- Região: Sudoeste do Maranhão;
- Denominação dos locais: Região 1; Região 2;
- Culturas: goiaba; capim Tanzânia e banana;
- Fontes de água: rio e poço;
- Tipos de energia: elétrica convencional (EC); elétrica horosazonal (EH); combustão (CO) e solar (SO);
- Tipo de bomba: centrífugas (radiais) e axiais.

Tabela 4.7: Condições qualitativas da região delimitada para estudo.

Região	Fonte de água	Fonte(s) de energia simulada	Culturas adotadas
1	Rio	EC; EH; SO; CO	goiaba; capim Tanzânia;banana.
2	Poço	EC; EH; SO; CO	goiaba;capim Tanzânia;banana.

*EC = energia elétrica convencional; EH = energia elétrica horosazonal; SO = energia solar; CO = energia à combustão (diesel).

Segundo as demandas observadas na agricultura familiar, as bombas mais adequadas são centrífugas radiais, por atenderem baixas e médias demandas, característicos de agricultura familiar.

De acordo com o programa Sundata, do CRESESB (2005), a cidade de Imperatriz apresenta as informações relacionadas ao potencial energético solar mensal descrito na Tab. 4.8. Sendo assim, possui uma média anual de radiação de 4,89 kWh/m².dia. Nos meses de maio a agosto a radiação encontrada apresenta os maiores valores mostrados na Fig.4.9.

Tabela 4.8: Radiação média diária mensal de Imperatriz – MA. CRESESB (2005).

#	Ângulo	Inclinação	Radiação diária média mensal [kwh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
✓	Plano Horizontal	0° N	4,31	4,25	4,56	4,50	4,97	5,17	5,58	5,94	4,83	4,83	4,83	4,89	4,89	1,69
✓	Ângulo igual a latitude	6° N	4,18	4,17	4,55	4,58	5,18	5,45	5,87	6,13	4,86	4,76	4,68	4,70	4,93	1,96
✓	Maior média anual	9° N	4,10	4,12	4,53	4,61	5,26	5,58	5,99	6,21	4,86	4,71	4,60	4,60	4,93	2,11
✓	Maior mínimo mensal	9° S	4,45	4,31	4,51	4,31	4,59	4,68	5,07	5,56	4,72	4,86	4,98	5,10	4,76	1,25

Após a simulação computacional com o uso de variadas fontes de energia, aplicaram-se em campo os dados de entrada com os mesmos valores e assim analisados os resultados para o estudo de caso.

O conjunto motobomba pode ser: centrífuga de eixo radial ou axial com eixo horizontal ou vertical, testado para situações de uso de energia de fontes variadas, descritas com potência e eficiência variando, conforme cálculos efetuados, com altura manométrica total variando conforme características que afetam a tubulação e bomba.

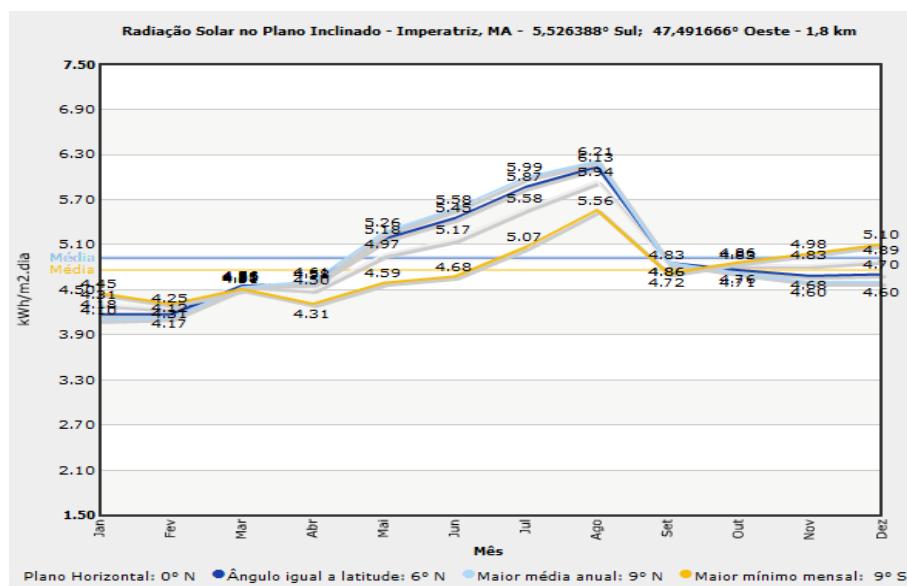


Figura 4.9: Gráfico de linhas da radiação solar no plano inclinado em Imperatriz – MA. CRESESB, 2005.

Como já exposto, o levantamento de custos foi feito com base nos custos fixos e variáveis. Os custos fixos são de aquisição de: tubulação de recalque (amortização); entrada de sucção; motor; bomba; acoplamento; sistema de proteção; saída de bomba. Os custos variáveis são: energia e manutenção, que são função da: vazão; desnível geométrico; diâmetro e tempo de funcionamento.

Os dados de custos foram delimitados da seguinte forma:

- Dados econômicos: taxa anual de juros; valor residual do sistema; período de amortização (anos); gasto anual com manutenção e reparos (2% do investimento).
- Fonte de energia elétrica: valores de tarifas em R\$/kWh; custo de instalação de energia elétrica (R\$/m); motobomba; tubulação; acessórios; depreciação.

- Fonte de energia fóssil (motor à combustão): tipo de combustível (óleo diesel); consumo unitário de combustível; valor do combustível; motobomba; tubulação; acessórios; depreciação.

- Fonte de energia solar: instalação; componentes; motobomba; tubulação; acessórios; depreciação.

Foi definido o diâmetro econômico como sendo aquele através do qual a soma dos custos variáveis e fixos torne o custo total mínimo. A redução do diâmetro aumenta os custos variáveis, pelo aumento da perda de carga e redução da eficiência do sistema. O aumento do diâmetro implica na velocidade econômica de escoamento. O diâmetro econômico é a soma dos custos variáveis e fixos que tornam mínimos os custos.

Embora o programa trabalhe com diferentes áreas e vazões, para a validação dos estudos de caso e simulação selecionou-se áreas e vazões específicas de fazendas na região em um primeiro momento, embora as apresentadas nesse trabalho sejam somente três culturas e duas áreas distintas. Definiram-se áreas irrigadas 50.000 m^2 (5 ha) e 200.000 m^2 (20 ha). Para a obtenção da vazão diária para dimensionamento da bomba, foram selecionadas algumas culturas com suas respectivas vazões:

- Goiaba: $1.100\text{ mm} \approx 3\text{ l/m}^2/\text{dia} = 30\text{ m}^3/\text{hectare}/\text{dia}$ - trabalhando 5 horas por dia a bomba terá que atender a demanda de $6\text{ m}^3/\text{h}$ ou $0,00167\text{ m}^3/\text{s}$ ou $1,67\text{ l/s}$ para irrigar um hectare.
- Capim Tanzânia: $1.800\text{ mm} \approx 5\text{ l/m}^2/\text{dia} = 50\text{ m}^3/\text{hectare}/\text{dia}$ - trabalhando 5 horas por dia, a bomba terá que atender a demanda de $10\text{ m}^3/\text{h}$ ou $0,00278\text{ m}^3/\text{s}$ ou $2,78\text{ l/s}$ para irrigar um hectare.
- Banana: $2.500\text{ mm} = 7\text{ l/m}^2/\text{dia} = 70\text{ m}^3/\text{hectare}/\text{dia}$ – trabalhando 5 horas por dia, a bomba terá que atender a demanda de $14\text{ m}^3/\text{h}$ ou $0,00389\text{ m}^3/\text{s}$ ou $3,89\text{ l/s}$ para irrigar um hectare.

O tempo de irrigação diária de funcionamento da bomba por dia para atender a demanda varia muito. É comum usar 5 horas por dia (como na descrição acima). Caso seja aumentada a quantidade de horas de funcionamento da bomba, reduz-se a sua potência e, em consequência seu valor, porém, aumentam-se os custos operacionais com o uso de energia por mais longo período, mas que pode ser balanceado e analisado, pois a redução da potência da bomba implica em consumo menor de energia.

O sistema deve funcionar no horário especial com desconto para irrigantes (entre 23 e 5 h no período seco ou úmido) e no restante das horas do dia (podendo ser no

horário definido para irrigantes (das 5 às 19 h)), totalizando vinte horas de funcionamento, desde que não coincida com as horas de ponta definido pela ANEEL. A velocidade da água deve variar entre 0,6 e 3,0 m/s. Esse valor será encontrado quando forem fixadas as vazões totais e será a que atende ao diâmetro econômico encontrado.

As fontes de água descritas apresentam as seguintes características:

- Rio:
 - ✓ Entradas: perenidade; profundidade (altura da lâmina d'água); distância da bomba ao ponto de aplicação ou reservatório; altura da captação ao eixo da bomba (sucção); altura da bomba ao ponto de aplicação ou reservatório (recalque).
 - ✓ Saída: bomba centrífuga radial ou axial de eixo horizontal.
- Poço:
 - ✓ Entrada: perenidade; altura de sucção (só para bomba com eixo horizontal); altura de recalque; profundidade (altura da lâmina d'água); distância da bomba ao ponto de aplicação ou reservatório; altura da captação ao eixo da bomba (sucção); altura da bomba ao ponto de aplicação ou reservatório (recalque).
 - ✓ Saídas: bomba centrífuga radial ou axial de eixo vertical.

As informações de entrada para utilização no *software* com a finalidade de dimensionar as instalações estão descritas na Tab. 4.9.

Para realizar as simulações, foram separadas por região as informações necessárias para cada caso específico.

Os dados comuns para todas as simulações são:

- Fonte de energia existente: Elétrica Convencional;
- Fonte de energia simulada: Elétrica Convencional (com e sem desconto); Elétrica Horosazonal Verde (com e sem desconto); Combustão; Solar;
- Tipo de bomba: Centrífuga radial e axial de eixo horizontal e vertical;
- Material do tubo: PVC;
- Rugosidade do material (PVC): $\epsilon = 0,0015 \text{ mm}$;
- Peso específico da água: $\gamma = 9.806,65 \text{ N/m}^3 (\approx 10.000 \text{ N/m}^3)$; $980,6 \text{ kgf/m}^3 (\approx 1.000 \text{ kgf/m}^3)$;
- Aceleração da gravidade: $g = 9,8 \text{ m/s}^2$;
- Sistema à combustão:

- Tipo de combustível: óleo diesel;
- Consumo unitário de combustível: $C_o = 0,225 \text{ L/cv/h}$;
- Tempo anual de operação: $ta = 1200 \text{ h}$;
- Sistema à eletricidade na tarifação convencional sem e com desconto:
 - Tempo de operação diário do sistema: $t = 20 \text{ h}$;
 - Tempo de operação diário do sistema entre 23 e 5 h (horário especial para irrigantes): $the = 6 \text{ h}$;
 - Número de dias por ano de operação do sistema: 240;
 - Número de meses por ano sem operar o sistema: $d = 4$;
 - Fração de desconto sobre a tarifa de consumo para irrigantes entre 23 e 5h: $fdtc = 0,70$;
- Sistema à eletricidade na tarifação horosazonal
 - Número de dias de operação do sistema no período seco: 20;
 - Tempo de operação diário do sistema fora de ponta no período seco: $tfps = 20 \text{ h}$;
 - Tempo de operação diário do sistema na ponta no período seco: $tfps = 0 \text{ h}$;
 - Número de horas do dia de operação do sistema fora de ponta no período úmido: 20 h;
 - Tempo de operação diário do sistema fora de ponta no período úmido: $tfpu = 20 \text{ h}$;
 - Tempo de operação diário do sistema na ponta no período úmido: $tpu = 0 \text{ h}$;
 - Tempo de operação diário do sistema entre 23 e 5h no período seco (horário especial para irrigantes): $thes = 6\text{h}$;
 - Tempo de operação diário do sistema entre 23 e 5h no período úmido (horário especial para irrigantes): $theu = 6\text{h}$;
 - Número de meses por ano sem operar o sistema: $d = 4$;
 - Fração de desconto sobre a tarifa de consumo para irrigantes entre 23 e 5h: $fdtc = 0,70$;

Tabela 4.9: Dados de entrada para dimensionamento das instalações.

Regiões (R_n)	<ul style="list-style-type: none"> R_1: na cidade de João Lisboa. R_2: na cidade de Cidelândia.
Culturas	<ul style="list-style-type: none"> Goiaba; Capim Tanzânia; Banana.
Vazão Unitária (Q_{un})	<ul style="list-style-type: none"> Goiaba: $Q_{u1} = 3 \text{ l/m}^2/\text{dia}$ Capim Tanzânia: $Q_{u2} = 5 \text{ l/m}^2/\text{dia}$ Banana: $Q_{u3} = 7 \text{ l/m}^2/\text{dia}$
Área (A_n)	<ul style="list-style-type: none"> R_1: $A_1 = 5,0 \text{ ha}$ R_2: $A_2 = 20,0 \text{ ha}$
Fonte de Água	<ul style="list-style-type: none"> R_1 : Rio R_2 : Poço
Desnível sucção (H_{sn})	<ul style="list-style-type: none"> R_1: $h_{S1} = 6 \text{ m}$ R_2: $h_{S2} = 0 \text{ m}$
Desnível Recalque (H_{rn})	<ul style="list-style-type: none"> R_1: $h_{R1} = 25 \text{ m}$ R_2: $h_{R2} = 15 \text{ m}$
Desnível Total($H_n = H_{sn} + H_{rn}$)	<ul style="list-style-type: none"> P/R_1: $H_1 = 31 \text{ m}$ P/R_2: $H_2 = 15 \text{ m}$
Comprimento de Sucção (L_{sn})	<ul style="list-style-type: none"> P/R_1: $L_{S1} = 5 \text{ m}$ P/R_2: $L_{S2} = 0 \text{ m}$
Comprimento de Recalque (L_{rn})	<ul style="list-style-type: none"> P/R_1: $L_{R1} = 360 \text{ m}$ P/R_2: $L_{R2} = 160 \text{ m}$
Comprimento Total ($L_n = L_{sn} + L_{rn}$)	<ul style="list-style-type: none"> P/R_1: $L_1 = 365 \text{ m}$ P/R_2: $L_2 = 160 \text{ m}$
Tempo Funcionamento da Bomba	<ul style="list-style-type: none"> $T = 20 \text{ h/dia}$
Tipo de Tubo / Rugosidade	<ul style="list-style-type: none"> PVC / $\epsilon = 0,0015 \text{ m}$
Radiação(média anual região)	<ul style="list-style-type: none"> $4,93 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$

Os Dados financeiros (Custos unitários para irrigação (ANEEL, 2012) e pesquisa local) também são comuns para todas. Nas simulações efetuadas aplicou-se duas espécies de tarifa. Em uma situação as tarifas de demanda foram colocadas iguais para fonte elétrica convencional e horosazonal, com pouca variação para a tarifa de consumo, sendo nesta realizada em vários cenários. Em um cenário isolado foram consideradas as tarifas da região atuais. A finalidade é de mostrar que essas variações tem uma contribuição significativa nos resultados. As tarifas estão definidas abaixo.

- Elétrica convencional:
 - Tarifa de demanda: $TD_c = R\$ 19,56 / 59,11$
 - Tarifa de consumo: $TC_c = R\$ 0,29 / 0,10$
- Elétrica horosazonal verde sem e com desconto:
 - Horário fora de ponta no período seco:
 - Tarifa de demanda: $TD_{vfps} = R\$ 19,56 / 19,41$
 - Tarifa de consumo: $TC_{vfps} = R\$ 0,16 / 0,10$

- Horário de ponta no período seco:
 - Tarifa de demanda: $TDvps = R\$ 19,56 / 19,41$
 - Tarifa de consumo: $TCvps = R\$ 1,60 / 1,45$
- Horário fora de ponta no período úmido:
 - Tarifa de demanda: $TDvpu = R\$ 19,56 / 19,41$
 - Tarifa de consumo: $TCvfpu = R\$ 0,15 / 0,09$
- Horário de ponta no período úmido:
 - Tarifa de demanda: $TDv = R\$ 19,56 / 19,41$
 - Tarifa de consumo: $TCvpu = R\$ 1,50 / 1,20$
- Preço de combustível: $Cu = R\$ 2,29/L = R\$ 2290/m^3;$
- Consumo de combustível: $Co = 0,225 l/cv/h = 0,000225 m^3/cv/h;$
- Taxa anual de juros: $r = 8,5\% (0,085);$
- Valor residual do sistema: $R = 10\% (0,1);$
- Gasto anual com manutenção e reparos: $m = 2\% \text{ do investimento inicial};$
- Período de amortização do sistema: $PA = 15 \text{ anos}.$

Para a composição dos custos fixos, foram pesquisados preços no mercado sobre equipamentos e materiais que compõem as instalações de bombeamento. Estes preços estão inseridos em um banco de dados do programa que pode ser atualizado com relativa facilidade a qualquer momento, pelo aumento ou redução de preços.

Foram feitas simulações de acordo com a região, sendo seis simulações para quatro fontes de energia em um total de 24 simulações, resultando em seis quadros com os resultados comparativos para as quatro fontes de energia. As três primeiras situações apresentam os mesmos parâmetros variando somente a área, sendo uma de cinco hectares e a outra de vinte hectares.

Cada região possui características próprias já definidas. Sendo em cada região uma área fixa, com comprimentos de recalque e desníveis conhecidos, variou-se a vazão conforme a cultura. Assim, a variação da vazão ocorreu no intervalo de 3 a 7 $l/m^2/\text{dia}$, compondo três vazões distintas. Os cenários são as seguintes:

- Cenário 1: Região 1: João Lisboa-MA($05^{\circ}26'52'' S; 47^{\circ}24'03'' O$).
 - Cultura: Goiaba;
 - Fonte de água: Rio;
 - Área de irrigação: $A = 5 \text{ hectares (50.000 m}^2)$;

- Vazão da cultura: $Q_u = 3 \text{ l/m}^2.\text{dia}$;
- Comprimento total: $L_n = 365 \text{ m}$;
- Desnível (altura) de sucção: $h_s = 6 \text{ m}$;
- Desnível (altura) de recalque: $h_r = 25 \text{ m}$;
- Radiação média mensal na região (maior média mensal na região no mês de agosto): $5,94 \text{ kWh/m}^2$.
- Cenário 2: Região 1: João Lisboa - MA ($05^{\circ}26'52'' \text{ S}$; $47^{\circ}24'03'' \text{ O}$).
 - Cultura: Capim Tanzânia;
 - Fonte de água: Rio
 - Área de irrigação: $A = 5 \text{ hectares (50.000 m}^2)$;
 - Vazão da cultura: $Qu = 5 \text{ l/m}^2.\text{dia}$;
 - Comprimento total: $Ln = 365 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de sucção: $hs = 6 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de recalque: $hr = 25 \text{ m}$;
 - Radiação média mensal na região (maior média mensal na região no mês de agosto): $5,94 \text{ kWh/m}^2$.
- Cenário 3: Região 1: João Lisboa - MA ($05^{\circ}26'52'' \text{ S}$; $47^{\circ}24'03'' \text{ O}$).
 - Cultura: Banana;
 - Fonte de água: Rio;
 - Área de irrigação: $A = 5 \text{ hectares (50.000 m}^2)$;
 - Vazão da cultura: $Qu = 7 \text{ l/m}^2.\text{dia}$;
 - Comprimento total: $Ln = 365 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de sucção: $hs = 6 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de recalque: $hr = 25 \text{ m}$;
 - Radiação média mensal na região (maior média mensal na região no mês de agosto): $5,94 \text{ kWh/m}^2$
- Cenário 4: Região 2: Açailândia - MA ($04^{\circ}56'49'' \text{ S}$; $47^{\circ}30'18'' \text{ O}$).
 - Cultura: Goiaba;
 - Fonte de água: Poço;
 - Área de irrigação: $A = 20 \text{ hectares (200.000 m}^2)$;
 - Vazão da cultura: $Qu = 3 \text{ l/m}^2.\text{dia}$;
 - Comprimento total: $L_r = 160 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de sucção: $h_s = 0 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de recalque: $h_R = 15 \text{ m}$;

- Radiação média mensal na região (maior média mensal na região no mês de agosto): $5,94 \text{ kWh/m}^2$.
- Cenário 5: Região 2: Açailândia - MA ($04^{\circ}56'49'' \text{ S}$; $47^{\circ}30'18'' \text{ O}$).
 - Cultura: Capim Tanzânia;
 - Fonte de água: Poço;
 - Área de irrigação: $A = 20 \text{ hectares (200.000 m}^2)$;
 - Vazão da cultura: $Q_u = 5 \text{ l/m}^2.\text{dia}$;
 - Comprimento total: $L_r = 160 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de sucção: $h_s = 0 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de recalque: $h_r = 15 \text{ m}$;
 - Radiação média mensal na região (maior média mensal na região no mês de agosto): $5,94 \text{ kWh/m}^2$.
- Cenário 6: Região 2: Açailândia - MA ($04^{\circ}56'49'' \text{ S}$; $47^{\circ}30'18'' \text{ O}$).
 - Cultura: Banana;
 - Fonte de água: Poço;
 - Área de irrigação: $A = 20 \text{ hectares (200.000 m}^2)$;
 - Vazão da cultura: $Q_u = 7 \text{ l/m}^2.\text{dia}$;
 - Comprimento de recalque: $L_r = 160 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de sucção: $h_s = 0 \text{ m}$;
 - Desnível (altura) de recalque: $h_r = 15 \text{ m}$;
 - Radiação média mensal na região (maior média mensal na região no mês de agosto): $5,94 \text{ kWh/m}^2$.

4.5 Definição dos Custos Segundo a Fonte de Energia

Os componentes obtidos na Tab. 4.10 referem-se a custos constituintes de materiais e equipamentos de um sistema de bombeamento, variando-se fontes de energia. O valor do reservatório é comum para toda fonte de energia e fonte de água. Nas regiões onde é necessária a abertura de poços, o custo deste deve ser considerado, usando bomba centrífuga de eixo horizontal.

A Tab.4.11 mostra as informações que são necessárias para as simulações com respectivos dados de entrada, isto é, são as bases de entrada para o *software* processar os

estudos de caso definidos na metodologia que definirão os resultados encontrados para posterior análise e conclusões.

Tabela 4.10: Custos de materiais e equipamentos de um sistema de bombeamento, variando-se fontes de energia.

FEEC	FEEH	FECO	FESO
Bombeamento	Bombeamento	Bombeamento	Bombeamento
Motobomba	Motobomba	Motobomba	Motobomba
Tubulação	Tubulação	Tubulação	Tubulação
Edificações	Edificações	Edificações	Edificações
Fiação/Cabos	Fiação /Cabos	-	-
Reservatório	Reservatório	Reservatório	Reservatório
Poço	Poço	Poço	Poço
-	-	Diesel	-
Acessórios hidráulicos	Acessórios hidráulicos	Acessórios hidráulicos	Acessórios hidráulicos
Válvula de pé	Válvula de pé	Válvula de pé	Válvula de pé
Curva de 90°	Curva de 90°	Curva de 90°	Curva de 90°
Redução excêntrica	Redução excêntrica	Redução excêntrica	Redução excêntrica
Ampliação concentrica	Ampliação concentrica	Ampliação concentrica	Ampliação concêntrica
Registro de gaveta	Registro de gaveta	Registro de gaveta	Registro de gaveta
Tê	Tê	Tê	Tê
Fita / Cola	Fita / Cola	Fita / Cola	Fita / Cola
Acessórios elétricos	Acessórios elétricos		Acessórios solares
Quadro decomando	Quadro de comando	Demais obras civis	Painel solar
Painel de controle	Painel de controle	Amortização Depreciação (C_{AM})	Bateria
Aterramento	Aterramento		Inversor
Disjuntor	Disjuntor		Contr. de carga
Aterramento	Aterramento		
Obras civis (C_{oc})	Obras civis (C_{oc})	Obras civis	Obras civis
Amortização Depreciação (C_{AM})	Amortização Depreciação (C_{AM})	Amortização	Amortização

Tabela 4.11: Quadro resumo das simulações realizadas em campo com dados de entrada.

	Sit. 1:	Sit. 2:	Sit. 3:	Sit. 4:	Sit. 5:	Sit. 6:
DADOS GERAIS /COMUNS						
A (m ²)		50.000			200.000	
Q _b (l/m ² /dia)	3	5	7	3	5	7
L (m)		365			160	
E			0,0015			
r(%)			8,5			
R (%)			10			
PA (anos)			15			
t (horas)			20			
N_dias_ano			240			
D (meses)			4			
h _S	6	6	6	0	0	0
h _R	25	25	25	15	15	15
DADOS ESPECÍFICOS – ENERGIA ELÉTRICA CONVENCIONAL						
TC _C			0,28 / 0,10			
TD _C			19,56 / 59,11			
DADOS ESPECÍFICOS – ENERGIA ELÉTRICA HOROSAZONAL						
t _{pu}			0			
t _{fpu}			20			
t _{ps}			0			
t _{fps}			20			
T _{Dv}			19,56 / 19,41			
T _{Cvpu}			1,50 / 1,20			
T _{Cvfpu}			0,15 / 0,09			
T _{Cvps}			1,60 / 1,45			
T _{Cvfps}			0,16 / 0,10			
T _{heu}			6			
Fdtc			0,7			
t _{hes}			6			
DADOS ESPECÍFICOS – ENERGIA À COMBUSTÃO						
C _O			0,000225			
C _U			2290			
DADOS ESPECÍFICOS – ENERGIA SOLAR						
S _P (kWh/m ²)			4,41			
A _b (dias)			3			
C _{OR} (%)			70			
P _p (W)			60			
CAP_D (%)			90			
CAP_b (Ah)			115			
Ddp			24			

4.6 Custo Anual dos Sistemas de Bombeamento

O custo anual fixo (CFA) dos investimentos dos componentes da adutora em sistemas de irrigação pressurizados é obtido pela Eq. (4.1).

$$CFA = (C_a + C_{SR} - VR).FRC \quad (4.1)$$

Sendo: FRC = fator de recuperação de capital. Sendo esse fator obtido pela Eq. (4.2).

$$FRC = \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad (4.2)$$

Sendo: i = taxa anual de juros; e , n = vida útil do equipamento, em anos.

O custo variável anual relaciona-se aos custos relacionados aos gastos anuais com a manutenção e operação, o que envolve gastos com mão-de-obra, materiais e energia consumida.

No caso de motores a diesel o valor mensal do consumo de energia (Ced) é dado pela Eq. (4.3):

$$Ced = \text{Potência} \times \text{consumo} \times \text{tempo} \times \text{preço} \quad (4.3)$$

Sendo:

Para motores elétricos o consumo de energia (Cee) mensal é dado pela Eq. (4.4).

$$Cee = \text{Potência} \times \text{consumo} \times \text{tempo} \times \text{preço} \quad (4.4)$$

O custo total anual do sistema de bombeamento refere-se a todos os custos envolvidos da captação ao primeiro ponto de aplicação (ou fim do recalque), dado pela soma dos custos totais anuais fixos e variáveis.

4.7 Composição dos Custos de Bombeamento

Para compor os custos inicia-se por sua origem. Para dimensionar a bomba deve-se definir sua potência que é função da vazão e altura manométrica. A vazão varia de acordo com a cultura e área a ser irrigada. Cada cultura consome uma quantidade de água anualmente por hectare, como é demonstrado na Tab. 4.12 Dessa tabela pode-se fazer uma previsão para determinação da vazão total em m³/s.

Tabela 4.12: Consumo de água para diferentes culturas durante o ciclo total de desenvolvimento. Fronza, 2008.

CULTURAS	CONSUMO (mm)	MÉDIA (mm)	m ³ /ha
Hortaliças	250 – 500	375	3.750
Cebola	350 – 600	475	4.750
Milho	400 – 700	575	5.750
Batata	500 – 800	675	6.750
Laranja	600 – 950	775	7.750

Existem duas formas de otimizar os custos com o uso de energia elétrica em sistemas de bombeamento (Centrais elétricas brasileiras, FUPAI/EFFICIENTIA, Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005):

- i) Instalações hidráulicas adequadas: tubulações com diâmetros bem dimensionados; manter as tubulações em bom estado de conservação quanto à rugosidade interna; conceber projetos e operações que mantenham pressões adequadas ao local, evitando-se desperdícios com altas pressões desnecessárias que traduzem ineficiência energética; variação da velocidade dos motores para adequar ao ponto de funcionamento da bomba a um máximo rendimento segundo a demanda; escolha do conjunto motobomba com melhor

rendimento para o ponto de trabalho desejado (horas em que o sistema produtor/distribuidor da concessionária de energia elétrica é mais demandado pelos clientes).

- ii) Evitar ou reduzir o consumo de energia nas horas de ponta o que possibilita a concessionária um melhor equilíbrio ao sistema e ao operador do serviço de abastecimento de água uma economia de recursos financeiros (incentivo com estrutura tarifária diferenciada).

Os parâmetros de entrada para definição dos custos de bombeamento estão descritos na Tab. 4.13.

Tabela 4.13: Parâmetros de entrada para definição de custos de bombeamento.

COMPONENTES HIDRÁULICOS		UNIDADE
• Vazão		m ³ /s
• Desnível		m
• Comprimento da tubulação de recalque		m
• Comprimento da tubulação de sucção		m
• Rugosidade (PVC)		m
• Carga piezométrica (total)		m
• Rendimento		decimal
CONSTRUÇÃO CIVIL		
• Área da casa de bombas		m ²
• Preço médio da construção (rústica)		R\$/m ²
• Largura da vala de assentamento da tubulação de recalque		m
• Profundidade da vala de assentamento da tubulação de recalque		m
• Comprimento da vala de assentamento da tubulação de recalque		m
• Preço médio da abertura e fechamento da vala		R\$/m ³
COMPONENTES ELETRICOS		
• Comprimento da linha de alta tensão		m
• Preço médio da linha de alta tensão		R\$/km
DADOS ECONÔMICOS		
• Período de amortização		anos
• Taxa de juros anuais		decimais
• Valor residual do sistema		decimais
• Amortização (FRC)		
• Gastos com manutenção e reparos sobre investimento inicial		% (2% xCF)
• Preço médio do diesel		R\$/l
• Consumo de combustível		l.CV/h
• Tempo anual de operação		Horas
• Tarifas de energia – tabela específica.		R\$/kWh – Consumo R\$/kW - Demanda

4.8 Custos do Sistema de Irrigação

Os sistemas de irrigação para a agricultura possuem duas etapas: uma refere-se ao trecho que compreende da captação ao recalque. A outra está relacionada com as canalizações e sistemas de irrigação. Ambos devem ser corretamente dimensionados para que a cultura receba água na proporção adequada, sem excesso ou pouca água para seu desenvolvimento normal. Nesse trabalho está restrito ao trecho da tubulação a canalização de recalque ou como limite o reservatório superior ou, na ausência deste, do primeiro ponto de consumo ou interceptação.

Então, com base na experiência do projetista, das especificações técnicas e relações matemáticas, chega-se ao dimensionamento, existindo assim, uma combinação de fatores que levam a melhores resultados em campo.

Porém, esses fatores, técnicos e de experiência de campo, nem sempre se atentam às questões cruciais de todo empreendimento comercial relacionado aos custos. Portanto, em grande parte das situações os projetos de irrigação são montados sem contemplar possíveis combinações que garantam que os requisitos de projeto sejam totalmente levados em consideração, principalmente referente aos parâmetros de custo final, onde a solução encontrada poderia refletir redução dos custos envolvidos.

Para esse estudo os custos são definidos como sendo os seguintes:

- Custo de operação (CO) – Custos Variáveis (CV)
 - ❖ Energia solar
 - ❖ Energia à combustão
 - ❖ Energia de hidrelétrica
- Custo de implantação (CI) – Custos Fixos (CF)
 - ❖ Energia solar
 - ❖ Energia à combustão
 - ❖ Energia de hidrelétrica
- Custo total (CT)
 - ❖ Energia solar
 - ❖ Energia à combustão
 - ❖ Energia de hidrelétrica
- Definição da bomba (escolha):

- ❖ Será escolhida a bomba que oferece o menor custo total e que atenda as necessidades do usuário, de acordo com: i) a (s) fonte (s) de água disponível (is); ii) o consumo desejado; iii) que recalque a água na altura manométrica definida.

Os custos de um sistema de bombeamento são analisados por Zacheret al (2004). O autor relata que esses sistemas assumem grande importância, já que todo o investimento realizado é muito elevado e os custos associados podem viabilizar ou não as atividades produtivas que o utilizam.

Esse custos são influenciados por diversas variáveis, como já descritas. Porém, a maioria relaciona-se com os atributos físicos do local, sendo constantes em casos específicos. As variáveis principais são relacionadas pelo autor como sendo: comprimento da tubulação e tipo de material, desnível topográfico, necessidade de vazão, pressão no final da adutora e comprimento da linha elétrica de alta tensão (se for bombeada por motores à eletricidade).

O diâmetro da tubulação de recalque provoca intensa variação nos custos do sistema, que, teoricamente não está atrelada aos atributos físicos. Caso o bombeamento seja feito com velocidade de escoamento baixa, terá um diâmetro relativamente mais elevado, o que resulta em maiores gastos na tubulação e menores com a bomba, motores e energia para acionamento, devido às menores alturas manométricas (com menor rugosidade). Caso contrário, se o bombeamento for com velocidade alta, resulta em um diâmetro baixo, elevando a altura manométrica (com aumento de rugosidade), resultando em maiores gastos com energia, bombas e motores. Ou seja:

$$\emptyset_1 < \emptyset_2 \rightarrow \Delta f_1 > \Delta f_2 \rightarrow \text{custos 1} > \text{custos 2}$$

Com isso, as maiores perdas de carga decorrentes da redução do diâmetro resultam em maior consumo de energia, o que implica em maiores gastos anuais.

Baseando-se no critério do custo total mínimo, desenvolveram-se algumas relações para obtenção do diâmetro, sendo a equação de Bresse (Eq. (4.5)) a mais conhecida em operações contínuas.

$$\emptyset = K \cdot Q^{0,5} \quad (4.5)$$

Onde: K = constante (depende da relação de custos de unidade de potência para o conjunto elevatório e da unidade de tubulação assentada (varia de 0,7 a 1,3)).

Para operações não contínuas em suas instalações de recalque, o diâmetro econômico pode ser calculado pela fórmula de Forchheimer (Eq. (4.6)) ou pela fórmula da ABNT (Eq. (4.7)).

$$\phi = 1,46 \cdot X^{0,25} \cdot \sqrt{Q} \quad (\text{Forchheimer}) \quad (4.6)$$

$$\phi = 1,3 \cdot T^{0,25} \cdot \sqrt{Q} \quad (\text{ABNT}) \quad (4.7)$$

Onde: X = número de horas de trabalho da instalação por ano dividido por 8760; e, T = número de horas de trabalho da instalação por dia dividido por 24.

Com a obtenção do diâmetro e consequente velocidade econômica, obtém-se uma estimativa de minimização do custo anual total do sistema que abastece uma área irrigada, sendo que os motores das bombas para essa situação são acionados por motores à eletricidade ou à combustão. Nos motores a eletricidade são consideradas as diversas tarifas de energia elétrica fornecidas pela ANEEL com a possibilidade de descontos oferecidos pelas concessionárias conforme o período do ano e horário de funcionamento. Com base nessas informações foram obtidas as condições mais favoráveis de custos finais ao irrigante, percebendo-se que o diâmetro econômico oferece mais vantagens em termos de custos variáveis para energia elétrica, e este deve ser um diâmetro superior ao obtido no dimensionamento, já que possui menos perda de energia enquanto o sistema está em funcionamento, portanto, maior economia em determinado período de uso.

Logo, o menor custo anual total (CAT) é observado quando existe a situação apresentada na Eq. (4.8).

$$\frac{d\text{CAT}}{d\phi} = 0 \quad (4.8)$$

O custo anual fixo é definido somente em função do diâmetro da tubulação de recalque (influi diretamente na altura manométrica e daí na potência da bomba, motor e componentes, o que resulta em dispêndios com energia, manutenção e reparos (custo anual variável)) , o custo anual fixo (CAF, em \$ unidades monetárias) é fornecido pela Eq. (4.9).

$$CAF = \frac{L.a.\phi^b.(1-R).r}{(1+r)^{PA}-1} + \frac{L.a.\phi^b.(1+r)^{PA}-1}{[\sum_{n=1}^{PA}(1+r)^n]+1} \quad (4.9)$$

Para o sistema elétrico convencional com e sem desconto o CAF e o CAV são obtidos pelas Eq. (4.10) a Eq. (4.14).

$$CAF = AMA + REA \quad (4.10)$$

$$AMA = \frac{L.a.\phi^b.(1-R).r}{(1+r)^{PA}-1} \quad (4.11)$$

$$REA = \frac{L.a.\phi^b.(1+r)^{PA}-1}{[\sum_{n=1}^{PA}(1+r)^n]+1} \quad (4.12)$$

Portanto:

$$CAF = \frac{L.a.\phi^b.(1-R).r}{(1+r)^{PA}-1} + \frac{L.a.\phi^b.(1+r)^{PA}-1}{[\sum_{n=1}^{PA}(1+r)^n]+1} \quad (4.13)$$

$$CAV = CABO + CAMR \quad (4.14)$$

O custo anual de bombeamento (CABO) quando as bombas forem acionadas por motores á eletricidade é calculado pela Eq. (4.32). Seus componentes são obtidos pelas Eq. (4.15) a Eq. (4.21).

$$CABO = FAD + FAC + AJA \quad (4.15)$$

$$FAD = DM \cdot TD_c \cdot (12 - d) + 0,10 \cdot d \cdot DM \cdot TD_c \quad (4.16)$$

$$DM = \frac{Q \cdot \gamma}{1000 \cdot \eta_{MB}} \cdot h_f \quad (4.17)$$

$$FAC = CM_a \cdot TC_c \text{ (sem o desconto)} \quad (4.18)$$

$$CM_a = \frac{Q \cdot \gamma \cdot t_a}{1000 \cdot \eta_{MB}} \cdot h_f \quad (4.19)$$

$$FAC = TC_C \cdot [CM_{he} \cdot (1 - f dtc) + CM_{hc}] \text{ (com o desconto)} \quad (4.20)$$

$$CM_{he} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot t_{he}}{1000 \cdot \eta_{MB}} \cdot h_f \quad (4.21)$$

O custo anual de manutenção e reparos (CAMR) corresponde a 2% do investimento inicial (2% x REA).

Para o sistema horosazonal com e sem desconto, como observado nas Eq. (4.22), a (4.25), muda-se o FAD e o FAC. As Eq.(4.26) a Eq. (4.35) dão sequencia as demais variáveis (CAT = CAF + CAV; CAF = AMA + REA; CAV = CABO + CAMR; CABO = FAD + FAC + AJA).

$$AMA = \frac{L \cdot a \cdot \phi^b \cdot (1-R) \cdot r}{(1+r)^{PA} - 1} \quad (4.22)$$

$$\text{REA} = \frac{L.a.\phi^b.(1+r)^{PA}-1}{[\sum_{n=1}^{PA}(1+r)^n]+1} \quad (4.23)$$

Logo:

$$CAF = \frac{L.a.\phi^b.(1-R).r}{(1+r)^{PA}-1} + \frac{L.a.\phi^b.(1+r)^{PA}-1}{[\sum_{n=1}^{PA}(1+r)^n]+1} \quad (4.24)$$

$$FAD = [DM.TD_v + (DM - DC).TU_v].(12 - D) + 0,10.d.DM.TD_v \quad (4.25)$$

$$FAC = CM_{pu}.TC_{vpu} + CM_{fpu}.TC_{vfpu} + CM_{ps}.TC_{vps} + CM_{fps}.TC_{vfps} \quad (4.26)$$

Sendo:

$$CM_{pu} = \frac{Q.\gamma.t_{tu}}{1000.\eta_{mb}(1)}.h_f \quad (4.27)$$

$$CM_{fpu} = \frac{Q.\gamma.t_{fpu}}{1000.\eta_{mb}(1)}.h_f \quad (4.28)$$

$$CM_{ps} = \frac{Q.\gamma.t_{ps}}{1000.\eta_{mb}(1)}.h_f \quad (4.29)$$

$$CM_{fps} = \frac{Q.\gamma.t_{fps}}{1000.\eta_{mb}(1)}.h_f \quad (4.30)$$

$$FAC = CM_{pu}.TC_{vpu} + [CM_{fpcu} + CM_{heu}.(1-fdtc)].TC_{vfpu} + CM_{ps}.TC_{vps} + [CM_{fpes} + CM_{hes}.(1-fdtc)].TC_{vfps} \text{ (com desconto)} \quad (4.31)$$

$$CM_{heu} = \frac{Q.\gamma.t_{heu}}{1000.\eta_{mb}(1)}.h_f \quad (4.32)$$

$$CM_{fpcu} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot t_{fpcu}}{1000 \cdot \eta_{mb(1)}} \cdot h_f \quad (4.33)$$

$$CM_{hes} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot t_{hes}}{1000 \cdot \eta_{mb(1)}} \cdot h_f \quad (4.34)$$

$$CM_{fpcs} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot t_{fpcs}}{1000 \cdot \eta_{mb(1)}} \cdot h_f \quad (4.35)$$

Para o sistema à combustão, conforme a Eq. (4.36), muda-se o CABO.

$$CABO = \frac{Q \cdot \gamma \cdot c_o \cdot c_u \cdot t_a}{735 \cdot \eta_b(1)} \cdot h_f \quad (4.36)$$

Sendo: h_f = perda de carga ocorrida na tubulação de recalque(m), sendo definido pela Eq. (4.37).

$$h_f = \frac{160 \cdot Q^2 \cdot L}{\pi^2 \cdot 2 \cdot g} \cdot \frac{f}{\phi^5} \quad (4.37)$$

Onde o fator de atrito (f) é definido pela Eq. (4.38) conhecida como Fórmula de Swamee, que permite o cálculo de “ f ” para escoamento laminar e turbulento (ZACOLER et al., 2004). A Fórmula de Swamee (1993) pode ser utilizada em qualquer regime de fluxo (Laminar e Turbulento) no limite $0 < Re < 108$.

$$f = \left\{ \left(\frac{64 \cdot \pi \cdot \phi \cdot v}{4 \cdot Q} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[\ln \left(\frac{e}{3,7 \cdot \phi} + \frac{5,74}{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \phi \cdot v} \right)^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500 \cdot \pi \cdot \phi \cdot v}{4 \cdot Q} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (4.38)$$

Sendo assim, pode-se definir o custo anual fixo em função do diâmetro da tubulação de recalque, como propõe Zacoleretall (2004), pois influi diretamente na altura manométrica do sistema e na potência da bomba, do motor e demais componentes

necessários para seu acionamento, o que influi na energia, na manutenção e reparos (custo anual variável).

Para energia solar, propõe-se que, ao determinar a potência da bomba, seja usada a vazão máxima, a potência máxima, sob radiação máxima (sol pleno). Com isso, todo o consumo diário (\bar{V}_{cons}) tem que ser suprido nesse intervalo de tempo de sol pleno (SP), resultando em uma vazão máxima ($Q_{máx}$) que pode ser calculada a partir da Eq.(4.39).

$$Q_{máx} = \frac{\bar{V}_{cons}}{sp} \text{ (m}^3/\text{h}) \quad (4.39)$$

O diâmetro com o menor custo benefício pode ser fornecido minimizando a Eq. (4.40).

$$P\$total = P\$paineis + P\$bombas + P\$tubos + P\$inversor \quad (4.40)$$

Através de pesquisa de mercado, considerando que as perdas hidráulicas estáticas independem do diâmetro do tubo, e, considerando a equação de Flamant para perdas hidráulicas em PVC rígido, tem-se a Eq.(4.41).

$$\begin{aligned} D_{ótimo} = & \underset{\eta}{\text{minimize}} \left[5000 - \left(\frac{0,000824 - \gamma}{\eta} \right) \cdot \left(\frac{Q^{2,75}}{D^{4,75}} \right) - 9742,21 \cdot D^3 + \right. \\ & \left. 2170,3 \cdot D^2 + 30,70 \cdot D - 0,00834 \right] \end{aligned} \quad (4.41)$$

Dada uma vazão e a característica H x Q da instalação, a potência é fornecida pela Eq.(4.42).

$$Pbmot = \frac{(2,72 \cdot 10^{-3}) \cdot \gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (4.42)$$

O *software* objeto desse trabalho, desenvolvido no programa MatLab, foi criado para desenvolver o processo de dimensionamento e escolha da bomba, bem como calcular os custos totais do sistema, permitindo que, dadas as informações de entrada, seja feito um processamento e resulte nas informações de saída que se deseja obter. Esses resultados permitirão a escolha da bomba e da fonte de energia adequada e que ofereça as melhores condições sob o aspecto técnico e econômico. O dimensionamento, etapa inicial do *software*, deve definir os valores de potência da bomba, número de placas solares e outros dados que variam seus preços conforme a demanda fornecida.

Através dessas equações e outras que resultem em custos anuais de bombeamento, para sistemas acionados por eletricidade ou não, deverão ser realizadas simulações usando O MatLab para a comprovação do estudo apresentado.

Para a análise, descrição e avaliação do sistema adequado segundo critérios técnicos envolvidos e custos associados, foram analisadas as seguintes condições relacionadas ao fornecimento de energia:

- i) Sistema elétrico convencional
 - Tarifação convencional sem o desconto
 - Tarifação convencional com o desconto
- ii) Sistema elétrico horosazonal
 - Tarifação horosazonal verde sem o desconto
 - Tarifação horosazonal verde com o desconto
- iii) Sistema à combustão
- iv) Sistema solar

4.9 Definição dos Componentes de Custo

Os componentes de custo variam segundo a fonte de energia a ser usada. Alguns são usados em todas as fontes de energia, como a maioria dos componentes hidráulicos. Outros são específicos conforme a fonte. Assim, em sistemas com fonte elétrica faz-se necessário o uso de instalações elétricas, bem como em instalações em sistemas solares o uso de componentes solares necessários para a captação, transformação ou armazenamento dessa fonte de energia. A Tab. 4.14 elenca esses componentes.

Tabela 4.14. Componentes de custos segundo a fonte de energia.

TIPO DE CUSTO	FONTE DE ENERGIA			
	UN.	ELÉTRICA	SOLAR	COMBUSTÃO
FIXOS				
Motobomba (C_{MB})	un.	X	X	X
Tubulação (C_{TU})	m	X	X	X
Edificação da casa de bombas (C_{CB})	un.	X	X	X
Fiação (C_{FI})	m	X	X	
Acessórios hidráulicos (C_{AH})	-	X	X	X
Acessórios elétricos (C_{AE})	-	X	X	
Equipamentos solares (C_{ES})	-		X	
Confecção de poço (C_{CP})	un.	X	X	X
Amortização (C_{AM})*	-	X	X	X
VARIÁVEIS				
• Consumo de energia (C _{EN})**	kW h	X		
• Consumo de diesel (C _{DI})	l			X
• Manutenção e reparos (C _{MR})***	-	X	X	X

*O custo com amortização foi definido anteriormente através de uma equação.

**O custo de energia deve ser considerado para elétrica convencional e horosazonal. Para essa fonte considerar as várias tarifas de energia apresentadas. Cada uma tem um valor diferente conforme o tempo e horário de uso (ANEEL, 2012).

***O custo anual com manutenção e reparos equivale a 2% do investimento inicial.

Os acessórios hidráulicos são os seguintes: Válvula de pé com crivo; Curva de 90°; Redução excêntrica; Ampliação concêntrica; Válvula de retenção; Registro de gaveta; Tê; Fita; e Cola.

Para energia elétrica os acessórios elétricos que os compõem são os seguintes: quadro de comando; painel de controle; aterramento e disjuntor.

Considerar como custos totais para energia elétrica a soma dos custos fixos e variáveis, sendo que já foram descritos no item 4.2 esses custos. Os custos totais, fixos e variáveis podem ser descritos pelas Eq. (4.44) a Eq. (4.46).

$$CT = CF + CV \quad (4.44)$$

$$CF = C_{MB} + C_{TU} + C_{CB} + C_{FI} + C_{AH} + C_{AE} + C_{AM} + C_{CP} \quad (4.45)$$

$$CV = C_{EN} + C_{MR} \quad (4.46)$$

Para energia solar os equipamentos solares que os compõem são os seguintes: painel solar; bateria; inversor e controlador de carga.

Considerar como custos totais para energia solar a soma dos custos fixos e variáveis, sendo que já foram descritos no item 4.2 esses custos. Os custos totais, fixos e variáveis podem ser descritos pelas Eq. (4.47) a Eq. (4.49).

$$CT = CF + CV \quad (4.47)$$

$$CF = C_{MB} + C_{TU} + C_{CB} + C_{FI} + C_{AH} + C_{AE} + C_{AM} + C_{CP} + C_{ES} + C_{AM} \quad (4.48)$$

$$CV = \sum C_{MR} \quad (4.49)$$

Considerar como custos totais para energia à combustão a soma dos custos fixos e variáveis, sendo que já foram descritos esses custos anteriormente. Os custos totais, fixos e variáveis podem ser descritos pelas Eq. (4.50) a Eq. (4.52).

$$CT = CF + CV \quad (4.50)$$

$$CF = C_{MB} + C_{TU} + C_{CB} + C_{AH} + C_{AM} + C_{CP} + C_{AM} \quad (4.51)$$

$$CV = \sum C_{DI} + C_{MR} \quad (4.52)$$

4.10 Escolha da Bomba Segundo Condições de Campo

A escolha de uma bomba segundo as condições oferecidas em campo dependerá principalmente de dois fatores que são: fonte de energia e fonte de água. Existindo energia elétrica, esta, tecnicamente deve ser a opção mais prática para o bombeio da água em qualquer fonte de água disponível (rio, açude, barragem ou poço). Não havendo disponibilidade de energia, pode-se optar pelo uso de fontes variadas (solar, combustão, eólica ou potencial). Para as fontes de energia solar e combustão também podem ser usadas bombas centrífugas para qualquer fonte de água. Logo, tecnicamente as fontes de água descritas podem ser bombeadas usando essas fontes de energia, o que possibilita o uso de fontes de energia em cenários diferentes para irrigação.

O fator que decidirá a escolha por uma fonte de energia específica é o custo total envolvido no processo de bombeamento. O custo é influenciado por diversas variáveis que compõem cada uma das fontes. Preliminarmente pode-se afirmar que os custos de bombas acionadas à energia elétrica e combustão são mais influenciados pela continuidade desses custos ao longo do ciclo de vida, devido os gastos diários, mensais e anuais com pagamento de energia elétrica e combustível respectivamente.

Já a bomba acionada por energia solar requer um investimento muito alto na implantação, o que torna essa fonte de energia pouco atraente na instalação do projeto em relação às outras fontes de energia.

Em todos os projetos existem custos fixos que são comuns. No decorrer da vida útil do sistema os custos variáveis que devem existir em qualquer situação são os custos de manutenção e reparos que correspondem a uma porcentagem defendida na literatura (equivalente a 2% sobre o investimento realizado) sobre os custos de implantação.

A Tabela 4.15 relaciona algumas condições com fontes de energia, definindo o essencial para cada fonte, isto é, aquela condição que, sem ela, seria inviável o uso de certo sistema de bombeamento para irrigação com determinada fonte de energia.

Tabela 4.15: Condições que afetam as fontes de energia.

FONTE DE ENERGIA X CONDIÇÃO	FEEC	FEEH	FECO	FESO
Rede de energia	Sim. Que atenda a demanda de consumo.	Sim. Que atenda a demanda de consumo.	Não	Não
Combustível	Não	Não	Sim. Somar com o custo de transporte.	Não
Radiação	Não	Não	Não	Sim. Que atenda ao dimensionamento da bomba.

4.11 Componentes Hidráulicos e Informações em Processo

As informações mantidas fixas e inseridas no programa são os seguintes:

- Aceleração da gravidade (g): 9,8 m/s²
- Peso específico da água (γ): 1000 kgf/m³ ou 9.806,65 N/m³

Dados de entrada:

- Horas de funcionamento da bomba;
- Tipo de material da tubulação;
- Rugosidade do tubo (e);
- Data e horário da análise;
- Fonte de água;
- Tipo de bomba;
- Fonte de energia simulada;
- Cultura adotada;
- Área da região (ha ou m²);
- Vazão da cultura (vazão unitária) (l/m².dia) (m³/ha.dia);
- Número de meses completos por ano que o sistema elevatório ficou desligado (d);
- Número de dias no ano de funcionamento da bomba (N_dias_ano);

- Valores de tarifas de demanda e de consumo;
- Valor residual do sistema (R);
- Taxa anual de juros (r);
- Período de amortização ou vida útil da tubulação (anos) (PA);
- Desnível de sucção (m);
- Desnível de recalque (m);
- Comprimento total de recalque (m);
- Comprimento total de sucção (m);
- Radiação média mensal ($\text{kWh/m}^2\text{.dia}$);
- Tarifas de demanda e de consumo;
- Valor de combustível – óleo.

Resultados:

- Vazão total da cultura na área da região (m^3/dia);
- Desnível total (m);
- Velocidade da água;
- Altura manométrica total;
- Rendimento / eficiência;
- Diâmetros (ABNT; Forchheimer; Econômico);
- Potência da bomba;
- Potência do motor;
- Custo fixo;
- Custo variável;
- Custo total;
- Economia obtida;
- Comportamento dos custos: implantação; ao longo dos anos;
- Ponto de equilíbrio.

As simulações foram feitas com base nas informações na Tab. 4.16, usando diferentes fontes de energia. Para energia elétrica convencional e horosazonal na Tab. 4.17 são fornecidos valores de demanda e consumo. Na mesma tabela é fornecido o valor atual do preço do diesel e da radiação média mensal.

Tabela 4.16: Base de dados para simulações.

Sit.	Cult.	Área (m ²)	Fonte água	Tipo bomb	Q _u (l/m ² / dia)	Q _T (l/dia)	Compr. (m)	Desnível (m)	
								Suc.	Rec.
1	Goiaba	50.000	Rio	BCEH	3,0	150.000	365	6	25
2	Capim	50.000	Rio	BCEH	5,0	250.000	365	6	25
3	Banana	50.000	Rio	BCEH	7,0	350.000	365	6	25
4	Goiaba	200.000	Poço	BCEV	3,0	600.000	160	0	15
5	Capim	200.000	Poço	BCEV	5,0	1.000.000	160	0	15
6	Banana	200.000	Poco	BCEV	7,0	1.400.000	160	0	15

Tabela 4.17: Custos de bombeamento por fontes de energia.

Base	Tarifa (R\$)		Preco diesel (R\$)	Radiacão (kW/m ² .dia)
	Fonte	Demand		
FEEC*	19,560	0,290		
FEEH*	CD	18,550	0,160	
	SD	18,550	1,600	
FECO**			2,290	
FESO***				5,94

** Valor médio do combustível na região; *** Média mensal segundo os dados climatológicos na região.

Para a comparação dos custos relacionados às fontes de energia e seu comportamento ao longo dos anos, foi usada a equação de decaimento de custos (Lopes, 2004) (Eq. 4.53), onde se verificou o comportamento dos custos para as fontes de energia, quando já calculados os custos totais finais em um horizonte de 15 anos. Os custos foram comparados anualmente, e, segundo taxas anuais de amortização, comparou-se a energia elétrica com outras fontes. Na curva apresentada há um ponto em que curvas se cruzam. Em outro ponto os custos de energia solar chegam próximos de zero, já os de energia elétrica e combustão continuam crescendo.

$$C = C_{inicial} - \xi \times \left(C_{EE} \times \sum_0^n (1, i)^n \right) \quad (4.53)$$

$$n = 0 \rightarrow \xi = 0 ; n \neq 0 \rightarrow \xi = 1$$

Sendo: C = custo total anual; C_{inicial} = custo inicial de implantação do sistema; n = tempo em anos; Ε = fator de ajuste da equação; C_{EE} = custo de energia consumida no 1º ano de operação do sistema; i = taxa anual.

CAPÍTULO V

Resultados e Discussões

5.1 Descrição e Análise do *Software*

Didaticamente o *software* apresenta boa configuração visual. Os dados de entrada podem ser inseridos com relativa facilidade e os resultados podem ser percebidos imediatamente.

Este possui uma grande flexibilidade para posteriores alterações internas, já que o programa MatLab possui boa operabilidade para manuseio de informações.

Na entrada de dados as unidades são apresentadas e devem ser inseridas conforme solicitadas, não importando se está no Sistema Internacional de unidades ou não. As informações de entrada podem ser modificadas a qualquer momento que desejar, permitindo analisar várias situações distintas em pouco tempo.

Visualmente o *software* tem uma arquitetura muito agradável com fácil entendimento na disposição de informações. Para cada fonte de energia e resultados comparativos optou-se por colocar cores diferenciadas, sendo: i) Elétrica Convencional: azul; ii) Elétrica Horosazonal: verde; iii) Combustão: verde cana; iv) Solar: Branco; e, v) Resultados Comparativos: amarelo.

O programa analisa os resultados obtidos para cada fonte de energia, relacionando-os ao diâmetro e potência da bomba para a obtenção das informações que permitem melhores custos, sejam fixos, variáveis ou totais. Estes podem ser analisados

individualmente ou em conjunto para a tomada de decisão sobre as possibilidades apresentadas.

Os gráficos que resultam no final são comparados individualmente com a fonte solar e depois em conjunto com todas as fontes de energia. A ideia sobre isso é a análise da fonte que apresenta a melhor resposta em um horizonte de tempo que é obtido com o cruzamento das linhas, onde há um decaimento da linha da fonte solar em comparação com todas as outras fontes, mostrando que esta apresenta a melhor opção durante um decorrer de alguns anos.

Nos gráficos cada projeção foi descrita de uma cor diferente, sendo: i) Elétrico Convencional: vermelho; ii) Elétrico Horosazonal: roxo; iii) Combustão: azul; iv) Solar: preto.

A sequência de telas do processamento das informações são descritas abaixo:

✓ Energia Elétrica Convencional:

- i. D_otimo
- ii. Relatório1
- iii. Custo
- iv. Relatório2
- v. Relatório6
- vi. D_compara
- vii. Projeção

✓ Energia Elétrica Horosazonal:

- i. D_otimo2
- ii. Relatório3
- iii. Custo2
- iv. Relatório5
- v. Relatório6
- vi. D_compara
- vii. Projeção

✓ Energia à Combustão:

- i. D_otimo3
- ii. Relatório4
- iii. Custo3
- iv. Relatório7

- v. Relatório6a
- vi. D_compara
- vii. Projeção
- ✓ Energia Solar:
 - i. D_otimo4
 - ii. Relatório9
 - iii. D_solar
 - iv. Relatório10
 - v. Relatório6a
 - vi. D_compara
 - vii. Projeção

5.2 Restrições do Uso de Bombas

Os dados das simulações efetuadas são apresentadas no apêndice 1. No Apêndice 2 são exibidas as telas comuns a todas as fontes de energia. O procedimento de cálculo para dimensionamento convencional das instalações de recalque é obtido com as demais telas.

A definição do tipo de bomba a ser usado depende da vazão total obtida. A vazão é analisada segundo a altura manométrica e eficiência, determinando potência e tipo de bomba.

A potência da bomba que será utilizada é influenciada por fatores físicos que determinam uma maior ou menor potência e estão presentes na equação de dimensionamento da potência de uma bomba. Esses fatores são:

- i) **Vazão:** influenciado pelas necessidades da cultura a ser irrigada. Cada tipo de cultura possui uma vazão unitária (em l/m².dia);
- ii) **Altura vertical** (sucção + recalque): determinam junto com as perdas de carga (localizada e ao longo do tubo) a altura manométrica total. Altura e vazão são inversamente proporcionais. Isso se dá pelo aumento da perda de carga no tubo em seu comprimento. Com isso, com o aumento do comprimento e das derivações, aumenta-se a altura manométrica e reduz-se a vazão a ser recalculada.

- iii) **Rendimento / Eficiência:** está associado a vazão. Varia conforme for o valor da vazão total. Como é uma variável que já deve ser conhecida na equação de potência, foi estabelecida segundo uma curva característica (vazão x potência) faixas de eficiência relacionada ao valor da vazão, que resultou na Tab. (5.1), onde essas faixas foram inseridas no softwaree discretizadaspara definir, junto com as outras variáveis, a potência da bomba. O rendimento do conjunto motobomba foi definido, sendo 20% superior ao rendimento da bomba ($\text{rend_MB} = 1,2 \times \text{rend_B}$).

Tabela 5.1: Valores de eficiência de bombas segundo a vazão.

$Q (\text{m}^3/\text{h})$	$\eta (\%)$	$Q (\text{m}^3/\text{h})$	$\eta (\%)$
1,5	25	10,0	49
2	29	10,5	49
2,5	33	11	49
3	35	11,5	50
3,5	36	12	50
4	37	15	54
4,5	38	20	60
5	38	30	70
5,5	39	40	75
6	40	50	75
6,5	41	60	72
7	43	70	65
7,5	44	80	57
8	45	90	50
8,5	46	100	50
9,0	47	> 100	50
9,5	48		

As restrições às quais estão sujeitas as bombas para efeitos de dimensionamento e escolha são os seguintes:

- i) **Existência de fonte de água superficial:** a fonte superficial de água é a mais viável economicamente, caso já exista naturalmente, pois evita obras civis no início do projeto, reduzindo custos. Além disso, a altura de sucção em boa parte das situações é bem menor que a altura encontrada na fonte de água subterrânea (poço). Sendo o trecho de canalização de sucção com diâmetro maior que o de recalque, segundo recomendações, aconselha-se

colocar a bomba o mais próximo possível da fonte de água para permitir a redução do trecho de canalização de sucção.

- ii) **Existência de fonte de água subterrânea:** a fonte de água subterrânea permite um uso mais frequente de bombas submersas, eliminando o trecho de sucção. Os poços são obras civis e podem ser encontradas em alturas variadas na região dependendo da altura do lençol freático. O local de abertura também depende dessa disponibilidade. Na região do estudo há uma facilidade muito grande de existência de lençóis freáticos a alturas baixas, o que possibilita uma redução de custos e uma flexibilidade na localização, podendo ser localizado próximo ao local da cultura a ser irrigada. O reservatório deve estar localizado a uma distância mínima possível do poço.
- iii) **Existência de energia elétrica:** caso exista energia elétrica na região, deve-se usar o programa para analisar qual a situação que apresenta a melhor solução para o processo de irrigação com bombeamento.
- iv) **Vazão necessária:** antes de qualquer empreendimento faz-se necessário um estudo do lençol freático e da perenidade das fontes de água superficiais, para que a demanda de água solicitada possa estar disponível.
- v) **Altura manométrica:** a altura manométrica é obtida pela soma da altura vertical com as perdas de carga (localizadas e ao longo do conduto). As perdas de carga variam conforme o diâmetro do tubo, o comprimento do tubo e a natureza do material.
- vi) **Eficiência:** a eficiência foi definida conforme características de bombas e diversos fabricantes. Foram analisadas diversas curvas características para várias faixas de vazão, obtendo-se valores de eficiência que foram inseridas no programa para o dimensionamento das instalações, conforme visto na Tab. (5.1).

5.3 Escolhas de Bombas Segundo o Critério de Custos Usando o Software

Observando os resultados podem-se perceber as inúmeras variações que ocorrem mudando apenas uma variável. Com isso, as variações permitem uma escolha adequada de um sistema otimizado.

O diâmetro encontrado é aquele que, em determinada fonte de energia tem o melhor comportamento hidráulico e econômico.

A potência de bomba encontrada é aquela que tem capacidade para suprir a demanda de vazão em determinado tempo definido, segundo uma eficiência obtida nas curvas características.

As perdas de carga variam conforme o aumento ou redução do diâmetro, além da variação da rugosidade do tubo.

Por fim, resumidamente, pode-se afirmar que todas as variáveis obtidas em campo, fornecidas por fabricantes ou definidas pela literatura influenciam nos resultados econômicos, possibilitando uma economia razoável no presente ou no futuro.

Destacam-se aqui os fatores que aumentam os custos fixos e variáveis, e, em consequência, o custo total, como: maior perda de carga pela redução do diâmetro; maior perda de carga pela rugosidade do tubo; desperdícios de água; superdimensionamento da bomba; etc.

De acordo com as avaliações de dados de campo, foram obtidos os resultados apresentados abaixo. Inicialmente mostra-se o resultado para uma condição de um hectare com linha de recalque de 1000 metros, usando as tarifas reais aplicadas pela CEMAR, isto é, grande variação das tarifas de demanda e pequena variação entre as tarifas de consumo entre os dois sistemas, variando-se também as horas de funcionamento da bomba necessária para o bombeamento da água. Depois apresentam-se seis cenários baseados em situações de campo onde foram simuladas segundo as condições encontradas. Nessas situações descritas, manteve-se o valor da tarifa de demanda igual e as de consumo próximas entre si tanto no sistema elétrico convencional quanto no elétrico horosazonal. O resultado mostra o quanto importante é aplicar as tarifas diferenciadas de demanda usando a tarifação que permite desconto.

5.4 Menus e Submenus

5.4.1 Etapa 1: Início

Inicialmente o sistema possibilita o acesso ao programa através da tela “Menu_inicial” (Fig. (5.1)). Nesta faz-se a identificação das instituições de origem, do nome do programa (*Irrigare 1.0*), os autores do programa. Há um *link* denominado “Sobre o Programa”, que resumidamente mostra suas aplicaçõesatravés da tela “Sobre”(Fig. (5.2)).

Existem dois acessos nesta tela: um possibilita o conhecimento do programa através do *link* “Sobre o programa” e a outra inicia o programa indo para a tela seguinte, “Início_2” (Fig. (5.3)). A tela “Início_2” é considerada o eixo central do *software*, pois viabiliza vários acessos em alguns momentos. Os seguintes *links* compõem essa tela: “Restrições”, “Análise CAT”, “CAF – Correlações”, “Análise CAF e CAV” e “Compara os Sistemas”.



Figura 5.1: Tela “Menu_inicial”.

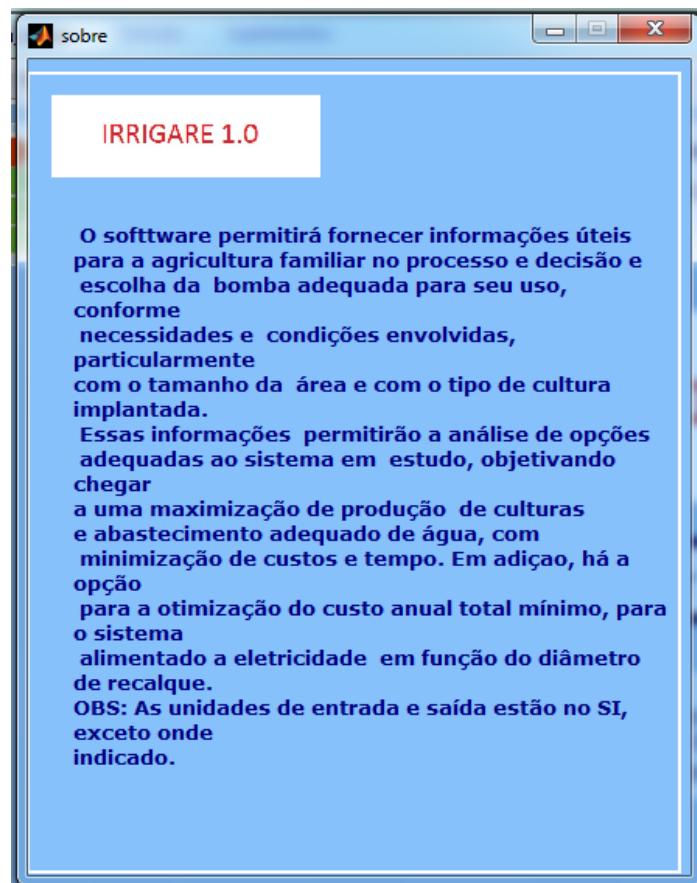


Figura 5.2: Tela “Sobre” (do link “Sobre o Programa”).



Figura 5.3: Tela “Inicio_2”.

Acessando o *link* “Restrições” observam-se as variáveis que afetam o dimensionamento e possibilitam uma escolha sensata da bomba e respectivos custos posteriores. As restrições referem-se, portanto, as fontes de água disponíveis. Nesse caso específico foram definidas as fontes de água que são observadas com mais frequência na região, descritas em conjunto ou isoladamente, conforme sua caracterização em comum: 1) rio, riacho, córrego; 2) poço; 3) açude, lago, reservatório. Acessando esse *link*, obtém-se a tela que possibilita a escolha da fonte de água, de acordo com a disponibilidade no local onde será realizada a pesquisa (Fig. (5.4)). Após a seleção, há o retorno imediato pra tela “Início_2”. Então se acessa o link “Análise CAT”.



Figura 5.4: Tela “quantidade”.

5.4.2 Etapa 2: Seleção do Sistema

No *link* “Análise CAT” tem-se o acesso a tela “Início” onde é selecionado o sistema descrito na Fig. (5.5). As fontes de energia a serem analisados são apresentadas em *links*. Escolhendo um deles o sistema traz a entrada de dados para fazer o dimensionamento.

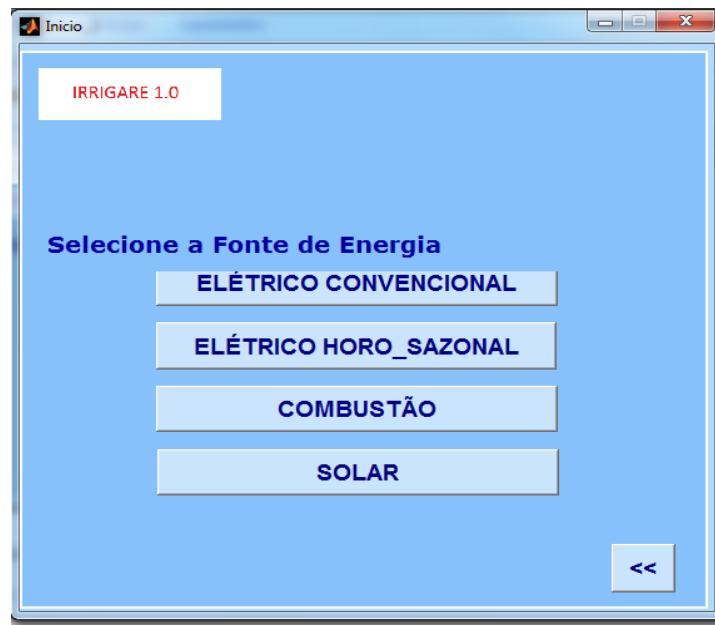


Figura 5.5: Tela “inicio”.

5.4.3 Etapa 3: Entrada de Dados

Nesta etapa poderão serem selecionadas uma das telas abaixo (Fig. (5.6) a Fig. (5.9)), conforme fonte de energia selecionada. Nessa etapa, são inseridos todos os dados de entrada para que o programa realize os cálculos e forneça os relatórios com os resultados em seguida.



Figura 5.6: Tela “D_otimo” - Entrada de dados para energia elétrica convencional.

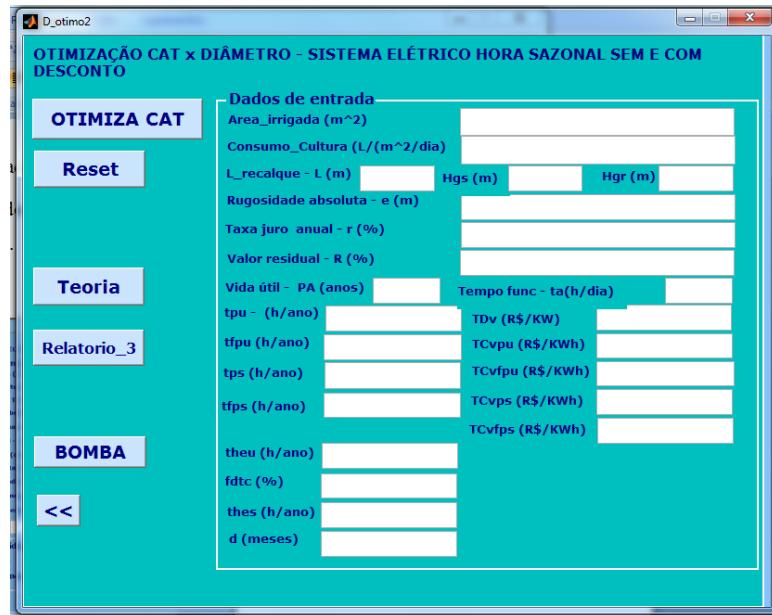


Figura 5.7: “D_otimo2” - Entrada de dados para energia elétrica horosazonal.



Figura 5.8: Tela “D_otimo3” - Entrada de dados para energia elétrica à combustão.

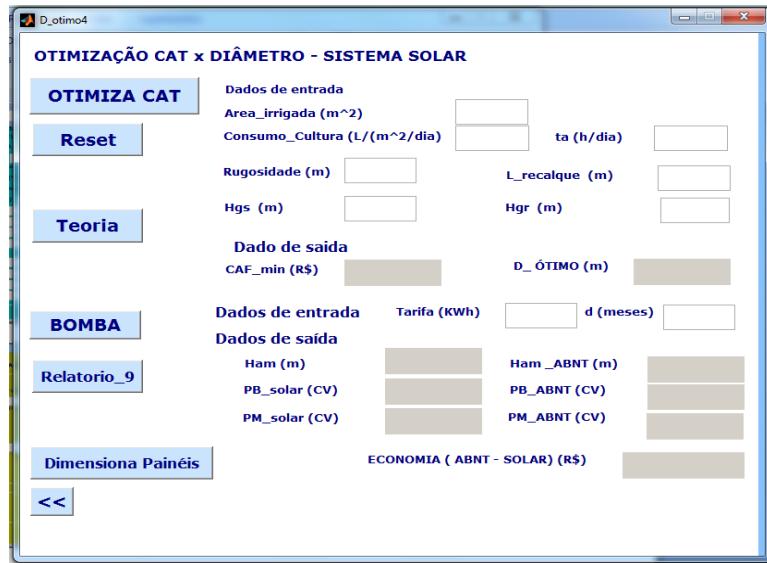


Figura 5.9: Tela “D óptimo4” - Entrada de dados para energia solar.

5.4.4 Etapa 4: Saída de Dados (Otimização)

A partir do link “Relatório_1” da tela “D Ótimo”, gera-se a tela “Relatório1” para sistema elétrico convencional (Fig. (5.10)). A partir do link “Relatório_3” da tela “D Ótimo2”, gera-se a tela “Relatório3” para sistema elétrico horosazonal (Fig. (5.11)). A partir do link “Relatório_4” da tela D Ótimo3, gera-se a tela “Relatório4” para sistema à combustão (Fig. (5.12)). A partir do link “Relatório_9” da tela D Ótimo4, gera-se a tela “Relatório9” para sistema solar (Fig. (5.13)).

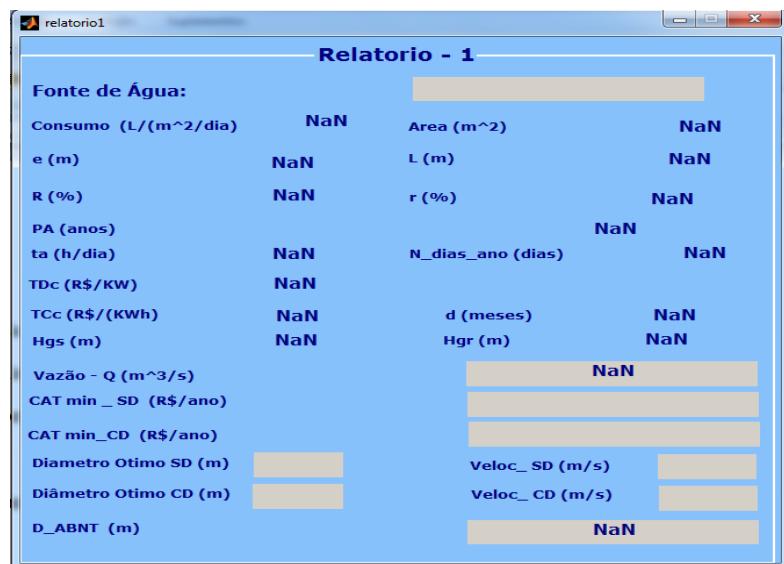


Figura 5.10: Tela “Relatório1” para sistema elétrico convencional.

Relatório - 3					
Area (m ²)	NaN				
Consumo (L/(m ² /dia))					NaN
L (m)	NaN	Hgs (m)	NaN	Hgr (m)	NaN
e (m)					NaN
r (%)					NaN
R (%)					NaN
PA (anos)		NaN	ta (h/dia)		NaN
tpu (h)		NaN	TDv (R\$/KW)		NaN
tfpu (h)		NaN	TCvpu (R\$/KWh)		NaN
tps (h)		NaN	TCvfpu (R\$/KWh)		NaN
tfps (h)		NaN	TCvps (R\$/KWh)		NaN
			TCvfps (R\$/KWh)		NaN
theu (h)	NaN	DotimoHS_SD (m)		v_HS_SD (m/s)	
fdtc (%)	NaN	Dotimo HS_CD (m)		v_HS_CD (m/s)	
thes (h)	NaN				
d (meses)	NaN		Diâmetro Fochem (m)		NaN

Figura 5.11: Tela “Relatório3” para Sistema Elétrico Horosazonal.

Relatorio - 4					
Area (m ²)	NaN				
Consumo (L/(m ² /dia))					NaN
L (m)	NaN	Hgs (m)	NaN	NaN	NaN
e (m)					NaN
r (%)					NaN
R (%)					NaN
PA (anos)					NaN
ta (h/dia)	NaN		N_dias_ano		NaN
Q (m ³ /s)					NaN
Co (m ³ /cv.h)					NaN
Cu (R\$/m ³)					NaN
CAT_comb_min (m)					
Diametro_otimo (m)					
D_ABNT (m)					NaN

Figura 5.12: Tela “Relatório4” para sistema à combustão.

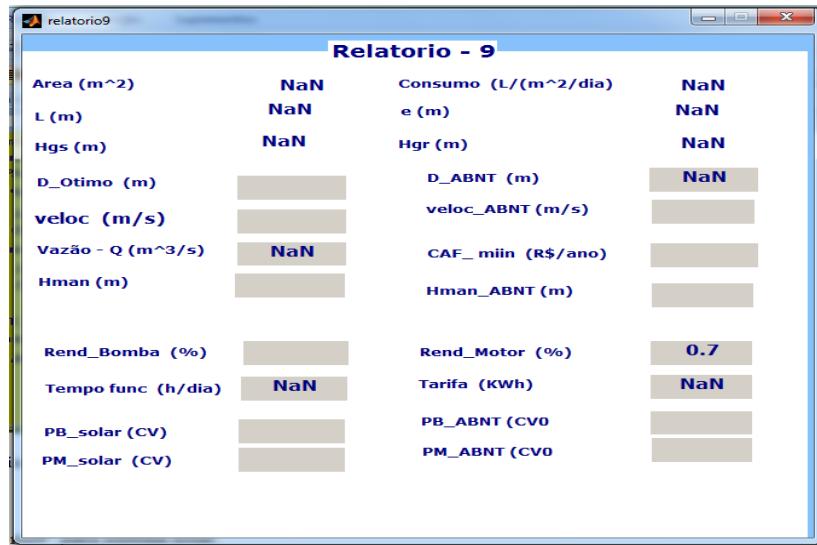


Figura 5.13: Tela “Relatório9” para sistema solar.

5.4.5 Etapa 5: Saída de Dados (Dimensionamento motobomba)

A partir do link “Bomba” da tela “D _Ótimo”, gera-se a tela “Custo” para sistema elétrico convencional (Fig. (5.14)). A partir do link “Bomba” da tela “D _Ótimo2”, gera-se a tela “Custo2” para sistema elétrico horosazonal (Fig. (5.15)). A partir do link “Bomba” da tela “D _Ótimo3”, gera-se a tela “Custo3” para sistema a combustão (Fig. (5.16)). O link “dimensiona painéis” da tela “D _Ótimo4” gera a tela D_Solar para sistema solar (Fig. (5.17)). No link Relatório_10 da tela D_Solar gera-se a tela Relatório10 para sistema solar (Fig. (5.18)).

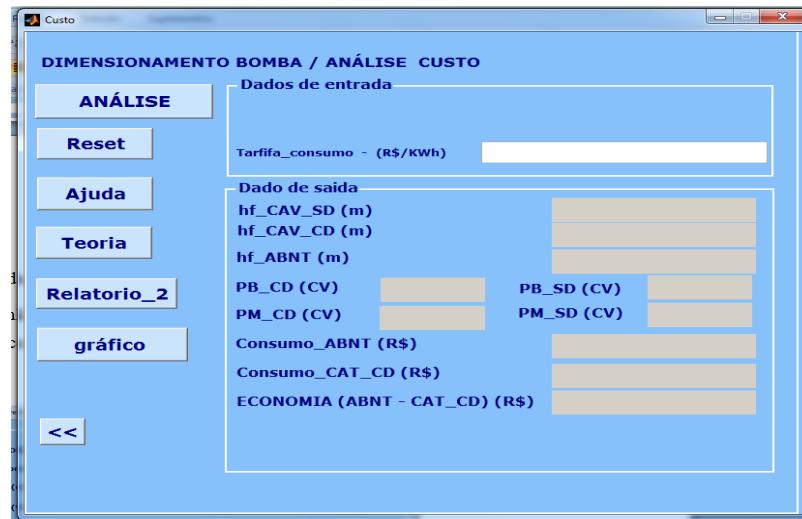


Figura 5.14: Tela “Custo” para sistema elétrico convencional.



Figura 5.15: Tela “Custo2” para sistema elétrico horosazonal.



Figura 5.16: Tela “Custo3” para sistema à combustão.

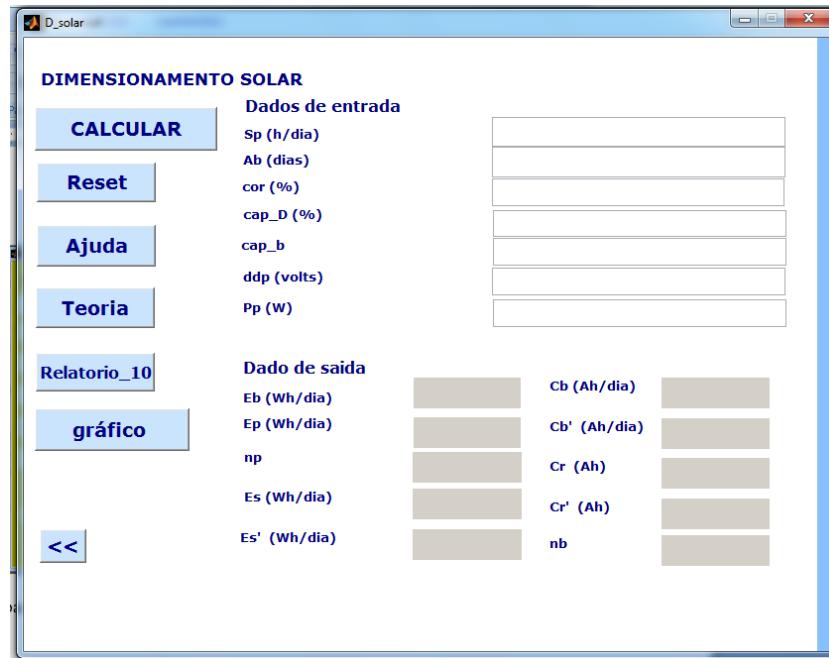


Figura 5.17: Tela “D-Solar” para sistema solar.

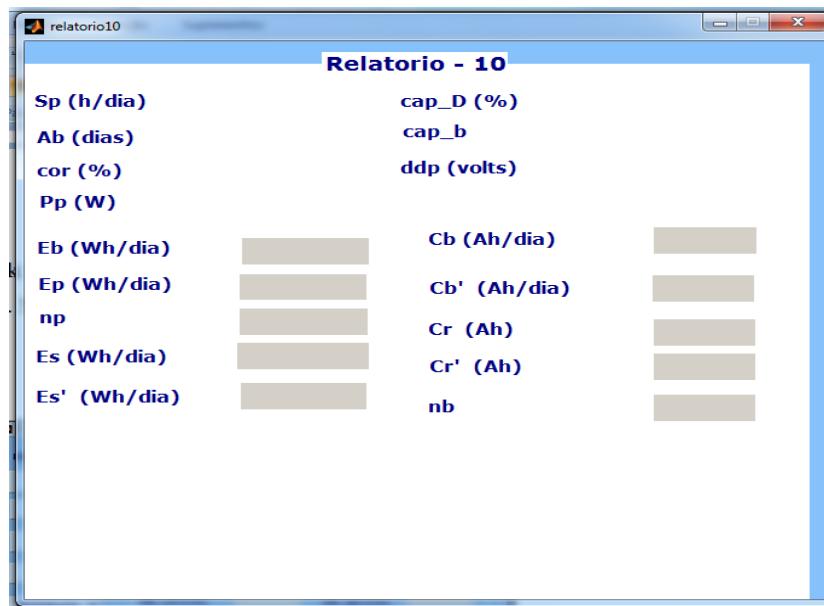


Figura 5.18: Tela “Relatório10” para sistema solar.

5.4.6 Etapa 6: Saída de Dados (Levantamento de custos)

A partir do link “Relatório _2” da tela “Custo”, gera-se a tela “Relatório2” para sistema elétrico convencional (Fig. (5.19)). A partir do link “Relatório _5” da tela “Custo2”, gera-se a tela “Relatório5” para sistema horosazonal (Fig. (5.20)). A

partir do link “Relatório _7” da tela “Custo3”, gera-se a tela “Relatório7” para sistema à combustão (Fig. (5.21)). Da tela “Inicio_2” gera-se a Tela Relatório6a para sistema solar (Fig. (5.22)).



Figura 5.19: Tela “Relatório2” para sistema elétrico convencional.

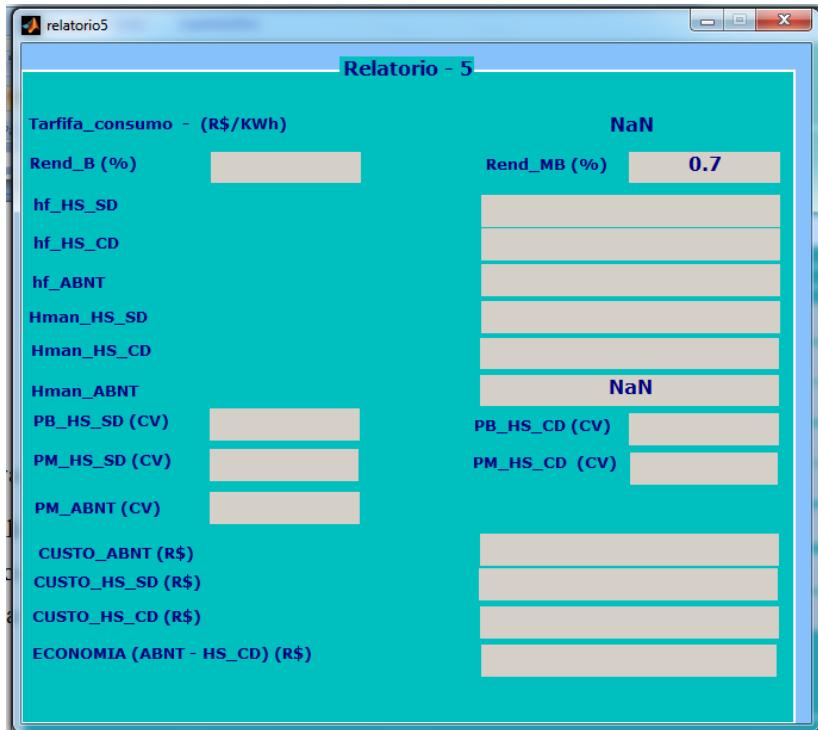


Figura 5.20: Tela “Relatório5” para sistema elétrico horosazonal.

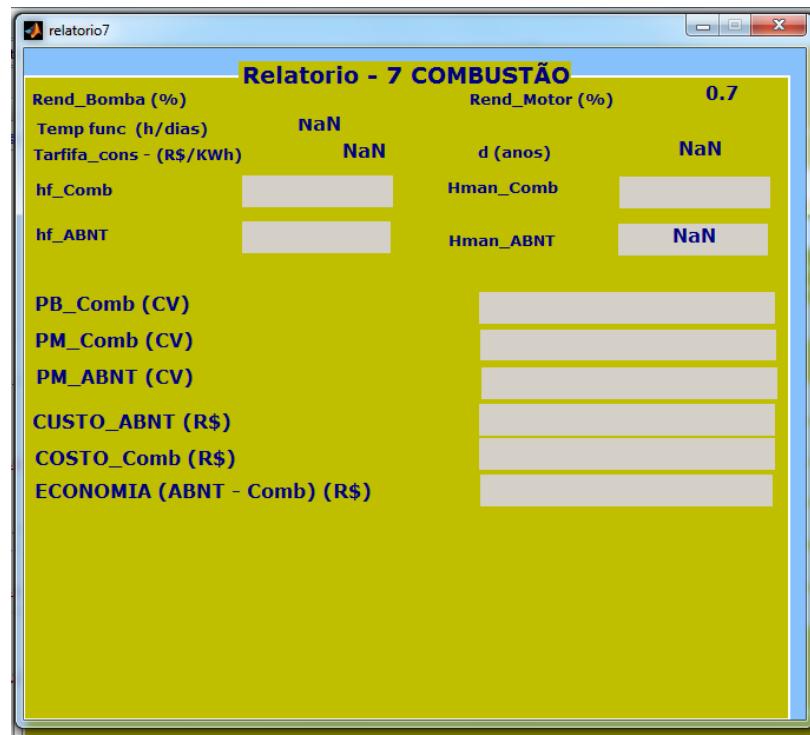


Figura 5.21: Tela “Relatório7” para sistema à combustão.

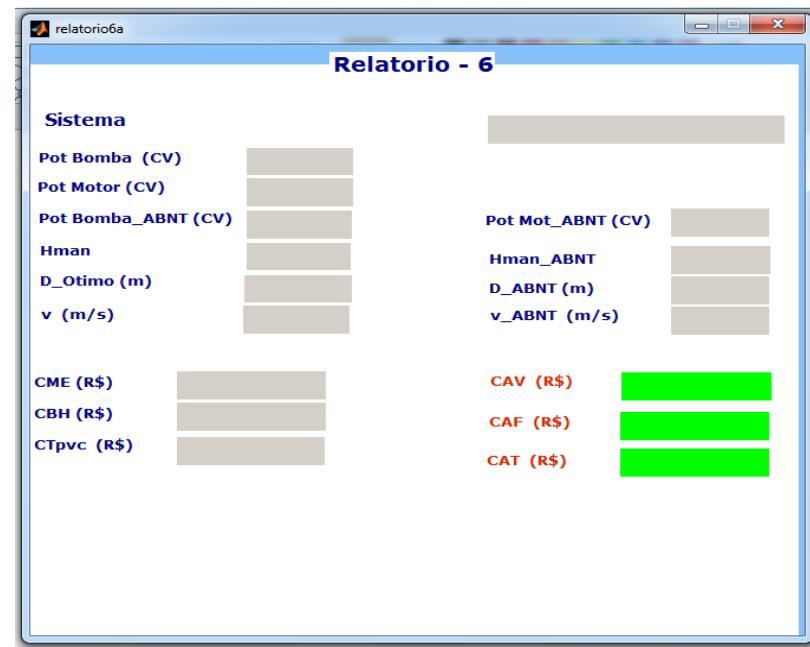


Figura 5.22: Tela “Relatório6a” para sistema solar.

5.4.7 Etapa 7: Comparação dos Sistemas

Na tela “D_Compara” (Fig. (5.23)) é realizada a projeção de custos dos sistemas. Chega-se a esta tela depois de ter realizado todas as operações anteriores, ou após a simulação de cada sistema individual. Quando se retorna à tela “Início_2”, abre-se o link “Compara Sistema para cada um dos sistemas. Na tela “D_Compara” abrindo-se o link “Comparar” obtém-se o resultado de cada sistema.



Figura 5.23: Tela “D_Compara” para comparação de todos os sistemas.

5.4.8 Etapa 8: Projeção de Custos

A tela que mostra a projeção de custos é obtida a partir do link “Projeção” na tela D_Compara, como a ilustrada na Fig. (5.24).

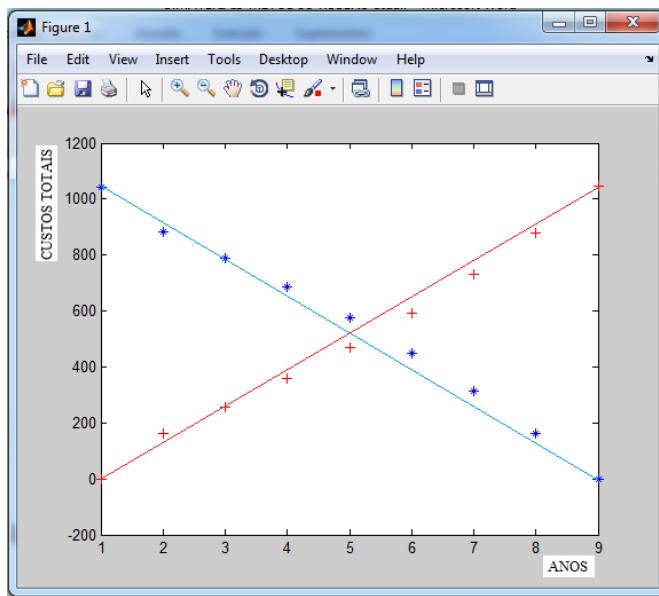


Figura 5.24: Tela **ilustrativa** que gera o gráfico de comparação e projeção dos sistemas na relação custos X anos.

5.5 Condição para um Hectare (Tarifas Reais)

Caso -1: Simulação aplicando-se a condição inicial de um hectare com linha de recalque de 1000 metros, usando as tarifas reais aplicadas pela CEMAR, isto é, grande variação das tarifas de demanda e pequena variação entre as tarifas de consumo entre os dois sistemas, variando-se também as horas de funcionamento da bomba necessária para o bombeamento da água.

Dados:

- $A = 1 \text{ ha} (10.000 \text{ m}^2)$;
- $Qu = 10 \text{ l/m}^2/\text{dia}$;
- $Ln = 1\text{km} (1000 \text{ m})$;
- $Hs = 10 \text{ m}$;
- $Hr = 10 \text{ m}$;
- $Rad = 5,00 \text{ Kwh/m}^2$.
- $Ta = 5 \text{ h}$

Resultados numéricos e gráficos:

A Figura (5.25)apresenta os resultados na tela “D_compara”. As Fig. (5.25) a Fig. (5.29) mostram a projeção dos custos entre os sistemas, tomando-se como referência o solar em relação aos demais.

COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS						
COMPARAR	Dado de saída					
	ELÉTRICO		HOROSAZONAL		COMBUSTÃO	
Fonte Água:	Rio/Riacho/Córrego		Rio/Riacho/Córrego		Rio/Riacho/Córrego	
d (m)	SD	CD	SD	CD		
Hm (m)	36.4763	27.7304	61.1613	61.0511	29.5071	39.2895
PB (CV)	4.47525	3.40222	7.50383	7.49031	3.6202	4.8204
PM (CV)	5.81782	4.42289	9.0046	8.98838	4.70626	6.26652
CAV (R\$)	622.213	742.625	505.301	505.622	705.369	952.991
CAF (R\$)	5682.11	6212.86	4385.04	4386.42	4397.44	49175.9
CAT (R\$)	6304.32	6955.48	4890.34	4892.04	5102.81	48602.5
TIPO DE BOMBA:	Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H	Radial-EIXO_H
	Projecão				<<	

Figura 5.25: Resultados para a condição de um hectare (Caso – 1).

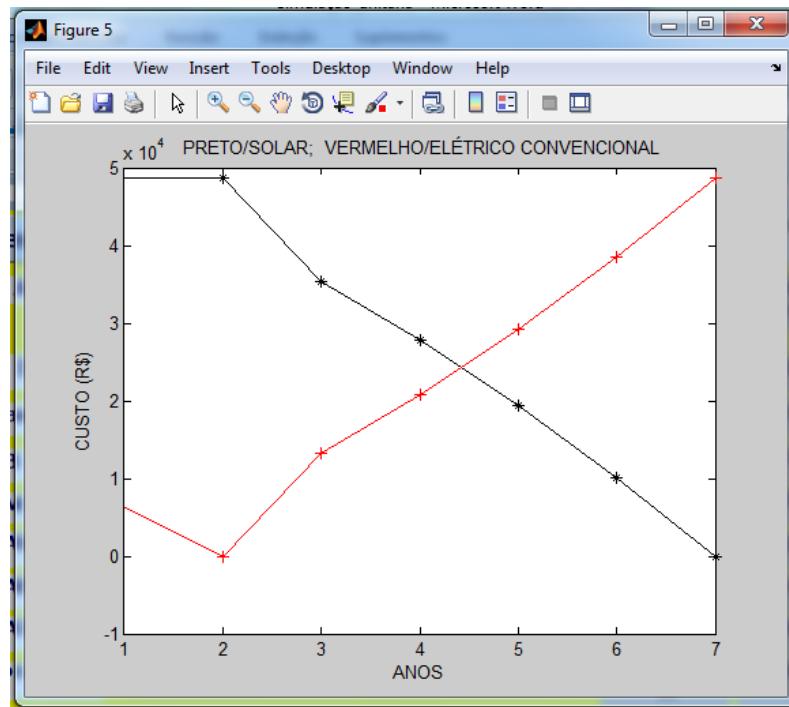


Figura 5.26: Gráfico da relação do CAT entre energia elétrica convencional e solar (Caso - 1).

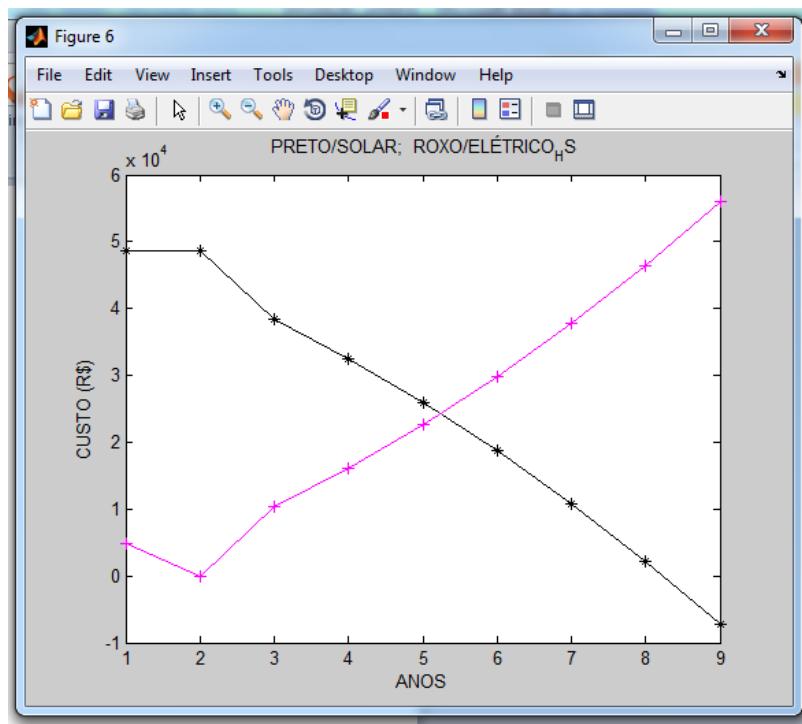


Figura 5.27: Gráfico da relação do CAT entre energia elétrica horosazonal e solar (Caso -1).

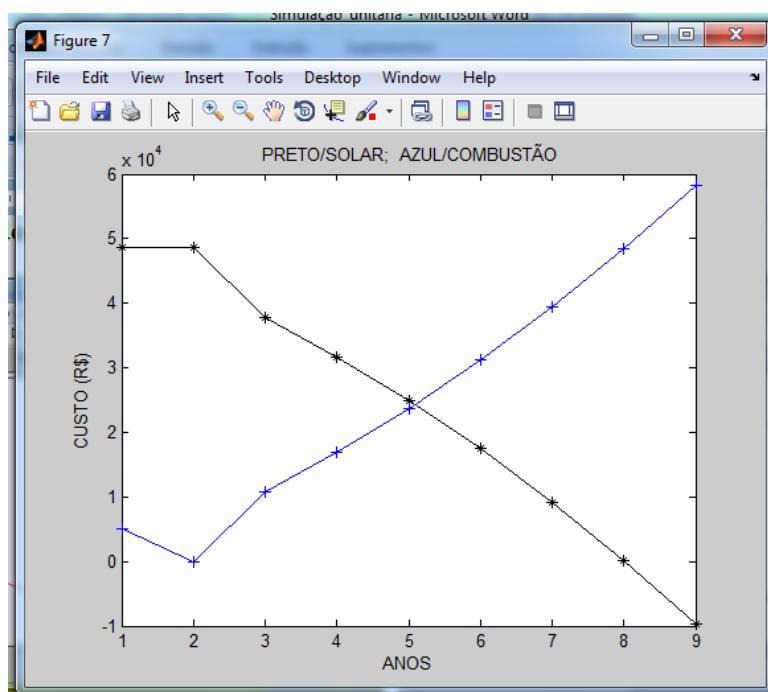


Figura 5.28: Gráfico da relação do CAT entre energia à combustão e solar (Caso – 1).

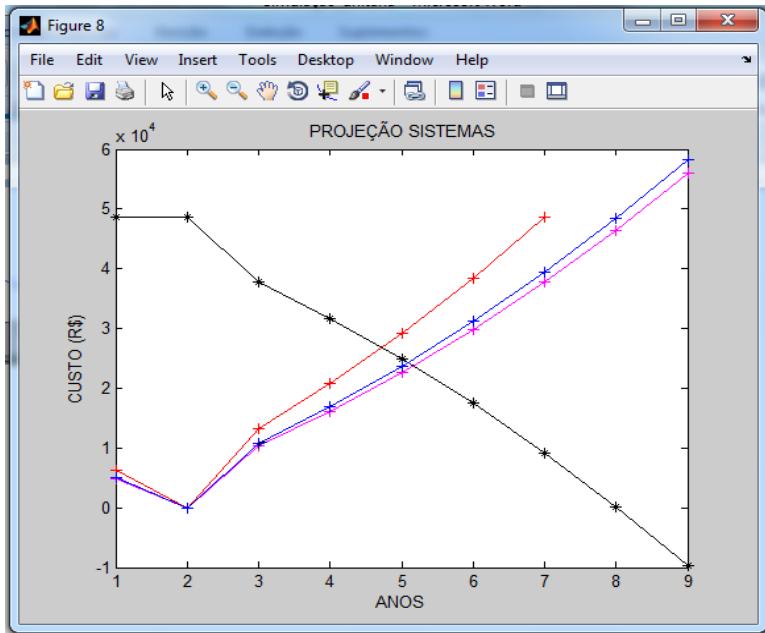


Figura 5.29: Gráfico da relação do CAT entre todas as fontes de energia (Caso – 1)

Nesse cenário, observa-se o alto custo de investimento realizado com energia solar em detrimento de outras fontes. Isso se explica pelos altos valores cobrados pelas placas solares de silício, pelas baterias e outros equipamentos necessários a sua implantação. Novas tecnologias já estão surgindo no mercado visando a redução do preço das placas e, com isso, favorecendo seu uso para a agricultura familiar.

Relacionando-se as outras fontes percebe-se um custo total menor na energia elétrica horosazonal e um maior na energia elétrica convencional. Deve-se isso ao fato da redução dos custos variáveis (custo da energia), pois as tarifas são menores nos horários de desconto e em períodos do ano. Na energia a combustão sua variação ocorre sempre que há aumento do valor do combustível, que deve ser alterada ao longo do ano.

No gráfico que relaciona as fontes de energia com a solar, verifica-se que há um aumento constante das demais fontes de energia ao longo dos anos (sempre crescente), enquanto que o custo da energia solar vai caindo constantemente até chegar em um certo horizonte onde os custos dessa fonte serão mínimos enquanto os outros continuam crescendo. A partir do ponto de interseção da linha de crescimento com a de decaimento os custos de energia solar já são menores até chegar em um ponto onde serão os mínimos possíveis e se manterão fixos dessa forma. Nesse momento pode-se afirmar que a partir daí a energia solar torna-se mais viável economicamente, pagando seus custos de investimento.

5.6 Condição para um Hectare (Resultados com Tarifação Diferenciada)

Caso - 2: Simulação aplicando-se a condição onde o consumo de demanda convencional diferente do consumo de demanda horosazonal, isto é, com variação das tarifas de demanda e as tarifas de consumo entre os sistemas, variando-se também as horas de uso da bomba necessárias ao bombeamento da água (tarifas reais: CEMAR).

Dados:

- $A = 1 \text{ ha} (10.000 \text{ m}^2)$;
- $Qu = 10 \text{ l/m}^2/\text{dia}$;
- $Ln = 1\text{km} (1000 \text{ m})$;
- $Hs = 10 \text{ m}$;
- $Hr = 10 \text{ m}$;
- $Rad = 5,00 \text{ Kwh/m}^2$;
- $Ta = 6 \text{ h}$.

Resultados numéricos e gráficos:

A Fig.(5.30) apresenta os resultados na tela “D_compara”. As Fig. (5.31) a Fig. (5.34) mostram a projeção dos custos entre os sistemas, tomando-se como referência o solar em relação aos demais.

The screenshot shows a software window titled "D_compara". The main title is "COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS". Below it is a sub-section titled "Dados de saída" with a button "ELÉTRICO". There are four tabs: "CONVENCIONAL", "HOROSAZONAL", "COMBUSTÃO", and "SOLAR". Under each tab, there are two sub-tabs: "Açude/Lago/Reservatório" and "Açude/Lago/Reservatório". The table contains data for various parameters: d (m), Ham (m), PB (CV), PM (CV), CAV (R\$), CAF (R\$), and CAT (R\$). The last row shows the "TIPO DE BOMBA:" as "Radial-EIXO_H". At the bottom left is a "Projeção" button, and at the bottom right is a "<<" button.

Fonte Água:	Açude/Lago/Reservatório		Açude/Lago/Reservatório		Açude/Lago/Reservatório		Açude/Lago/Reservatório	
	SD	CD	SD	CD	SD	CD	SD	CD
d (m)	0.08984	0.09462	0.07303	0.07305	0.09902	0.08407		
Ham (m)	34.212	30.8371	62.9282	62.866	28.4735	40.2406		
PB (CV)	3.70583	3.34025	6.81635	6.80961	3.08423	4.35884		
PM (CV)	4.81758	4.34233	8.17962	8.17153	4.0095	5.66649		
CAV (R\$)	593.082	631.484	461.306	461.588	667.003	1180.92		
CAF (R\$)	3920.85	4090.39	4044.94	4045.62	4093.76	60464.4		
CAT (R\$)	4513.93	4721.87	4506.25	4507.21	4760.76	60226.9		
TIPO DE BOMBA:	Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H	Radial-EIXO_H		
	Projeção				<<			

Figura 5.30: Comparação de sistemas com tarifas diferenciadas (Caso – 2).

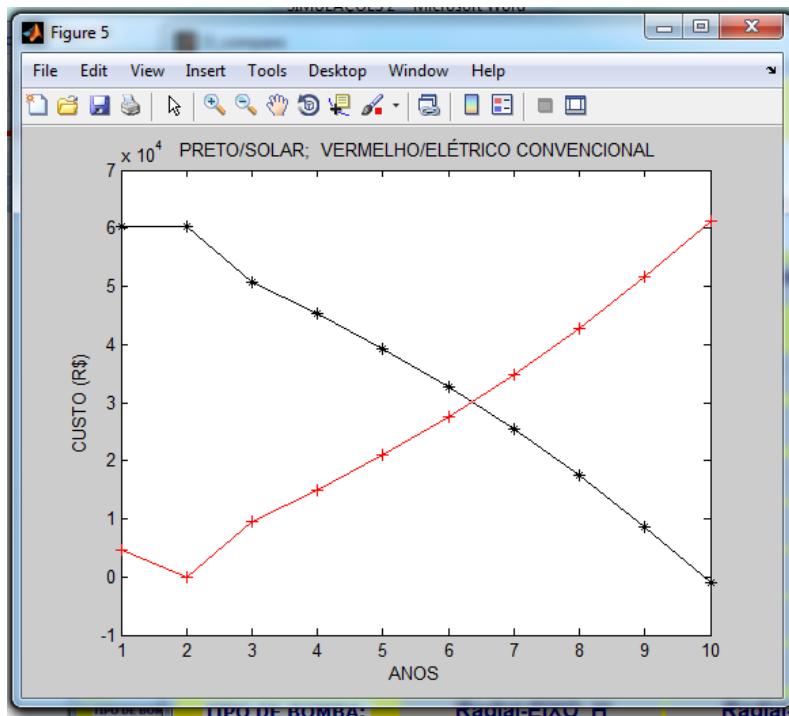


Figura 5.31: Gráfico da relação do CAT entre energia elétrica convencional e solar (Caso -2).

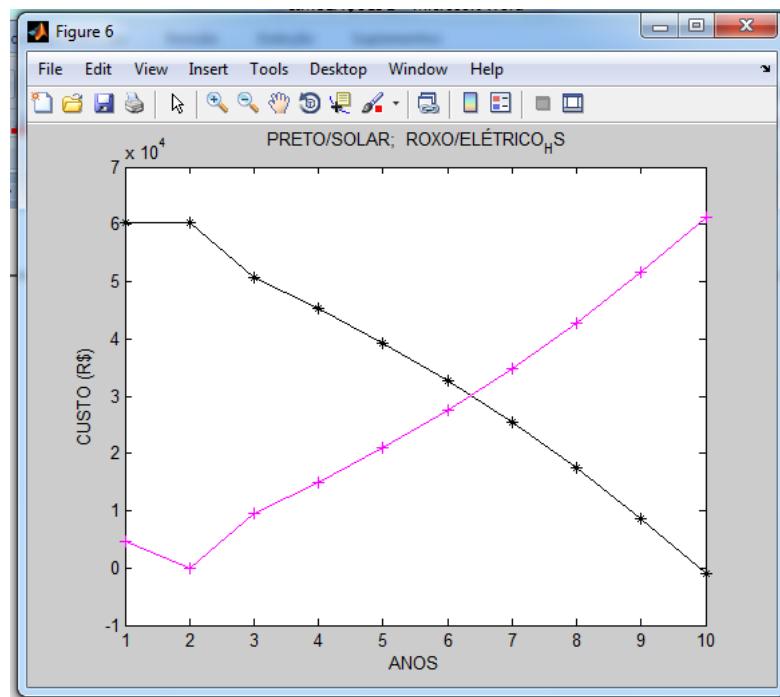


Figura 5.32: Gráfico da relação do CAT entre energia elétrica horosazonal e solar (Caso -2)..

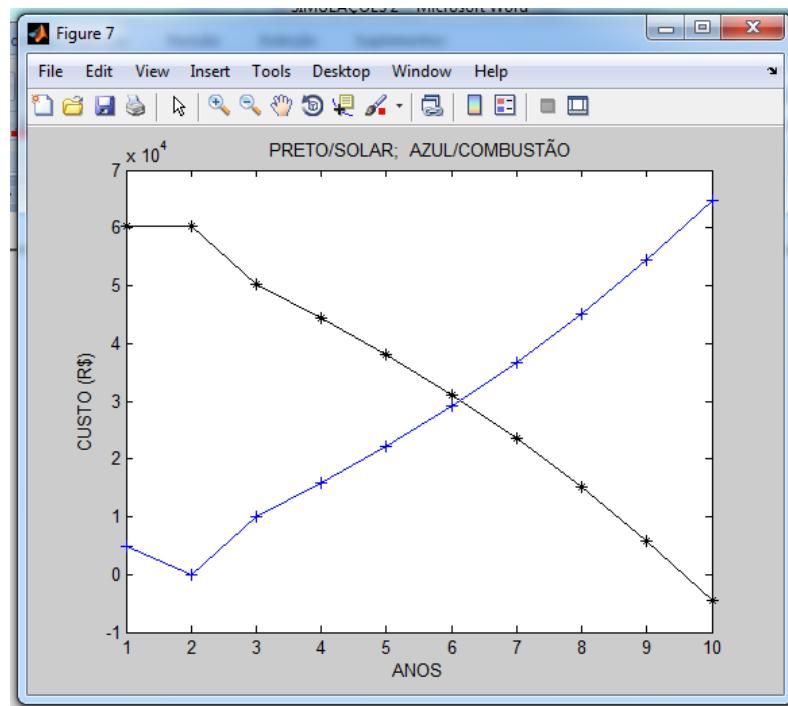


Figura 5.33: Gráfico da relação do CAT entre energia à combustão e solar (Caso – 2).

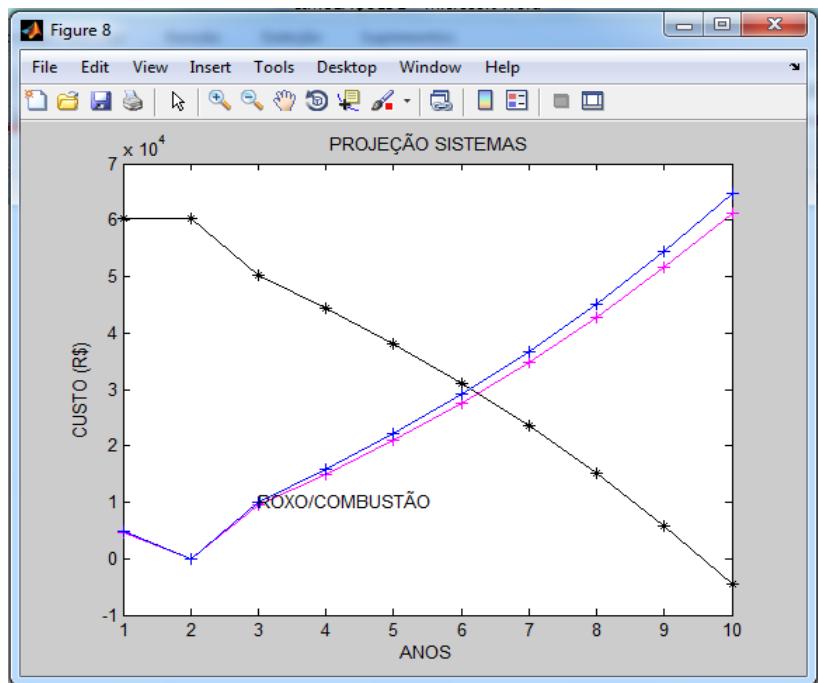


Figura 5.34: Gráfico da relação do CAT entre todas as fontes de energia.

5.7 Resultados de Campo

Nesse caso considerou-se o consumo de demanda convencional como sendo igualao consumo de demanda horosazonal.

Cenário 1:

Dados

- $A = 5 \text{ ha} (50.000 \text{ m}^2)$;
- $Qu = 3 \text{ l/m}^2/\text{dia}$;
- $Ln = 365 \text{ m}$;
- $Hs = 6 \text{ m}$;
- $Hr = 25 \text{ m}$;
- $Rad = 5,94 \text{ Kwh/m}^2$;
- $T_a = 20\text{h}$.

Resultados numéricos e gráficos:

A Fig. (5.35) apresenta os resultados na tela “D_compara”. As Fig. (5.36) a Fig. (5.39) mostram a projeção dos custos entre os sistemas, tomando-se como referência o solar em relação aos demais.

COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS						
Fonte Água:	ELÉTRICO					
	CONVENTIONAL		HOROSAZONAL		COMBUSTÃO	
	Rio/Riacho/Córrego	Rio/Riacho/Córrego	Rio/Riacho/Córrego	Rio/Riacho/Córrego	Rio/Riacho/Córrego	Rio/Riacho/Córrego
d (m)	SD	CD	SD	CD	SD	CD
Ham (m)	0.07442	0.07269	0.0532	0.05322	0.08607	0.06008
PB (CV)	33.9699	34.353	48.7629	48.7278	32.3772	40.2704
PM (CV)	2.15539	2.1797	3.09401	3.09178	2.05433	2.55516
CAV (R\$)	2.80201	2.83361	4.02221	4.01932	2.67063	3.32171
CAF (R\$)	172.842	167.975	114.885	115.028	206.241	1608.15
CAT (R\$)	1643.13	1621.69	1629.62	1629.86	1763.14	81379.6
TIPO DE BOMBA:	1815.97	1789.66	1744.51	1744.88	1969.38	82015.4
	Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H	Radial-EIXO_H
Projeção						<<

Figura 5.35: Resultados na tela “D_compara” – Cenário 1.

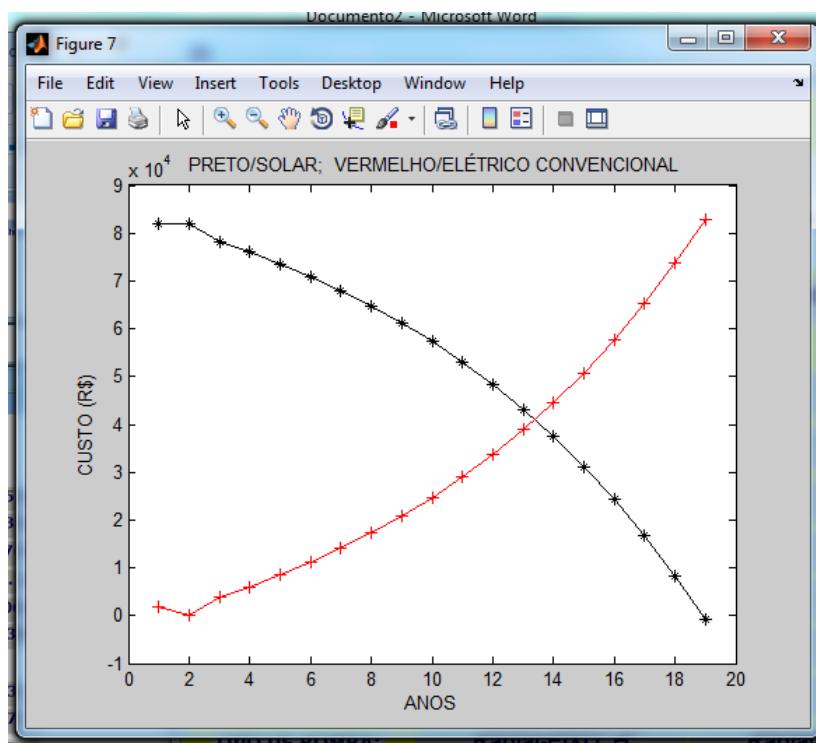


Figura 5.36: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico convencional e solar – Cenário 1.

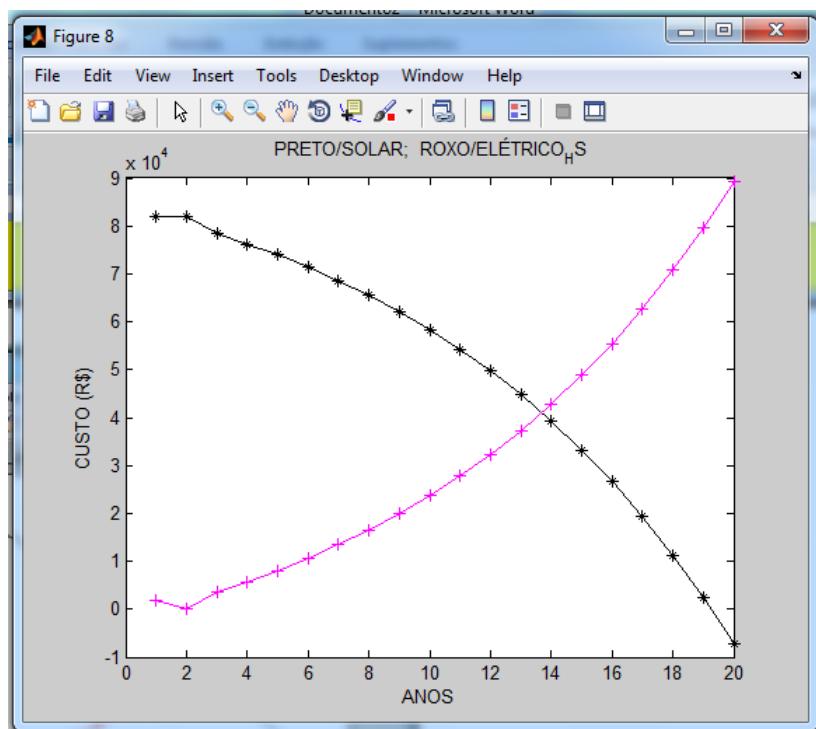


Figura 5.37: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico horosazonal e solar – Cenário 1.

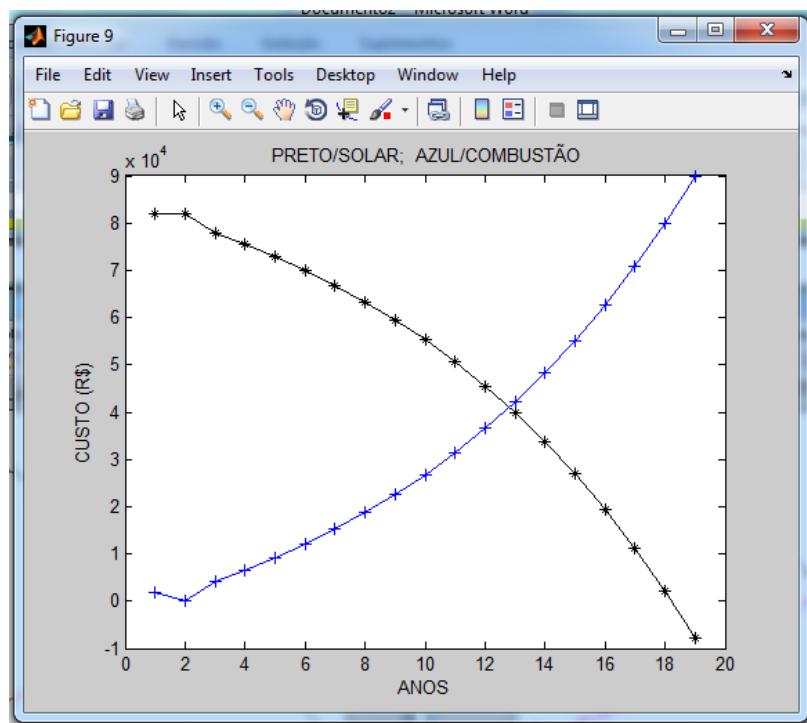


Figura 5.38: Projeção dos custos entre os sistemas à combustão e solar – Cenário 1.

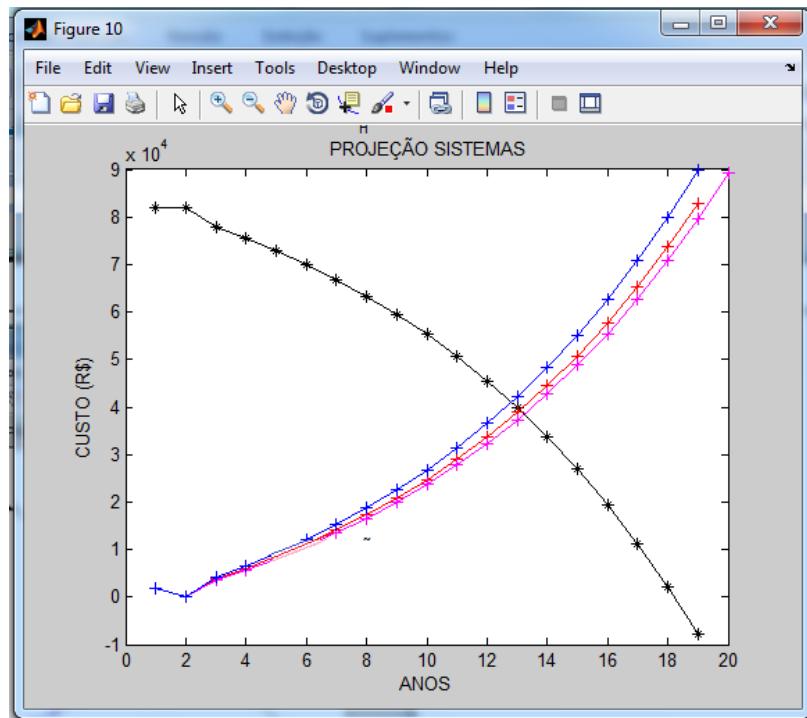


Figura 5.39: Projeção dos custos entre todos os sistemas – Cenário 1.

Cenário 2:

Dados

- $A = 5 \text{ ha} (50.000 \text{ m}^2)$;
- $Qu = 5 \text{ l/m}^2/\text{dia}$;
- $Ln = 365 \text{ m}$;
- $Hs = 6 \text{ m}$;
- $Hr = 25 \text{ m}$;
- $Rad = 5,94 \text{ Kwh/m}^2$;
- $T_a = 20\text{h}$.

Resultados numéricos e gráficos:

A Fig.(5.40) apresenta os resultados na tela “D_compara”. As Fig. (5.41) a Fig.(5.44) mostram a projeção dos custos entre os sistemas, tomando-se como referência o solar em relação aos demais.

The screenshot shows a Windows application window titled "D_compara". The main title is "COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS". On the left, there are two buttons: "COMPARAR" and "Reset". Below these are input fields for "Fonte Água:" (set to "Río/Riacho/Córrego") and "TIPO DE BOMBA:" (set to "Radial-EIXO_H"). The main area contains a table comparing four systems: CONVENCIONAL, ELÉTRICO, HOROSAZONAL, COMBUSTÃO, and SOLAR. The columns represent different system types, and the rows represent various parameters: d (m), Ham (m), PB (CV), PM (CV), CAV (R\$), CAF (R\$), and CAT (R\$). The table values are as follows:

Fonte Água:	CONVENCIONAL		ELÉTRICO		HOROSAZONAL		COMBUSTÃO		SOLAR	
	SD	CD	SD	CD	Río/Riacho/Córrego	Río/Riacho/Córrego	Rio/Riacho/Córrego	Rio/Riacho/Córrego	Rio/Riacho/Córrego	Rio/Riacho/Córrego
d (m)	0.09151	0.08938	0.06536	0.06539	0.10586	0.07446				
Ham (m)	33.7441	34.0933	47.3441	47.3051	32.276	39.1688				
PB (CV)	3.00823	3.03936	4.22065	4.21718	2.87736	1.52349				
PM (CV)	3.91071	3.95117	5.48685	5.48234	3.74057	2.28524				
CAV (R\$)	221.559	215.296	147.305	147.423	264.456	1169.23				
CAF (R\$)	2080.45	2052.98	2049.94	2050.3	2235.42	59159.4				
CAT (R\$)	2302.01	2268.28	2197.25	2197.73	2499.87	59630.9				
TIPO DE BOMBA:	Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H	Radial-EIXO_H				
						<<				
	Projeção									

Figura 5.40: Resultados na tela “D_compara” – Cenário 2.

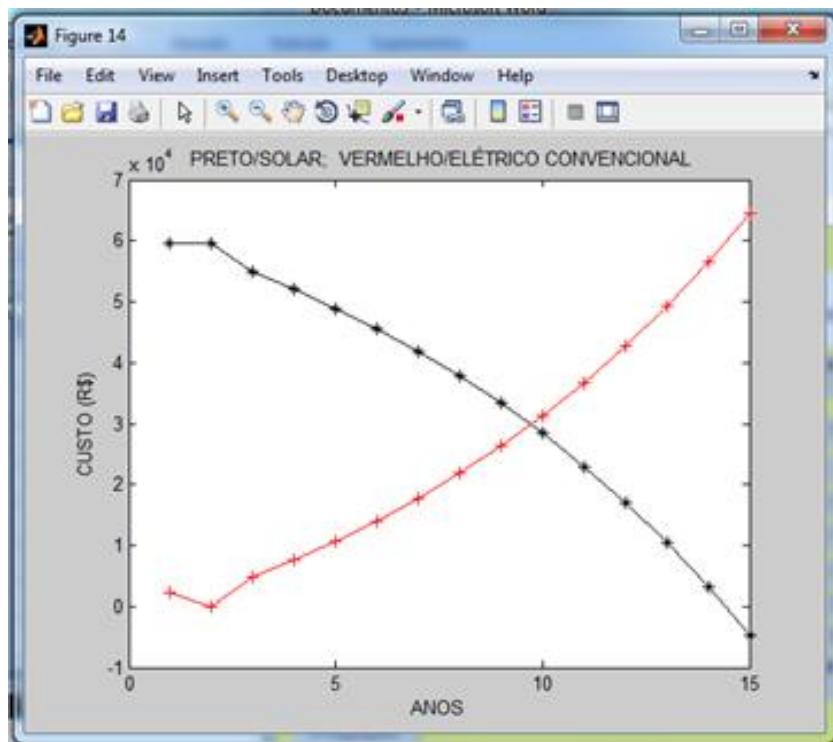


Figura 5.41: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico convencional e solar – Cenário 2.

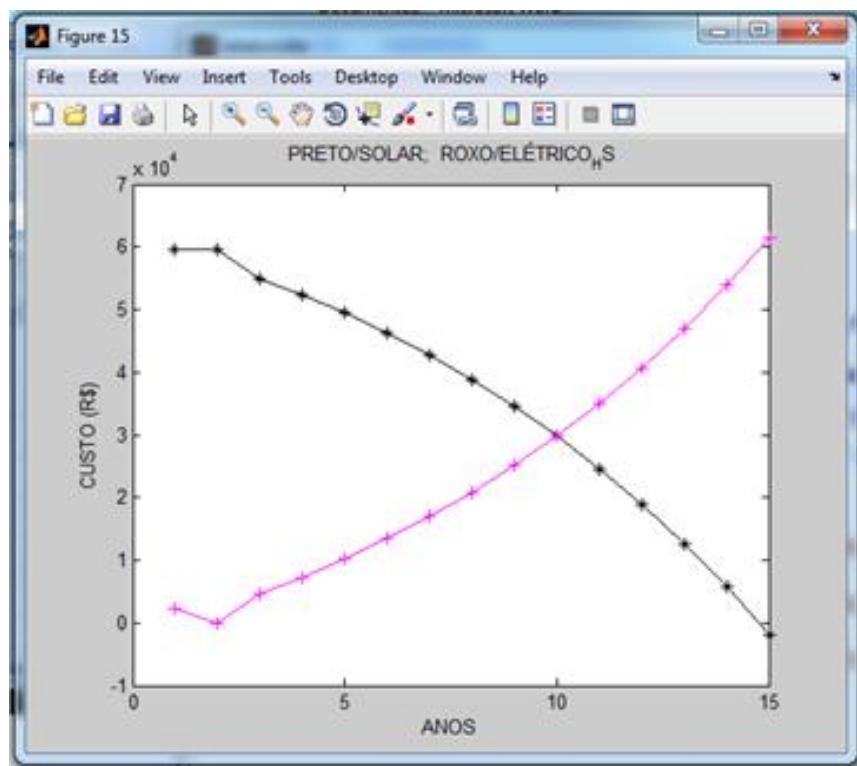


Figura 5.42: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico horosazonal e solar – Cenário 2.

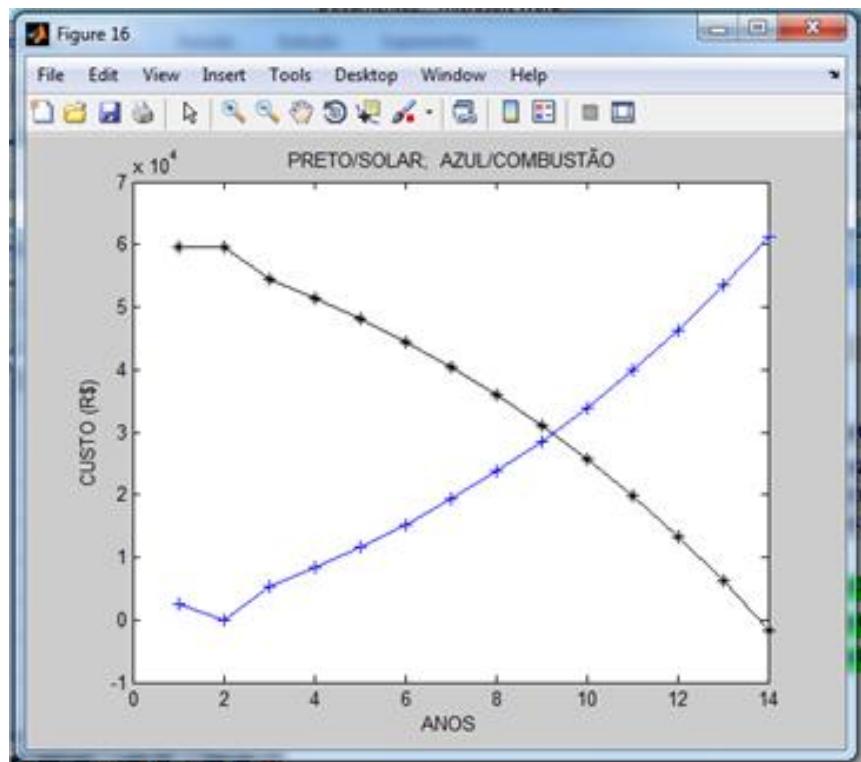


Figura 5.43: Projeção dos custos entre os sistemas combustão e solar – Cenário 2.

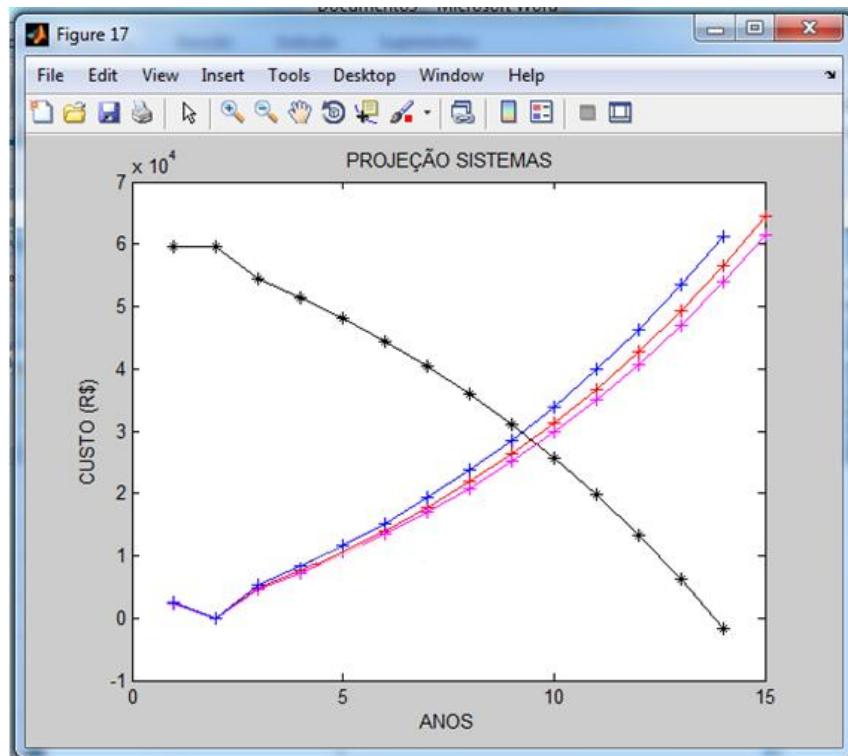


Figura 5.44: projeção dos custos entre todos os sistemas – Cenário 2.

Cenário 3:

Dados

- $A = 5 \text{ ha} (50.000 \text{ m}^2)$;
- $Qu = 7 \text{ l/m}^2/\text{dia}$;
- $Ln = 365 \text{ m}$;
- $Hs = 6 \text{ m}$;
- $Hr = 25 \text{ m}$;
- $Rad = 5,94 \text{ Kwh/m}^2$;
- $T_a = 20\text{h}$.

Resultados numéricos e gráficos:

A Fig. (5.45) apresenta os resultados na tela “D_compara”. As Fig. (5.46) a Fig. (5.49) mostram a projeção dos custos entre os sistemas, tomando-se como referência o solar em relação aos demais.

COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS					
COMPARAR		Dado de saída			
		ELÉTRICO			
		CONVENTIONAL		HOROSAZONAL	
Fonte Água:		Rio/Riacho/Córrego		Rio/Riacho/Córrego	
		SD	CD	SD	CD
d (m)		0.10495	0.1025	0.07492	0.07496
Ham (m)		33.6026	33.9309	46.4463	46.4038
PB (CV)		3.76302	3.79978	5.20133	5.19658
PM (CV)		4.89192	4.93972	6.2416	6.23589
CAV (R\$)		261.234	253.9	173.69	173.76
CAF (R\$)		2443.82	2411.37	4008.94	4009.44
CAT (R\$)		2705.05	2665.27	4182.63	4183.2
TIPO DE BOMBA:		Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H	
		Radial-EIXO_H		Radial-EIXO_H	
Projecão		<<			

Figura 5.45: Resultados na tela “D_compara” – Cenário 3.

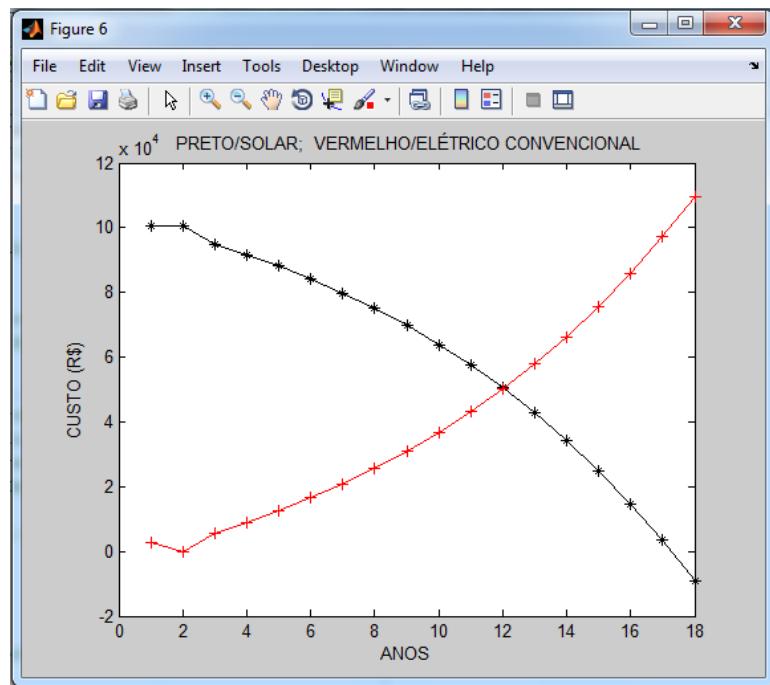


Figura 5.46: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico convencional e solar – Cenário 3.

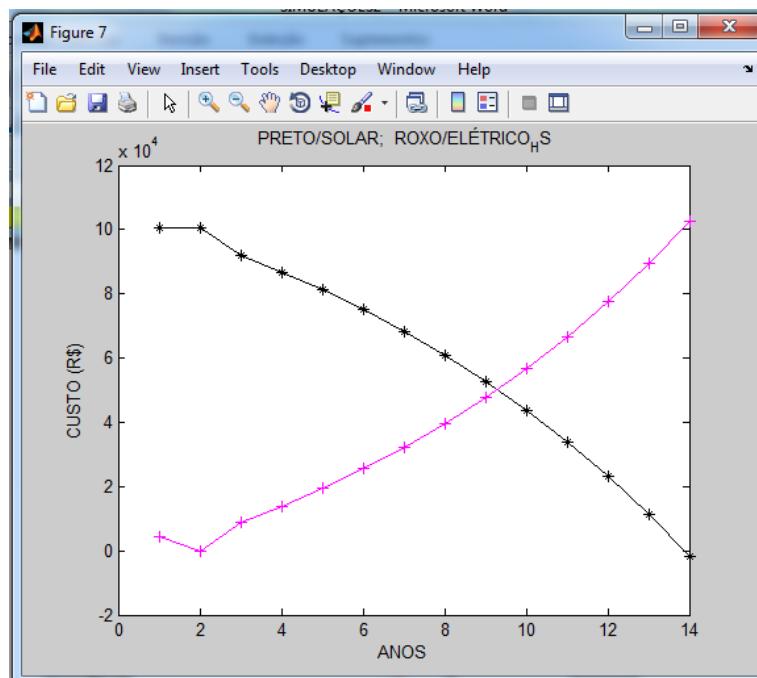


Figura 5.47: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico horosazonal e solar – Cenário 3.

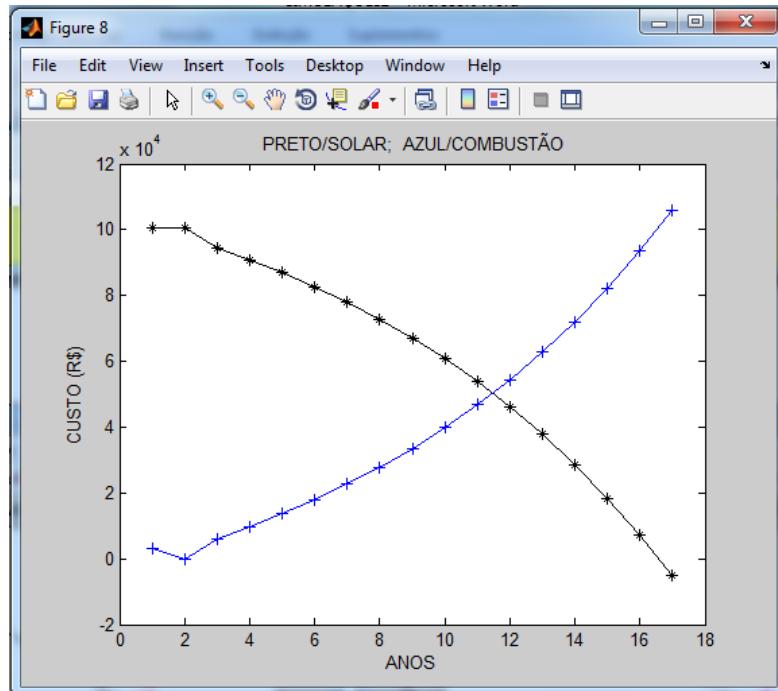


Figura 5.48: Projeção dos custos entre os sistemas combustão e solar – Cenário 3.

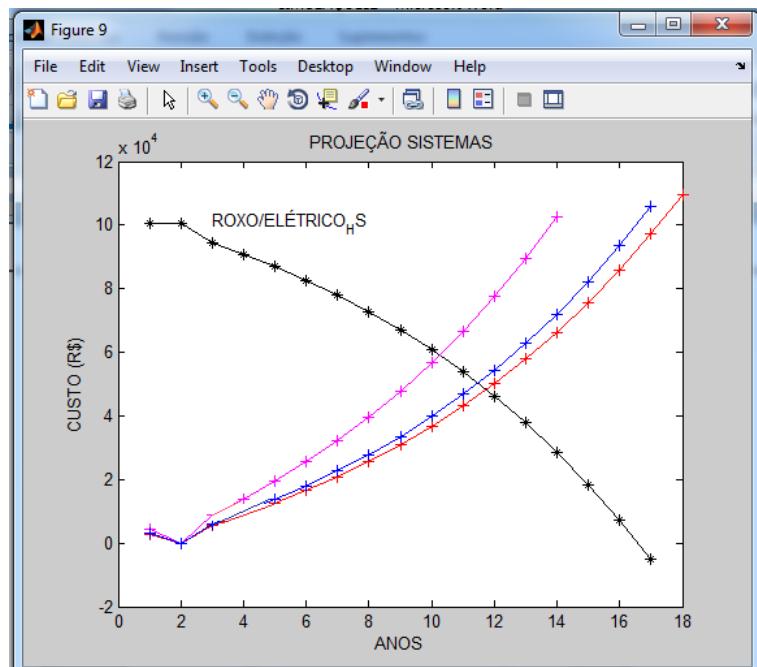


Figura 5.49: Projeção dos custos entre todos os sistemas – Cenário 3.

Cenário 4:

Dados:

- $A = 20 \text{ ha} (2000.000 \text{ m}^2)$;
- $Qu = 3 \text{ l/m}^2/\text{dia}$;
- $Ln = 160 \text{ m}$;
- $Hs = 0 \text{ m}$;
- $Hr = 15 \text{ m}$;
- $Rad = 5,94 \text{ Kwh/m}^2$;
- $T_a = 5\text{h}$.

Resultados numéricos e gráficos:

A Fig. (5.50)apresenta os resultados na tela “D_compara”. As Fig. (5.51) a Fig. (5.54) mostram a projeção dos custos entre os sistemas, tomando-se como referência o solar em relação aos demais.

The screenshot shows a software window titled "D_compara". The main title is "COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS". Below it, there's a section labeled "Dado de saída" with a "ELÉTRICO" header and four sub-options: "CONVENCIONAL", "HOROSAZONAL", "COMBUSTÃO", and "SOLAR". A "Fonte Água:" dropdown menu is open, showing four options: "Poço", "SD", "CD", and "Poço". The table below contains data for each system under each water source. At the bottom left is a "Projeção" button, and at the bottom right is a "<<" button.

Fonte Água:	Poço		Poço		Poço	Poço
	SD	CD	SD	CD		
d (m)	0.21884	0.25353	0.18405	0.18414	0.2429	0.22108
Ham (m)	16.382	15.8456	18.2651	18.2587	15.828	16.3143
PB (CV)	14.5617	14.085	16.2357	16.2299	14.0693	14.5016
PM (CV)	16.746	16.1977	18.671	18.6644	16.1797	16.6768
CAV (R\$)	276.676	330.52	224.476	224.647	313.802	2313.07
CAF (R\$)	9125.37	9361.2	9364.51	9365.09	9147.23	123532
CAT (R\$)	9402.04	9691.72	9588.98	9589.74	9461.04	117966
TIPO DE BOMBA:	Radial-EIXO_V		Radial-EIXO_V		Radial-EIXO_V	Radial-EIXO_V
	Projeção			<<		

Figura 5.50: Resultados na tela “D_compara” – Cenário 4.

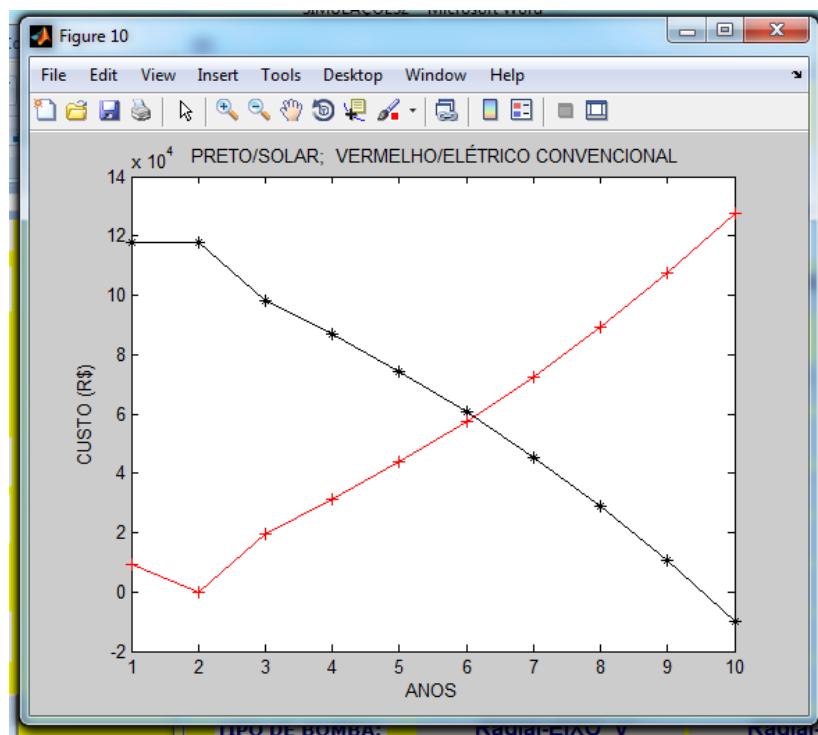


Figura 5.51: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico convencional e solar – Cenário 4.

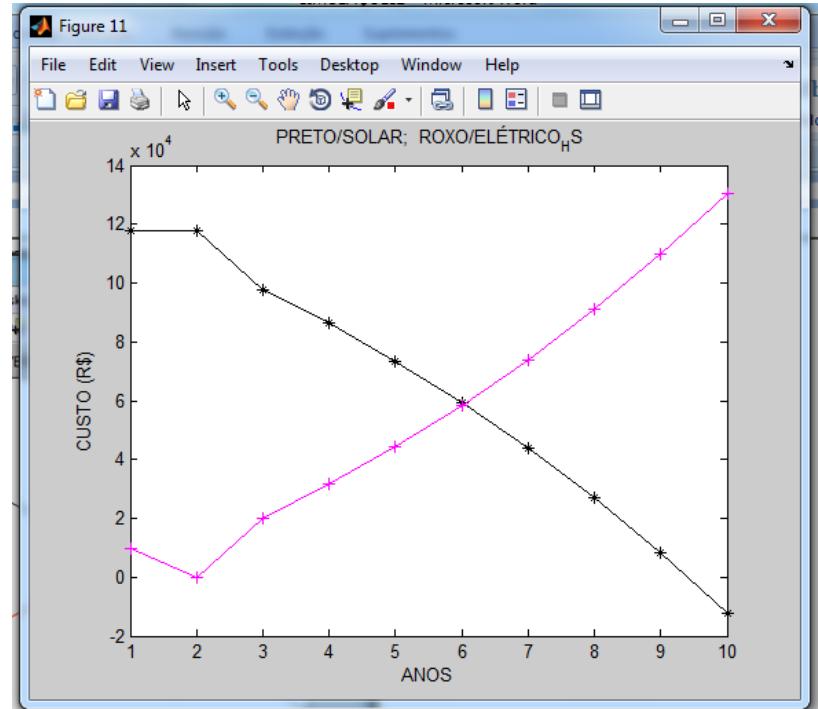


Figura 5.52: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico horosazonal e solar – Cenário 4.

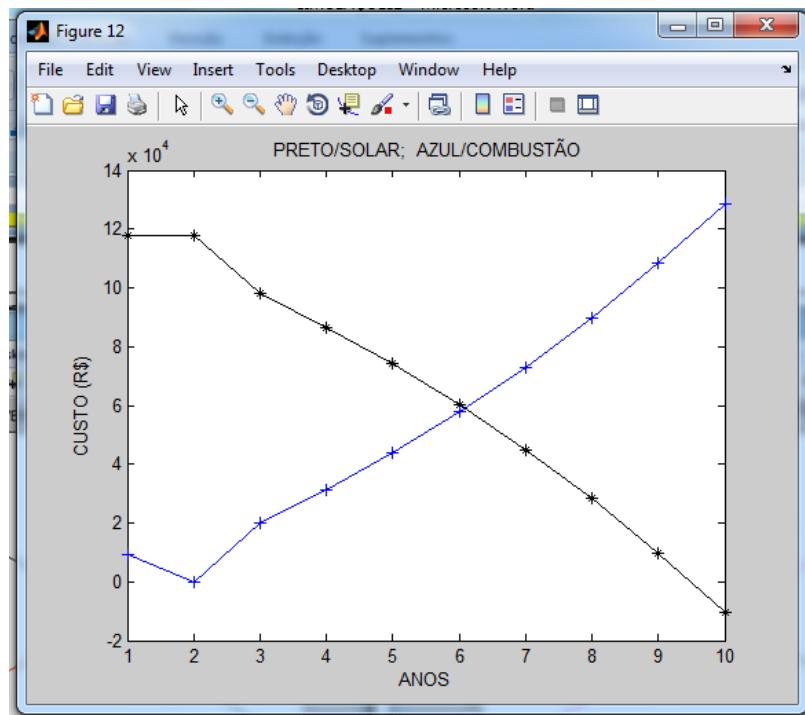


Figura 5.53: Projeção dos custos entre os sistemas combustão e solar – Cenário 4.

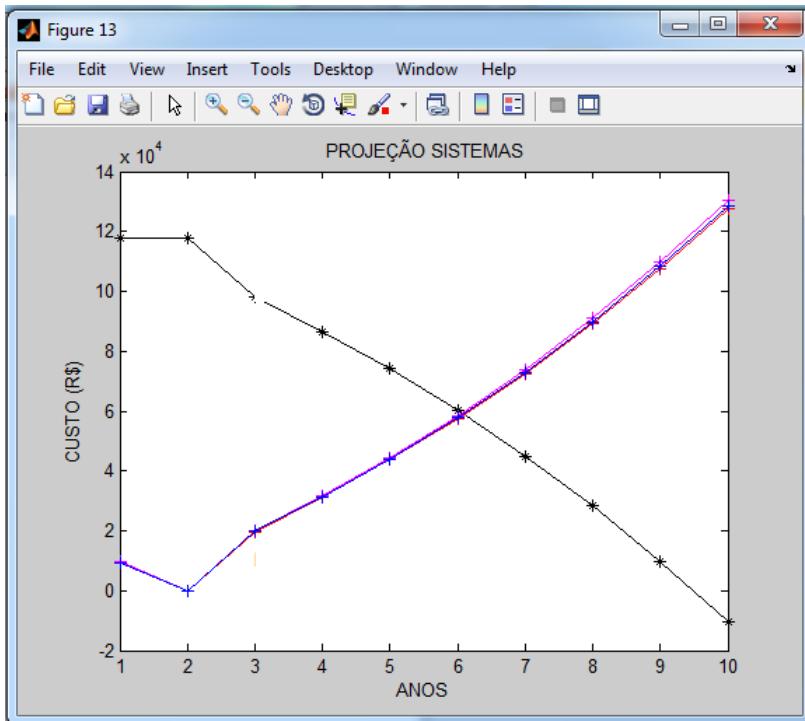


Figura 5.54: Projeção dos custos entre todos os sistemas – Cenário 4.

Cenário 5:

Dados:

- $A = 20 \text{ ha} (200.000 \text{ m}^2)$;
- $Qu = 5 \text{ l/m}^2/\text{dia}$;
- $Ln = 365 \text{ m}$;
- $Hs = 6 \text{ m}$;
- $Hr = 25 \text{ m}$;
- $Rad = 5,94 \text{ Kwh/m}^2$;
- $T_a = 12\text{h}$

Resultados numéricos e gráficos:

A Fig.(5.55)apresenta os resultados na tela “D_compara”. As Fig. (5.56) a Fig. (5.59) mostram a projeção dos custos entre os sistemas, tomando-se como referência o solar em relação aos demais.

Fonte Água:	ELÉTRICO					
	CONVENTIONAL	HOROSAZONAL	COMBUSTÃO	SOLAR	Poço	Poço
	SD	CD	SD	CD		
d (m)	0.20292	0.21212	0.15436	0.15444	0.23252	0.18351
Ham (m)	15.9709	15.821	18.8224	18.814	15.4961	16.6016
PB (CV)	9.20666	9.12024	10.8504	10.8456	8.93294	9.57022
PM (CV)	11.048	10.9443	12.478	12.4724	10.7195	11.4843
CAV (R\$)	252.883	266.772	181.737	181.838	298.134	3346.51
CAF (R\$)	7404.24	7465.25	7606.9	7607.4	7514.76	173721
CAT (R\$)	7657.12	7732.03	7788.64	7789.24	7812.89	170672
TIPO DE BOMBA:	Radial-EIXO_V		Radial-EIXO_V		Radial-EIXO_V	Radial-EIXO_V
	Projeção			<<		

Figura 5.55: Resultados na tela “D_compara” – Cenário 5.

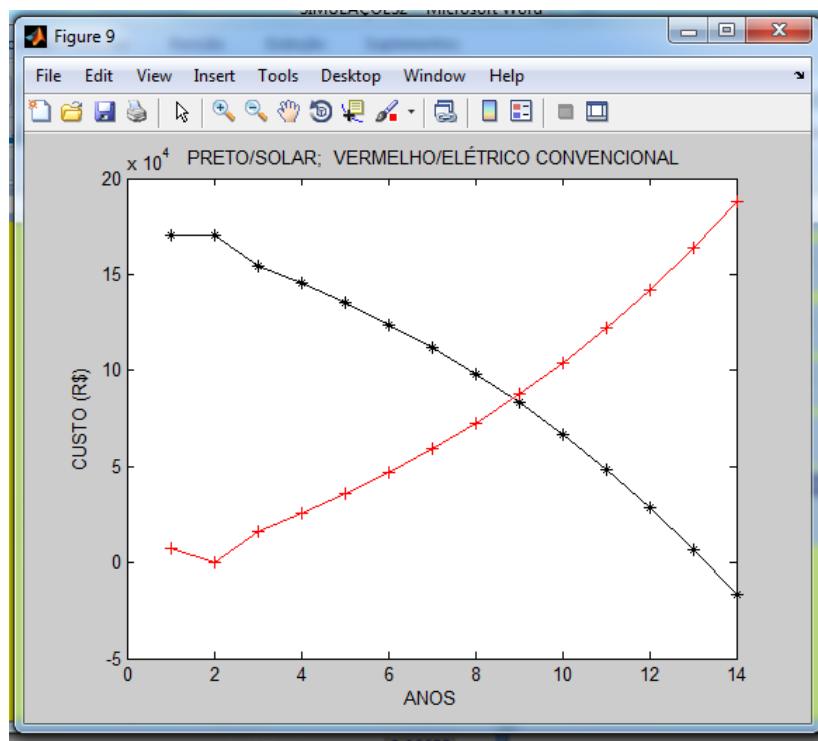


Figura 5.56: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico convencional e solar – Cenário 5.

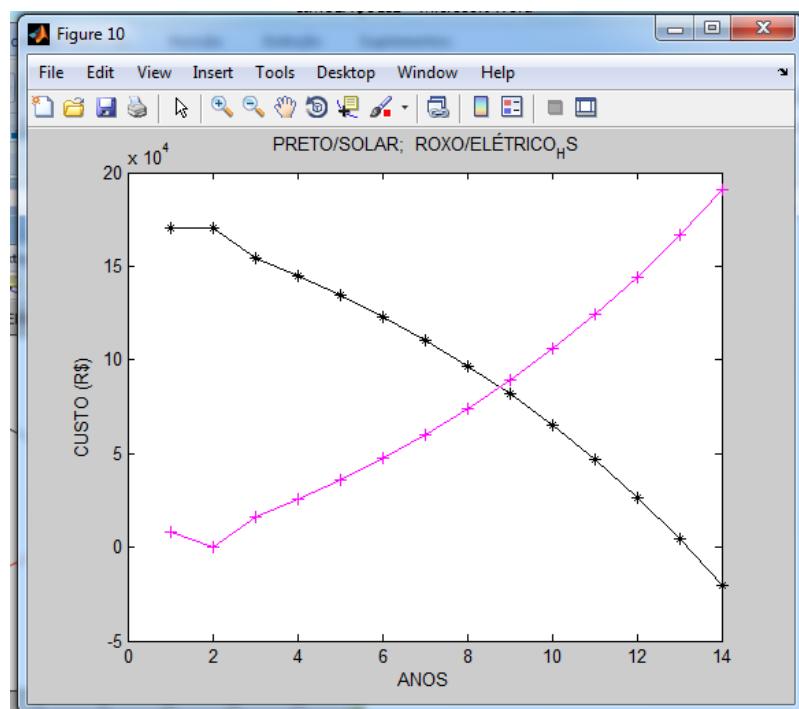


Figura 5.57: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico horosazonal e solar – Cenário 5.

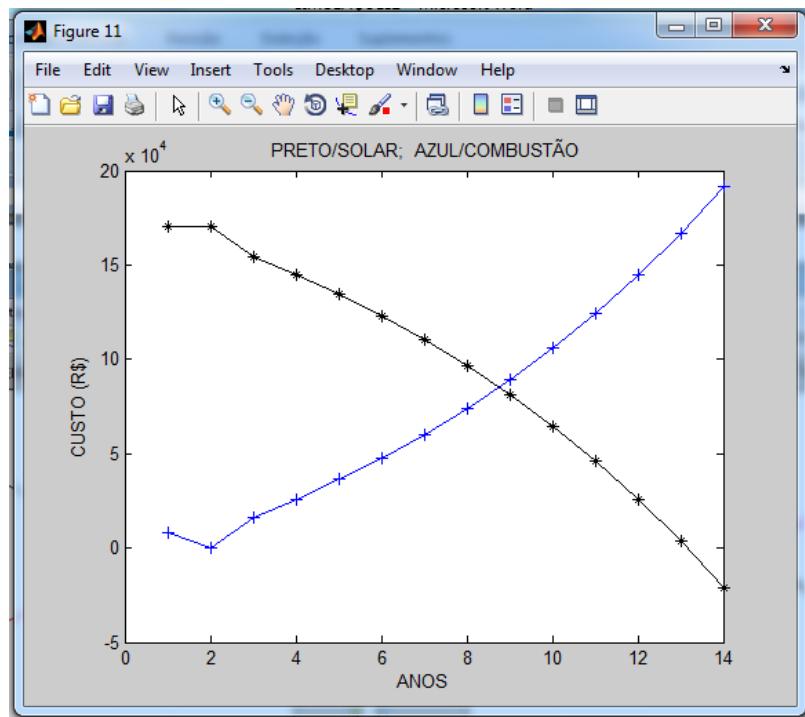


Figura 5.58: Projeção dos custos entre os sistemas combustão e solar – Cenário 5.

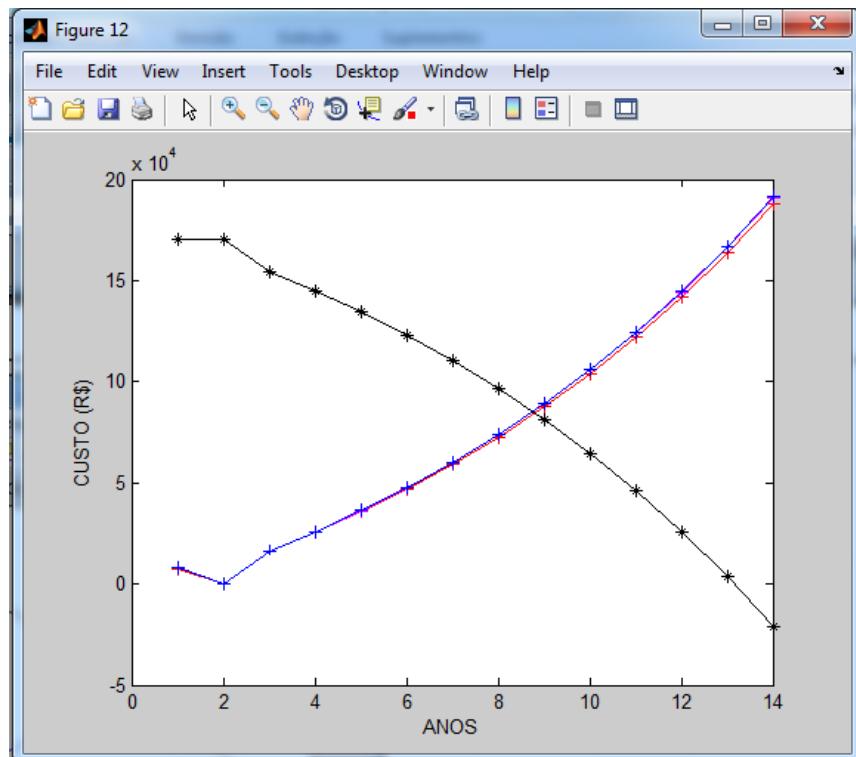


Figura 5.59: Projeção dos custos entre todos os sistemas – Cenário 5.

Cenário 6:

Dados:

- $A = 20 \text{ ha} (200.000 \text{ m}^2)$;
- $Qu = 7 \text{ l/m}^2/\text{dia}$;
- $Ln = 365 \text{ m}$;
- $Hs = 6 \text{ m}$;
- $Hr = 25 \text{ m}$;
- $Rad = 5,94 \text{ Kwh/m}^2$;
- $T_a = 12\text{h}$.

Resultados numéricos e gráficos:

A Fig. (5.60) apresenta os resultados na tela “D_compara”. As Fig. (5.61) a Fig. (5.64) mostram a projeção dos custos entre os sistemas, tomando-se como referência o solar em relação aos demais.

The screenshot shows a software window titled "D_compara". The main title is "COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS". Below it, there are tabs for "COMPARAR" and "Dados de saída". Under "Dados de saída", there are four sub-tabs: "ELÉTRICO", "CONVENCIONAL", "HOROSAZONAL", "COMBUSTÃO", and "SOLAR". The "ELÉTRICO" tab is selected. A "Fonte Água:" dropdown menu is open, showing options: "Poço", "SD", "CD", "Poço", "Poço", and "Poço". Below this, there is a table comparing values for various parameters across these five categories. At the bottom left is a "Projeção" button, and at the bottom right is a "<<" button.

Fonte Água:	Poço		Poço		Poço	Poço		
	SD	CD	SD	CD				
d (m)	0.2394	0.25026	0.18204	0.18214	0.27437	0.21812		
Ham (m)	15.8404	15.7185	18.261	18.2537	15.4328	16.3279		
PB (CV)	13.6892	13.5839	15.7811	15.7748	13.337	14.1105		
PM (CV)	15.7426	15.6215	18.1483	18.141	15.3376	16.2271		
CAV (R\$)	308.415	325.427	221.584	221.672	363.649	4564.99		
CAF (R\$)	9013.5	9087.85	9225.89	9226.54	9152.53	236016		
CAT (R\$)	9321.91	9413.28	9447.48	9448.21	9516.18	232814		
TIPO DE BOMBA:	Radial-EIXO_V		Radial-EIXO_V		Radial-EIXO_V	Radial-EIXO_V		
	Projeção							
	<<							

Figura 5.60: Resultados na tela “D_compara” – Cenário 6.

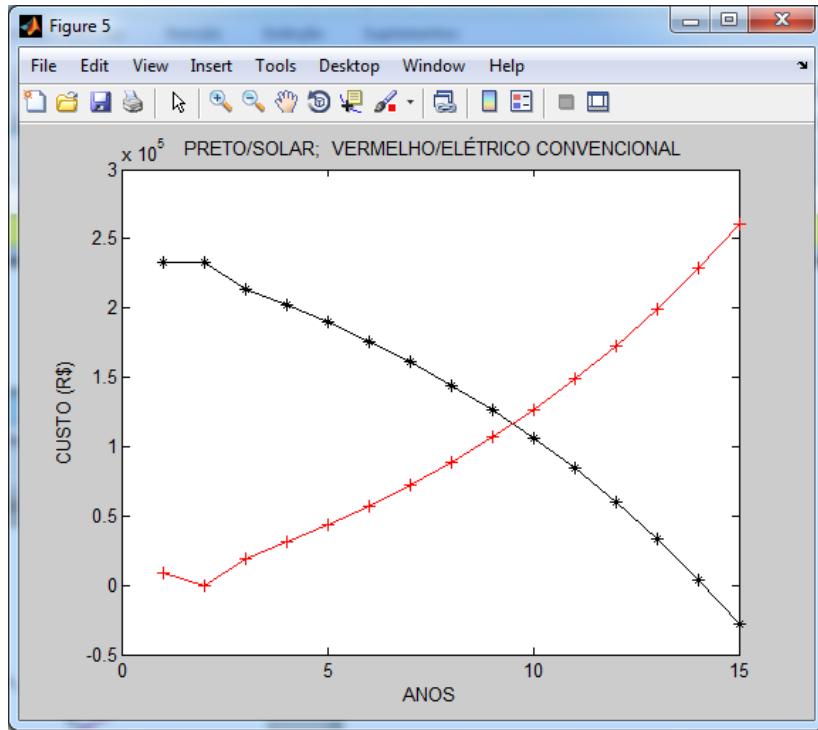


Figura 5.61: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico convencional e solar – Cenário 6.

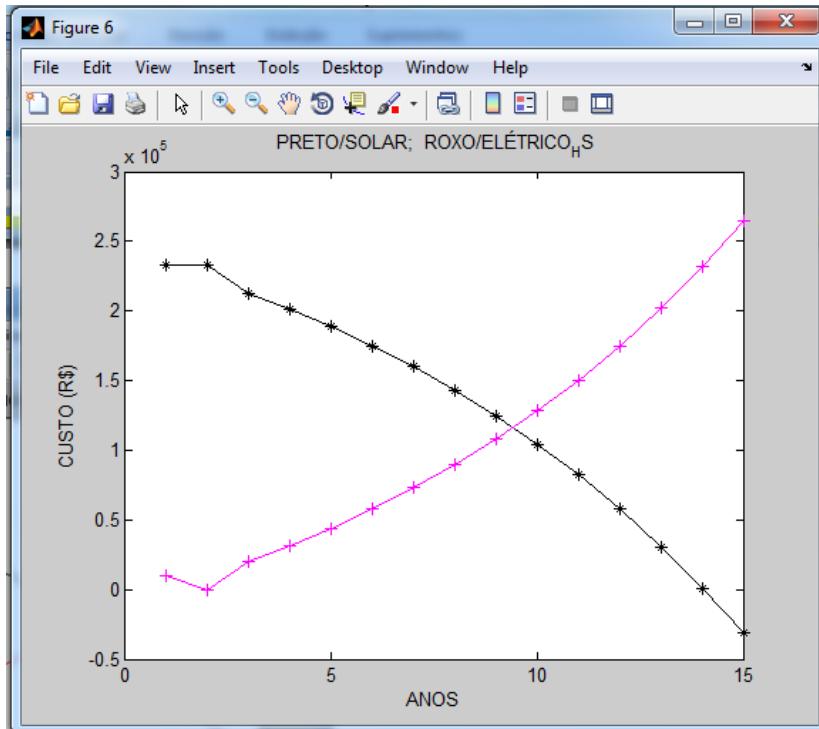


Figura 5.62: Projeção dos custos entre os sistemas elétrico horosazonal e solar – Cenário 6.

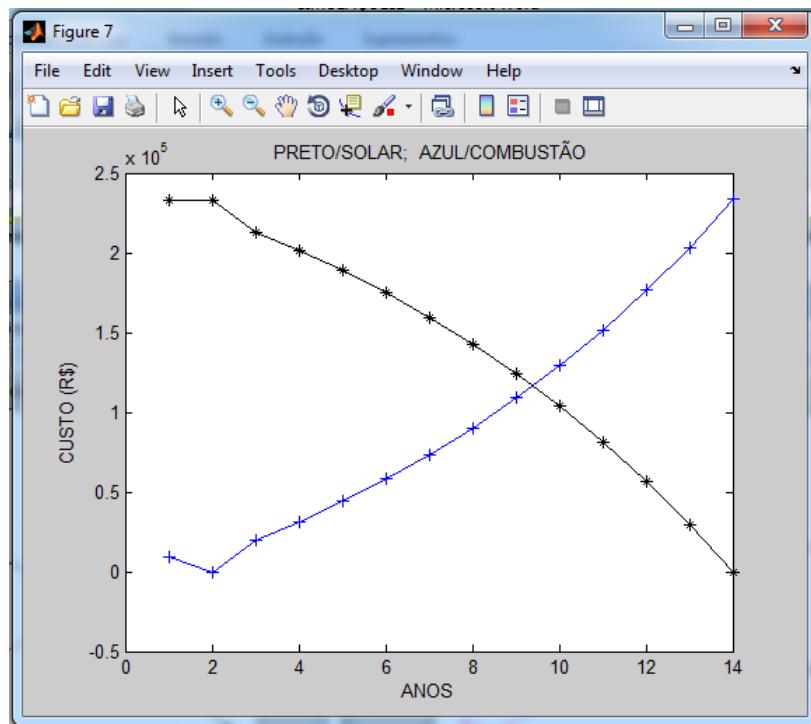


Figura 5.63: Projeção dos custos entre os sistemas combustão e solar – Cenário 6.

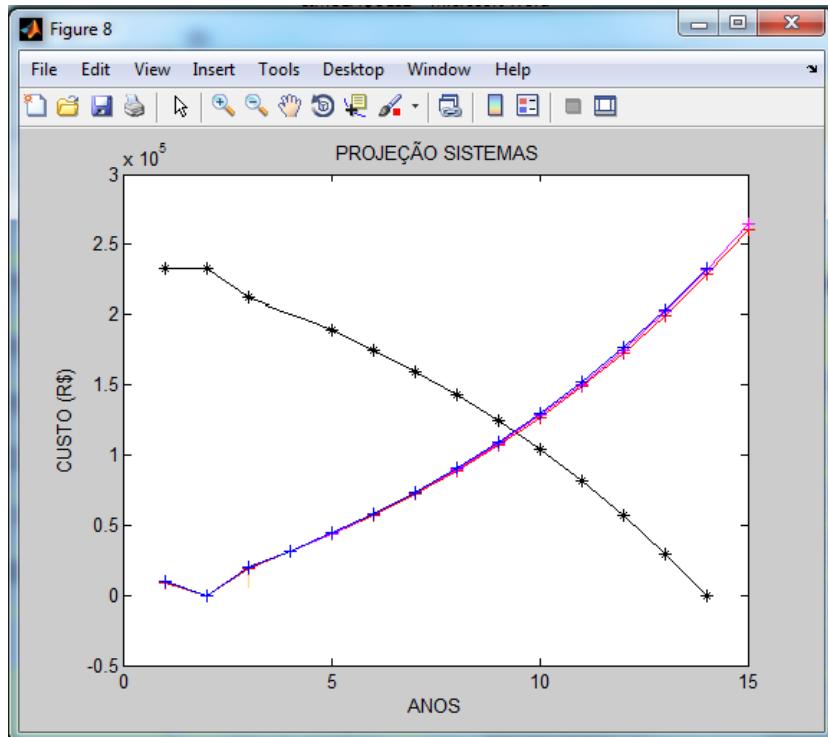


Figura 5.64: Projeção dos custos entre todos os sistemas – Cenário 6.

Uma análise dos resultados revela o alto custo de investimento realizado com energia solar em detrimento de outras fontes. Esse investimento deve ser amortizado no decorrer dos anos com o custo operacional mínimo obtido pelo uso das placas solares. Na projeção verificada na Fig. (5.64), por exemplo, os custos com investimento em energia solar são pagos em um período de nove anos, pelo alto investimento feito. Após esse prazo, os custos de energia elétrica e combustão continuam crescendo, devido os custos operacionais, enquanto que os custos com energia solar tendem a cair muito até chegar próximo de zero.

Assim, o tempo de vida útil de cada sistema em relação ao retorno de investimento no final de vida útil gera o sistema solar mais atrativo para o agricultor ao final do ciclo. A perspectiva dos sistemas solares é de uma vida útil em torno de 25 anos. Como foi visto nos casos citados, todos os sistemas solares mostraram nos gráficos a integralização dos custos em períodos inferiores a metade de seu tempo de vida útil, o que viabiliza muito seu uso. Em algumas situações, pode-se perceber o retorno de investimentos em menos de um quarto de vida útil do sistema solar, tornando-o ainda mais atrativo.

Relacionando-se as outras fontes percebe-se um custo total menor na energia elétrica horosazonal e um maior na energia elétrica convencional. Deve-se isso ao fato da redução dos custos variáveis, pois as tarifas são menores nos horários de desconto e em períodos do ano. Na energia a combustão sua variação ocorre se há aumento do valor do combustível.

No gráfico que relaciona as fontes de energia com a solar, percebe-se que há um aumento constante das demais fontes de energia ao longo dos anos (sempre crescente), enquanto que o custo da energia solar vai caindo constantemente até chegar a certo horizonte onde os custos dessa fonte serão mínimos enquanto os outros continuam crescendo. A partir do ponto de interseção da linha de crescimento com a de decaimento os custos de energia solar já são menores até chegar a um ponto onde serão os mínimos possíveis e se manterão fixos dessa forma. Nesse momento pode-se afirmar que a partir daí a energia solar torna-se mais viável economicamente, pagando seus custos de investimento.

CAPÍTULO VI

Conclusões

As condições existentes em campo oferecem múltiplas possibilidades de escolha de bomba para atender determinada necessidade de irrigação. As características físicas da região influenciam na demanda e devem ser analisadas para definir a escolha adequada. As fontes de água existentes devem ser observadas e analisadas quanto à possibilidade da definição da bomba. Nesse caso, a demanda de água tem que ser captada de uma fonte que tenha vazão suficiente para atender essa necessidade durante o tempo que for necessário. Caso seja de um reservatório, este deve ser dimensionado de forma que atenda as demandas hídricas das culturas a serem irrigadas.

Assim, faz-se necessário um estudo prévio dessas fontes para se verificar se atendem as necessidades do projeto, sendo a fonte que estiver disponível: rio, açude, barragem ou poço. No caso do poço, deve ser observado e analisado o lençol freático em relação à profundidade, volume de água e propriedades físicas e químicas.

Diante do exposto e dos resultados apresentados foi desenvolvido um *software* denominado *Irrigare 1.0* em código computacional MATLAB, através do qual possibilitou analisar o dimensionamento do sistema de irrigação a partir da utilização das principais fontes de energia: elétrica convencional, elétrica horosazonal, combustão e solar, apresentando uma plataforma amigável com o usuário, em que são definidas as fontes de energia, fonte de água, tipo de bomba a ser empregada no processo de irrigação, definida pela otimizaçãoem função do custo anual total(CAT) e do tipo de energia, segundo o critério de custo total mínimo.

Foram realizados seis estudos de casos na região Sudoeste do Maranhão, nas proximidades da cidade Imperatriz, em duas regiões distintas, variando-se alguns dados de entrada, em que através das simulações e análises dos resultados possibilitou a comprovação dos estudos de caso usando o *software* proposto, uma vez que os resultados gerados estão em acordo com os observados na literatura existente que discorre sobre o assunto. Ou seja, a potência da bomba está compatível com o esperado para cada sistema simulado, com o diferencial de que o programa dispõe de potências e diâmetros mais econômicos quando analisados os custos fixos e variáveis separadamente e depois em conjunto resultando nos custos totais.

Também foi feita uma análise pra uma condição de um hectare com a finalidade de expor um resultado para uma área unitária e assim ter um resultado padrão de dimensionamento e análise de custos. Em outra situação foi verificado o comportamento dos custos quando se mantém o consumo de demanda convencional igual ao consumo de demanda horosazonal. Aqui se pode perceber a importância da variação de tarifas para a obtenção de desconto para o agricultor, onde a redução da tarifa horosazonal possibilita um menor custo variável.

Foi verificado que no dimensionamento, com base nos dados de campo e características dos materiais, obteve-se um diâmetro ótimo e a respectiva velocidade econômica. Esse diâmetro aumenta os custos fixos, mas permite obter economia nos custos variáveis, pois reduz o custo com bombeamento, com redução do consumo de energia, no caso de fonte de energia elétrica convencional ou horosazonal. Para energia solar o diâmetro ótimo aumenta o custo anual fixo, pela aquisição dos materiais não interferindo no custo anual variável.

No tipo de energia à combustão o diâmetro ótimo provoca a redução do consumo de diesel, com a perda de carga reduzida pelo aumento do diâmetro. Portanto, aumenta os custos fixos e reduz custos variáveis.

Na análise do custo anual total, que é influenciado pelos custos fixos e variáveis, foi verificado que no primeiro ano a influência é bem maior. Nos anos seguintes esta ocorre devido os custos variáveis e pelas parcelas do custo fixo referente a dada pela amortização anual (AMA) e remuneração anual (REA).

6.1 Considerações Finais

As diferentes modalidades de tarifação praticadas pela ANEEL permitem uma economia quando o sistema é direcionado para ter atenção às diferentes faixas de cobrança, evitando o abastecimento do reservatório ou irrigação nos horários de pico e menor utilização no período seco, quando as tarifas são mais elevadas. Uma atenção especial deve ser dada ao horário especial com desconto para irrigantes, quando se obtém uma redução de tarifas de 70% entre as 23 h e 5 h, reduzindo-se, assim, os custos.

Por esse motivo, é sempre necessário e econômico ter uma atenção com os equipamentos, principalmente com a manutenção e troca do conjunto motobomba.

A situação atual deve ser sempre diagnosticada para propor uma solução energética otimizada. No caso de tempo de funcionamento do conjunto motobomba, se este for reduzido, segundo o Teorema de Bernoulli, a vazão total é mantida, pois a vazão unitária não varia para determinada cultura dada. Nesse caso, outras variáveis são necessariamente modificadas: velocidade e pressão. A perda de carga varia conforme possíveis variações no diâmetro do tubo. Este pode manter-se fixo, segundo os princípios observados na Equação da Continuidade.

Caso o sistema possua baixa eficiência necessitará de uma potência maior para elevar um mesmo consumo de água. Um consumo excessivo de energia é demandado para essa expectativa, isto é, realizar o mesmo trabalho hidráulico.

Para a agricultura familiar é mais interessante o uso de energia solar, pois na maioria dos casos consegue atender as demandas solicitadas de consumo diário das culturas irrigadas. Nesse caso, o custo de investimento é elevado, mas que pode ser compensado em um horizonte de prazo determinado pelo modelo, tendo em vista o custo variável anual fazer uma compensação em relação à energia elétrica ou combustão, caso seja comparada com estas.

Por fim conclui-se que o *software Irrigare 1.0* atendeu as expectativas esperadas, pois realiza o dimensionamento de forma rápida e precisa, define os custos isoladamente e em conjunto, compara com outras fontes de energia e faz a projeção por um período de anos através de uma visualização gráfica, comparando-se as energias elétricas e combustão com a solar.

No modelo, com base nos dados de campo características dos materiais, foi dimensionado o sistema obtendo-se o diâmetro ótimo e a velocidade econômica. Esse diâmetro aumenta os custos fixos, mas permite obter economia nos custos variáveis, pois reduz o custo com bombeamento, com redução do consumo de energia, no caso de fonte de energia elétrica convencional ou horosazonal. Para energia solar o diâmetro ótimo aumenta o custo anual fixo, pela aquisição dos materiais não interferindo no custo anual variável. Na energia à combustão o diâmetro ótimo provoca a redução do consumo de diesel, com a perda de carga reduzida pelo aumento do diâmetro. Portanto, aumenta os custos fixos e reduz custos variáveis.

6.2 Principais Recomendações

Como recomendações para complementar esse trabalho ou para trabalhos futuros, sugere-se as seguintes atividades.

1. Estender o modelo para fazer a análise também da fonte eólica de energia, contemplando o dimensionamento e os custos envolvidos;
2. Fazer uma análise técnica e econômica de fontes potenciais de energia, relacionando-as com as fontes utilizadas no presente trabalho de acordo com sua limitação de vazão;
3. Com base nesse modelo computacional, ampliar o estudo para o uso em instalações hidráulicas prediais;
4. Fazer novos estudos sobre fontes não convencionais de energia para bombeamento, relacionando-as e apontando qual a mais eficiente nos aspectos técnicos e econômicos.
5. Contemplar o levantamento com uso simultâneo de fontes energéticas a fim de obter um modelo híbrido que forneça resultados que incorporem grandes vazões usando as fontes alternativas para demandas suportáveis por essas fontes: solar; eólica e mecânica.
6. Construir um modelo, tomando o presente trabalho como base, para o dimensionamento e levantamento de custos de fontes de energia mecânica para pequenas e médias vazões e pequenas, médias e grandes alturas de elevação de água.

7. Disponibilizar o *software* para ser utilizado por empresas públicas e privadas para reduzir o esforço na escolha de fontes de energia e sistemas de bombeamento.
8. Possibilitar o acesso desse estudo para agricultores familiares e/ou instituições a para possibilitar uma melhor escolha e redução de custos de investimentos e custos operacionais.
9. Realizar o estudo de otimização contemplando todo o sistema de irrigação incluindo os custos relacionados às técnicas de irrigação.
10. O *software* pode ser aplicado para fins didáticos, comparando-se os resultados obtidos conforme os fins utilizados e os valores das variáveis de entrada.
11. Analisar, definir, quantificar e incluir os custos ambientais em um novo *software* e que este seja considerado nos custos finais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABATE, C.; BOTREL, C. A. Carneiro hidráulico com tubulação de alimentação em aço galvanizado e em PVC. V. 59, n.1. Piracicaba: Scientia Agrícola, 2002.

ABNT. Norma 7094:2003. Máquinas elétricas girantes – motores de indução – especificação. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. Norma 12.214:1993. Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público. . Rio de Janeiro, 2003.

ABRADEE. Disponível em: www.abradee.com.br. Acesso em: 15 jan. 2013.

Adapta Sertão, **Tecnologias sociais de adaptação a mudança climática**. Disponível em www.adaptasertao.net. Acesso em: 15 jan. 2011.

ALDABÓ, L. Energia solar. São Paulo: Artliber, 2002.

ALMEIDA, Ailton de. Perdas de cargas em peças especiais de sistemas de irrigação por aspersão convencional. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1995.

ALTAFIN, Guimarães Iara. Reflexões sobre o conceito de agricultura familiar. 2007. Disponível em: eletrônico. Disponível em: <<http://redeagroecologia.cnptia.embrapa.br/biblioteca/agricultura-familiar/CONCEITO%20DE%20AGRICULTURA%20FAM.pdf>>.view. Acesso em: 07 dez. 2011.

ALVIM FILHO, Aymoré de C.; MARTINEZ, Carlos B.; SILVA, Selênia R. Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água. Belo Horizonte: PPGEE/CPH/UFMG, [2000?].

ANA. Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2011.

ANAUGER. Manual de instruções da bomba submersa 800. 2010. Disponível em: www.anauger.com.br. Acesso em: 20 dez. 2012.

ANAUGER. Bombas d'água Anauger solar. Disponível em: <http://www.solarbrasil.com.br/Material/Bomba%20d'%20%C3%A1gua%20Anauger%20Solar.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2013.

Andrade, Alan Sulato de. **Máquinas Hidráulicas.** Curso de Engenharia Industrial Madeireira. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2011.

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** Brasília: ANEEL, 2001.

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005.

ANHALT, J. **Actual performance and economic feasibility of residential solar water heaters.** In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 4. Anais...1987.

AZEVEDO NETTO, José Martiniano de. **Manual de hidráulica.** 8. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

BALTRA, A. O. C. **Utilização da Informática na irrigação.** Brasília, n.28, 1987.

BARROS, Pedro Paulo da Silva. **Sistemas alternativos de irrigação para agricultura familiar.** Faculdades Integradas da Terra de Brasília - Curso de Agronomia. Recanto das Emas, DF, 2007.

BENEDUCE, F.C.A. **Energia solar fotovoltaica sem mistérios.** Fortaleza: Banco do Nordeste, 1999.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação.** Viçosa: Ed. UFV, 2006.

BITTENCOURT, G. A.; BIANCHINI, V. **Agricultura familiar na região Sul do Brasil.** Brasília: INCRA, 1996.

BLACK, Perry O. **Bombas.** 2 ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1979.

BORGES, Ruth Silveira; BORGES, Wellington Luiz. **Manual de instalações prediais hidráulico-sanitárias e de gás.** 4. ed. São Paulo: Pini, 1992.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Energia Solar.** Página oficial da Autarquia. Disponível em: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf), 2010. Acesso em: 15 jan. 2011.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução ANEEL Nº 456, de 29 de Novembro de 2000.** Disponível em: <http://www.enersul.com.br/files/2012/06/res456.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2012.

BRASIL. Centrais Elétricas Brasileiras – **Eletrobrás. Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento.** Disponível em: <ftp://ftp.mecanica.ufu.br/LIVRE/SCHP/arquivos/Procel/Bombeamento/Livro%20Bomba.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2011.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 1990 a 2008.** Disponível em: <www.ibge.gov.br> Acesso em: 01 jan. 2010.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 1946, de 28 de junho de 1996. Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar – PRONAF.** Disponível em: www.pronaf.gov.br. Acesso em: 24 mar. 2011.

BRASIL. ANA. **GEO Brasil Recursos Hídricos:** componente da série de relatórios sobre o estado e perspectivas do meio ambiente no Brasil. Brasília, 2007.

BRASIL. EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. 2006. Disponível em: <http://solos.ufmt.br/docs/solos3/SIBCs_2009.pdf> Acesso em: 15 dez. 2010.

BRASIL. **Estatuto da Terra:** Artigo 4º; Inciso II - Lei nº 4.504 de 30 de novembro de 1964.

BRASIL. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Página oficial da Autarquia. Disponível: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 mar. 2011.

BRASIL. **Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária.** Página oficial da Autarquia. Disponível em: <<http://www.incra.gov.br>>. Acesso em: 13 mar. 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. **Política nacional dos recursos hídricos.** Brasília, 1997.

CARMO, G. A. *et al.* **Crescimento de bananeiras sob diferentes níveis de salinidade da água de irrigação.** Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.25, n.3, p.513-518, 2003.

CARVALHO, J.A.; REIS, J.B.R.S. **Avaliação dos custos de energia de bombeamento e determinação do diâmetro econômico da tubulação.** Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v.24, n.2, 2000. p. 441-449.

CARVALHO, H. P. **Irrigação, balanço hídrico climatológico e uso eficiente da água na cultura do café.** Tese (Doutorado em Agronomia). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.

- CAST. **Council for Agricultural Science and Technology. Effective use of water in**
CHRISTOFIDIS, D. **Irrigação: A Fronteira Hídrica na Produção de Alimentos.**
Irrigação e Tecnologia Moderna. Brasília: ABID, n.54, 2002.
- CLARKE, R. T.; J. KING. **O Mapa da Água.** São Paulo: Publifolha, 2005.
- COSTA, Carlos Pedro de Menezes et. al. **Caracterização qualitativa da água de irrigação na cultura da videira no município de Brejo Santo, Ceará.** Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 5, n. 2, 2005.
- CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. CEPEL-CRESESB. Ed. Especial. PRC PRODEEM. 2005.
- DANCOR. **Bombas e filtros: Tabela de seleção de bombas filtros e sistemas de pressurização.** Dancor, nov. 2008.
- DIAS, Genebaldo Freire. **Educação Ambiental:** princípios e práticas. 3. ed. São Paulo: Gaia, 1992.
- DUARTE et al. **Avaliação do desempenho energético em sistemas de abastecimento.** In: SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO. 2008.
- ELEOTERO, Bruno Comunello. **Redução de Custos com Energia Elétrica em Sistemas de Bombeamento – Estudo de Caso: Sistema de Abastecimento de Água de Capinzal/Ouro – (Sc).** Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. FLORIANÓPOLIS. 2008.
- EMBRAPA. CNPAT. **Energia eólica.** Disponível em: <<http://www.cnpat.embrapa.br>>. Acesso em: 26 abr. 2013.
- ESPINDULA NETO, Dalmácio et al. **Racionalização do uso da energia elétrica em sistemas de bombeamento utilizados na cafeicultura irrigada por gotejamento.** Parte da Dissertação de Mestrado do autor apresentada à UFV/DEA – Viçosa, MG. Trabalho parcialmente apresentado no VI Simpósio de Pesquisa em Cafeicultura Irrigada - FENICAFÉ, Araguari, 2003.
- EVANGELISTA, Francisco Raimundo. **A agricultura familiar no Brasil e no Nordeste.** Banco do Nordeste do Brasil. Escritório Técnico de Estudos econômicos do Nordeste – ETENE. Equipe de Estudos de Sistemas Agroindustriais e de Turismo, 2000.

- FEDRIZZI, Maria Cristina. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário:** lições aprendidas e procedimentos para potencializar sua difusão. 2003. Tese (Doutorado)- Programa de Inter unidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 2003.
- FIORENTINO, Jair de Jesus & Seraphim, Odivaldo José. **Análise da eficiência de módulos fotovoltaicos instalados em condições normais de operação.** Energia Agrícola, Botucatu, v. 20, n. 03, 2005.
- FRAIDENRAICH, Naum; LYRA, Francisco. **Energia solar:** fundamentos e tecnologia de conversão helotermolétrica e fotovoltaica. Recife – PE: Ed. Universidade da UFPE, 1995.
- FREIRE, Paula Khristina Cordeiro. **Estudo Comparativo entre metodologias de Dimensionamento Econômico de adutoras.** Dissertação (Mestrado) - UFPB, Engenharia Civil, João Pessoa, 2000.
- FRONZA, D. et al. **Efeito da fertirrigação na goiabeira Paluma.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA. 2008, *Anais...* Vitória, 2008.
- GELLER, H. S. **O Uso eficiente da eletricidade:** uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro, INEE, 1994.
- GOLDBARG, Marco Cesar; LUNA, Henrique Pacca L. **Otimização combinatória e programação linear:** modelos e algoritmos. São Paulo, 2000.
- GOMES, Heber Pimentel. **Sistemas de Abastecimento de Água:** dimensionamento econômico e operações de redes e elevatórias. 2. ed. João Pessoa: Editora Universitária - UFPB, 2004.
- GOMES, Marcio Rodrigues. **Hidráulica.** Salvador: UFBA, 2008.
- GONÇALVES, J. S.; SOUZA, S. A. M. **Agricultura familiar:** limites do conceito e evolução do crédito. Artigos: políticas públicas. Instituto de Economia Agrícola Disponível em:<<http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=2521>>. Acesso em: 25 abr. 2011.

GORE (In OLIVEIRA, Cléa Nobre de. **Indicadores de consumo e propostas para racionalização do uso da água em instalações de empreiteiras: caso da Refinaria Landulpho Alves de Mataripe.** 2009. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009

GRUNDFOS. **Manual Técnico Grundfos.** Disponível em: <http://br.grunfos.com>. Acesso em: 23 de abril de 2012.

GUANZIROLI, C.; CARDIM, S. E. (Coord.). **Novo Retrato da Agricultura Familiar: O Brasil Redescoberto.** Brasília: Projeto de Cooperação Técnica FAO/INCRA, 2000. Disponível em: <http://www.incra.gov.br/fao/pub3.html>. Acesso em: 15 fev. 2012.

GUMIER, Carlos César. **Aplicação de Modelo Matemático de Simulação-Otimização na Gestão de Perda de Água Em Sistemas de Abastecimento.** Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005. 145p. Dissertação (Mestrado).

HINRICHES, Roger A. **Energia e Meio Ambiente.** São Paulo: Cengage Learning, 2010.

IDEC. Disponível em: http://www.idec.org.br/biblioteca/mcs_agua.pdf. Acesso em: 12 mar. 2011.

JAGUARIBE, Emerson F. **Modelo comparativo de custos para um sistema não convencional e um convencional equivalente em potencia de saída.** In: SIMPÓSIO SOBRE ENERGIA SOLAR, 2. Anais... São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1981.

LIMA, A. C. de et al. **Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistema pivô central.** Rev. Bras. Eng. Agrícola Ambiental, São Paulo, v.13, n.4, 2009.

LIMA, J.E.F.W.; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. **Estudo do uso da água e energia elétrica para irrigação no Brasil.** 2002. Disponível em: <http://www.iica.org.uy/p2-5htm>. Acesso em: 15 abr. 2011.

LIU, Chao. **A method to optimize the operation of pumping system.** São Paulo: ASME 2009 Fluids Engineering Division Meeting, v. 1, 2009.

LOPES, Luiz Carlos Nascimento. **Avaliação de sistema eólio-elétrico de bombeamento de água.** Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia, Programa de pós Graduação em Engenharia Elétrica, Dissertação de Mestrado, 2011.

LOPES, Roberto Precci. **Notas de aula:** energia na agricultura. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2006.

LOPES, Joaquim Teixeira. **Dimensionamento e análise térmica de um dessalinizador solar híbrido.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Comissão de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Departamento de Mecânica, Campinas, 2004.

LUCENA, Kennedy Flávio Meira de. **Dimensionamento e operação de sistemas de irrigação localizada considerando diferentes tarifas de energia elétrica e tempos de irrigação.** Cajazeira, PB: CCT/UFPB, 2010.

LUENBERGER, D. **Linear and nonlinear programming.** [S. l.]: Addison-Wesley, 1984.

LUENENBERG, Zaul Alfredo Vieira. **Consumo e custo da aplicação de água por irrigação.** São Paulo: Revistas Unicentro, v. 5, n. 2, 2009.

MACHADO JUNIOR, Celso. **Biofísica:** fontes de energia. São Paulo: Universidade Paulista, 2005.

MAEDA, Leonardo Kenji. **Análise de sistemas alternativos de bombeamento, condução de água e irrigação:** estudo de caso: A Horta Municipal de São Carlos. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, 2010.

MANTOVANI, Everardo Chartuni. **Irrigação:** Princípios e Métodos. 2 ed. atual. ampl. Viçosa: Ed. UFV, 2007.

MANUAL MULTIQUIP. **Manual para escolha de bomba.** Disponível em: http://www.multiquip.com.br/download/2192010132144_566.pdf. Acesso em: 13 abr.2010.

MATTOS, Edson Ezequiel. **Bombas industriais.** 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

MEAH, Kala; FLETCHER, Stevin; ULA, Sadrul. **Solar Photovoltaic Water Pumping to Alleviate Drought in Remote Locations.** Atlanta: ASME 2006 Power Conference, 2006.

MELLO, Carlos Rogério de. **Escolha de bombas centrífugas.** Tadayuki Yanagi Jr. Lavras: Departamento de Ciências Exatas da universidade Federal de Lavras, 2010.

MELLO, Jorge Luiz Pimenta. **Irrigação.** Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituto de Tecnologia. Departamento de Engenharia. 2007.

MELO, J.F. **Custos de irrigação por aspersão em Minas Gerais.** 1993. 147 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Fluminense, 1993.

MENDONÇA, F. C.; RASSINI, J. B. **Curso teórico-prático de manejo e projetos de irrigação em pastagens.** São Carlos: Embrapa, 2005.

MENDONÇA, Fernando Campos *et al.* **Boletim de pesquisa e desenvolvimento: Dimensionamento de sistemas de irrigação para pastagens em propriedades de agricultura familiar.** São Carlos: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Pecuária Sudeste. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2007.

MICHELS, Roger N. Et al. **Avaliação de Bombeamento de Água em um Sistema Alimentado por Painéis Fotovoltaicos.** Rev. Eng. Agrícola, Jaboticabal, v. 29, n. 3, 2009.

MONACHESI, MARCELO GAIO. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento de Água.** Rio de Janeiro: Ed. Eletrobrás, 2005.

OLIVEIRA FILHO, Julio César Martins de. **Fontes alternativas de energia.** Piracicaba: Escola de Engenharia de Piracicaba. 2010.

OLIVEIRA, Julieta Aier de. **Lógicas produtivas e impactos ambientais: estudo comparativo de sistemas de produção.** 2000. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2000.

OYAMA, Paulo Takashi. **Vazão de uma motobomba acionada por painéis fotovoltaicos.** Dissertação de Mestrado. Cascavel: Faculdade Estadual do Oeste do Paraná, 2008.

- PEREIRA, L. C. et al. **Multiuso da água e educação ambiental.** Disponível em: <<http://www.guiaecologico.com.br/leitura.php?id=63>>. Acesso em: 10 nov. 2011.
- POTTER, Merle C. & WIGGERT, David C. **Mecânica dos fluidos.** São Paulo: Cengage Learning, 2009.
- REIS, L. B. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável.** 2 ed. Rev. atual. Barueri: Manole, 2012.
- REIS, L. B. **Geração de energia elétrica:** Tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade. São Paulo: Manole, 2003.
- RODRIGUES, William Costa. **Metodologia científica.** Paracambi: FAETEC/IST. 2007.
- SÁ, Daniel Augusto P. de. **Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água.** UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.
- Santana, Gilson Cândido. **Otimização da operação de sistemas de distribuição de água abastecidos por bombeamento e reservatórios de regularização.** Tese de Doutorado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 1999.
- SANTOS, Juliana. **Ecologia.** Disponível em: <<http://360graus.terra.com.br/ecologia/default.asp?did=27699&action=news>>. United Nations, 2006.
- SCHNEIDER. **Catálogo Geral de Bombas e Motobombas,** 2010.
- SCHNEIDER. **Catálogo Geral de Bombas e Motobombas,** 2011.
- SHIKLOMANOV, I. A. **Appraisal and assessment of world water resources.** Water Intern., v. 25, n. 1, 2000.
- SOLAR BRASIL. Disponível em: www.solarbrasil.com.br. Acesso em: 12 nov. 2012.
- SOUZA, Heloisa de. **Análise de preços de energia elétrica em sistemas hidrotérmicos.** Dissertação de Mestrado. Campinas: Unicamp, 2008.
- SOUZA, Jorge Luiz Moretti de. **Modelo para análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro.** Tese de Doutorado, 2001.

STREETER, Victor Lyle. **Mecânica dos Fluidos.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

SWAMEE, P.K. Design of a submarine pipeline. **Journal of Transportation Engineering.** New York, v. 119, n. 1, p. 159-170, Jan. 1993.

SUNLAB POWER®. **Bombas movidas a energia solar:** Manual de instalação Shurflo 9300 (pdf). Disponível em: <<http://www.sunlab.com.br/>>. Acesso em: 13 mar. 2011.

SVIERCOSKI Rosangela F. **Matemática aplicada às ciências agrárias.** Viçosa: Editora UFV, 2008.

TAKAMI, Renato. **Fundamento de Modelagem Matemática e Técnicas de Simulação Aplicados a Sistemas Ambientais,** 2005.

Thebe. **Catálogo Geral de Bombas,** 2012.

TIAGO FILHO, Geraldo. **Como construir um carneiro hidráulico.** São Paulo: CERPHC, 2002.

TINOCO, Sonia Terezinha Juliatto. **Análise Sócio-Econômica da Piscicultura em Unidades de Produção Agropecuária Familiares da Região de Tupã – SP.** Tese de Doutorado para obtenção do Título de Doutor em Aqüicultura, no Curso de Pós-Graduação em Aqüicultura do Centro de Aqüicultura da UNESP. São Paulo: Campus de Jaboticabal, 2006.

TRINDADE JÚNIOR, Walmeran José. **Análise do funcionamento de um sistema de bombeamento de água através de energia solar fotovoltaica utilizando motobomba de corrente continua.** Palmas: VII CONNEPI, 2012.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. **Abastecimento de Água.** São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

TSUTIYA, Milton Tomoyuki. Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento -VI SEREA – Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimento Urbano de Água. **Utilização de Inversores de Frequência para Diminuição de Consumo de Energia Elétrica em Sistemas de Bombeamento.** Escola Politécnica da USP. Sabesp. 2005.

VALIATI, M. I.; SCHMIDT, E. W. **Avaliação do manejo de irrigação para a cultura de feijão (*phaseolus vulgaris*) irrigada por pivô central na Agricola Wehrmann em Cristalina - GO.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. *Anais...* João Pessoa: EMBRAPA / UCG / UFPB / BrasilAgro e Enerbio, 2006.

VESCOVE, H. V. **Consumo e custo de energia elétrica na cultura de citros irrigada por gotejamento e microaspersão com três lâminas de água.** 2009. 56f. Tese (Doutorado em Agronomia)-UNESP, Jaboticabal, SP: UNESP, 2009.

ZOCOLER, João L. **Modelo para determinação do diâmetro e velocidade de escoamento econômica em sistemas elevatórios de água.** In.:CONGRESSO TEMÁTICO DE DINÂMICA E CONTROLE DA SBMAC, 3. *Anais...* São Paulo: UNESP – Campus de Ilha Solteira, 2004.

ZOCOLER, J.L. **Modelo para dimensionamento econômico de sistemas de recalque em projetos hidroagrícolas.** 1998. 107f. Tese (Doutorado). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 1998.

Apêndice 1: Dados de simulações.

Dados Gerais:

- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$;
- $\delta = 9806,65 \text{ N/m}^2$;
- $\varepsilon = 0,0015 \text{ m/m}$;
- $R = 0,1 (10\%)$;
- $r = 0,085 (8,5\%)$;
- $Pa = 15 \text{ anos}$;
- $N_{\text{dias_ano}} = 240 \text{ dias}$;
- $d = 4 \text{ meses}$;
- $m = 2\% \text{ do investimento inicial}$.

Dados de Energia Elétrica Convencional sem e com desconto:

- $TDc = R\$ 19,56$;
- $TCc = R\$ 0,28$;
- $the = 6 \text{ h}$;
- $fdtc = 0,70$.

Dados de Elétrica Horosazonal verde sem e com desconto:

- $TDvfps = R\$ 19,56$;
- $TCvfps = R\$ 0,16$;
- $TDvps = R\$ 19,56$;
- $TCvps = R\$ 1,60$;
- $TDvpu = R\$ 19,56$;
- $TCvfpu = R\$ 0,15$;
- $TDv = R\$ 19,56$;
- $TCvpu = R\$ 1,50$;
- Número de dias de operação do sistema no período seco: 20 dias;
- $tfps = 20 \text{ h}; 5; 12$
- $tps = 0 \text{ h}$;
- Número de horas do dia de operação do sistema fora de ponta no período úmido:
20 h;
- $tfp = 20 \text{ h}; 5; 12$
- $tpu = 0 \text{ h}$;
- $thes = 6h$;

- $\text{theu} = 6\text{h}$;
- $\text{fdtc} = 0,70$.

Dados de Energia à Combustão:

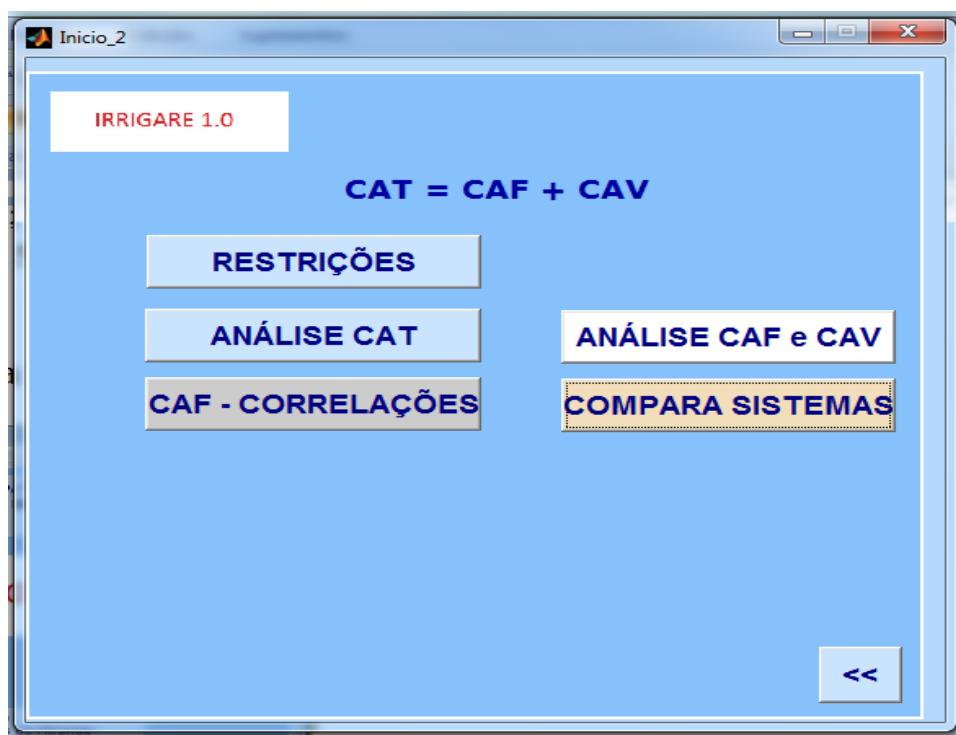
- Tipo de combustível: óleo diesel;
- $C_o = 0,225 \text{ L} = 0,000225 \text{ m}^3/\text{cv/h}$;
- $C_u = \text{R\$ } 2,29/\text{L} = \text{R\$ } 2290/\text{m}^3$;
- $t_a = 1200 \text{ h}$.

Dados de Energia Solar:

- $S_p (\text{kWh/m}^2) = 5,94$;
- $A_b (\text{dias}) = 3$;
- $C_{OR} (\%) = 70$;
- $P_p (\text{w}) = 60$;
- $CAP_D (\%) = 90$;
- $CAP_b (\text{Ah}) = 115$;
- $DDP (\text{V}) = 24$.

Apêndice 2: Telas Gerais (para todos os sistemas).

Obs.: As informações (dados) contidas em águas telas são apenas ilustrativas.





COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS					
COMPARAR	Dado de saída				
	ELÉTRICO				
	CONVENCIONAL	HOROSAZONAL	COMBUSTÃO	SOLAR	
Fonte Água:					
d (m)	SD	CD	SD	CD	
Ham (m)					
PB (CV)					
PM (CV)					
CAV (R\$)					
CAF (R\$)					
CAT (R\$)					
TIPO DE BOMBA:					
Projeção					<<

1. Energia Elétrica Convencional



Relatorio - 1			
Fonte de Água:	Açude/Lago/Reservatório		
Consumo (L/(m ² /dia))	10	Area (m ²)	10000
e (m)	0.0015	L (m)	1000
R (%)	0.1	r (%)	0.085
PA (anos)			15
ta (h/dia)	6	N_dias_ano (dias)	240
TDc (R\$/KW)	59.11	d (meses)	4
TCc (R\$/ (KWh))	0.1	Hgr (m)	10
Hgs (m)	10		
Vazão - Q (m ³ /s)			0.00462963
CAT min _ SD (R\$/ano)			3252.32
CAT min_CD (R\$/ano)			3460.26
Diametro Otimo SD (m)	0.08984	Veloc_SD (m/s)	0.730326
Diâmetro Otimo CD (m)	0.09462	Veloc_CD (m/s)	0.658401
D_ABNT (m)			0.0625463



Relatório - 2

Fonte de Água: Açude/Lago/Reserva Tipo de Bomba: Radial-EIXO_H

Rend_Bomba (%)	0.569874	Rend_Motor (%)	0.683848
Tarifa_consumo - (R\$/KWh)		0.1	
hf_CAT_SD (m)	13.9467	Hman_CAT_SD	34.212
hf_CAT_CD (m)	10.5717	Hman_CAT_CD	30.8371
hf_ABNT (m)	97.3658	Hman_ABNT	117.631
PB_CD (CV)			3.34025
PM_CD (CV)			4.34233
PB_SD (CV)			3.70583
PM_SD (CV)			4.81758
PM_ABNT (CV)			14.653
CUSTO_ABNT (R\$)			1350.42
CUSTO_CD (R\$)			460.217
CUSTO_SD (R\$)			510.586
ECONOMIA (ABNT - CAT_CD) (R\$)			890.203

Relatorio - 6			
Sistema		CONVENCIONAL	
Pot Bomba_SD (CV)	3.70583	Pot Bomba_CD (CV)	3.3402
Pot Motor_SD (CV)	4.81758	Pot Motor_CD (CV)	4.3423
Pot Bomb_ABNT (CV)	12.741	Pot_Mot_ABNT (CV)	14.653
Hman_SD	34.212	Hman_CD	30.837
D_Otimo_SD (m)	0.0898	D_Otimo_CD (m)	0.0946
vel_SD (m/s)	0.730326	vel_CD (m/s)	0.65840
CME_SD (R\$)	1713.66	CME_CD (R\$)	1657.95
CBH_SD (R\$)	2219.15	CBH_CD (R\$)	2160.04
CTpvc_SD (R\$)	8393.02	CTpvc_CD (R\$)	8393.02
CAV_SD (R\$)	593.082	CAV_CD (R\$)	631.484
CAF_SD (R\$)	3920.85	CAF_CD (R\$)	4090.39
CAT_SD (R\$)	4513.93	CAT_CD (R\$)	4721.87

2. Energia Elétrica Horosazonal:

D_otimo2

OTIMIZAÇÃO CAT x DIÂMETRO - SISTEMA ELÉTRICO HORA SAZONAL SEM E COM DESCONTO

OTIMIZA CAT	Dados de entrada			
Reset	Area_irrigada (m ²)	10000		
Teoria	Consumo_Cultura (L/(m ² /dia))	10		
Relatorio_3	Comprimento Total - L (m)	1000	Hgs (m)	10
BOMBA	Rugosidade absoluta - e (m)	0.0015		
<<	Taxa juro anual - r (%)	0.085		
	Valor residual - R (%)	0.1		
	Vida útil - PA (anos)	15	Tempo func - ta(h/dia)	6
	tpu - (h/ano)	0	TDv (R\$/KW)	19.41
	tfpv (h/ano)	6	TCvpu (R\$/KWh)	1.2
	tps (h/ano)	0	TCvfpu (R\$/KWh)	0.09
	tfps (h/ano)	6	TCvps (R\$/KWh)	1.45
	theu (h/ano)	6	TCvfps (R\$/KWh)	0.1
	fdtc (%)	0.7		
	thes (h/ano)	6		
	d (meses)	4		

Relatorio - 3					
Area (m²)					10000
Consumo (L/(m²/dia)					10
L (m)	1000	Hgs (m)	10	Hgr (m)	10
e (m)					0.0015
r (%)					0.085
R (%)					0.1
PA (anos)	15	ta (h/dia)			6
tpu (h)	0	TDv (R\$/KW)			19.41
tgpu (h)	6	TCvpu (R\$/KWh)			1.2
tps (h)	0	TCvfpu (R\$/KWh)			0.09
tfps (h)	6	TCvfps (R\$/KWh)			1.45
		TCvfps (R\$/KWh)			0.1
theu (h)	6	DotimoHS_SD (m)	0.07303	v_HS_SD (m/s)	1.10523
fdtc (%)	0.7	Dotimo HS_CD (m)	0.07305	v_HS_CD (m/s)	1.10463
thes (h)	6				
d (meses)	4				
					Diâmetro Forchheimer (m) 0.0702443

DIMENSIONAMENTO BOMBA / ANÁLISE CUSTO HORA SAZONAL SEM / COM DESCONTO					
Dados de entrada					
ANÁLISE					
Reset					
Ajuda					
Teoria					
Relatorio_5					
gráfico					
<<					
Tarifa_consumo - (R\$/KWh)	0.10				
hf_HS_SD	42.3205	hman_HS_SD	62.9282		
hf_HS_CD	42.2584	hman_HS_CD	62.866		
hf_ABNT	97.3658	hman_ABNT	117.973		
PB_HS_CD (CV)				6.80961	
PM_HS_CD (CV)				8.17153	
CUSTO_ABNT (R\$)				1557.5	
CUSTO_HS_CD (R\$)				866.052	
ECONOMIA (ABNT - HS_CD) (R\$)				691.451	

Relatorio - 5		
Tarifa_consumo - (R\$/KWh)		0.1
Rend_B (%)	0.569874	Rend_MB (%) 0.683848
hf_HS_SD		42.3205
hf_HS_CD		42.2584
hf_ABNT		97.3658
Hman_HS_SD		62.9282
Hman_HS_CD		62.866
Hman_ABNT		117.973
PB_HS_SD (CV)	6.81635	PB_HS_CD (CV) 6.80961
PM_HS_SD (CV)	8.17962	PM_HS_CD (CV) 8.17153
PM_ABNT (CV)	14.6956	
CUSTO_ABNT (R\$)		1557.5
CUSTO_HS_SD (R\$)		866.908
CUSTO_HS_CD (R\$)		866.052
ECONOMIA (ABNT - HS_CD) (R\$)		691.451

Relatorio - 6		
Sistema		HOROSAZONAL
Pot Bomba_SD (CV)	6.81635	Pot Bomba_CD (CV) 6.8096
Pot Motor_SD (CV)	8.17962	Pot Motor_CD (CV) 8.1715
Pot Bomb_ABNT (CV)	12.778	Pot_Mot_ABNT (CV) 14.6956
Hman_SD	62.928	Hman_CD 62.866 Hman_ABNT 117.973
D_Otimo_SD (m)	0.0730	D_Otimo_CD (m) 0.0730 D_ABNT (m) 0.06254
vel_SD (m/s)	1.10523	vel_CD (m/s) 1.10463 vel_ABNT (m/s) 1.50679
CME_SD (R\$)	2187.61	CME_CD (R\$) 2186.58
CBH_SD (R\$)	2792.27	CBH_CD (R\$) 2790.88
CTpvc_SD (R\$)	6508.92	CTpvc_CD (R\$) 6508.92
CAV_SD (R\$)	461.306	CAV_CD (R\$) 461.588
CAF_SD (R\$)	4044.94	CAF_CD (R\$) 4045.62
CAT_SD (R\$)	4506.25	CAT_CD (R\$) 4507.21

3. Energia à Combustão:

OTIMIZAÇÃO CAT x DIÂMETRO - SISTEMA A COMBUSTÃO

OTIMIZA CAT		Dados de entrada			
Reset		Area_irrigada (m ²)	10000		
Teoria		Consumo_Cultura (L/(m ² /dia))	10		
Relatorio_4		Comprimento Total - (m)	1000	Hgs (m)	10
BOMBA		Rugosidade absoluta - e (m)	0.0015		
<<		Taxa juro anual - r (%)	0.085		
		Valor residual - R (%)	0.1		
		Vida útil - PA (anos)	15		
		Tempo_func_ta (h/dia)	6	N_dias_ano (dias)	240
		Co (m ³ /cv.h)	0.000225		
		Cu (R\$/m ³)	2290		
Dado de saída					
		CAT_min (R\$)	3653.3		
		DIÂMETRO ÓTIMO	0.09902		

relatorio4

Relatorio - 4

Area (m ²)	10000				
Consumo (L/(m ² /dia))	10				
L (m)	1000	Hgs (m)	10	10	10
e (m)					0.0015
r (%)					0.085
R (%)					0.1
PA (anos)					15
ta (h/dia)	6			N_dias_ano (dias)	240
Q (m ³ /s)					0.00462963
Co (m ³ /cv.h)					0.000225
Cu (R\$/m ³)					2290
 CAT_comb_min (m)	3653.3				
Diametro_otimo (m)	0.09902				
D_ABNT (m)	0.0625463				

Custo3

DIMENSIONAMENTO BOMBA / ANÁLISE CUSTO COMBUSTÃO

ANÁLISE	
Reset	Dados de entrada
Ajuda	Meses sem operar / ano (d) 4
Teoria	Tarifa_consumo - (R\$/KWh) 0.10
Relatorio_7	Dado de saída
gráfico	hf_Comb 8.29366 Hman_Comb 28.4735
<<	hf_ABNT 97.3658 Hman_ABNT 117.546
	PB_Comb 3.08423
	PM_Comb 4.0095
	Consumo_ABNT (R\$) 1551.85
	Consumo_Comb (R\$) 3653.3
	ECONOMIA (ABNT - Comb) (R\$) 1126.91

relatorio7

Relatorio - 7 COMBUSTÃO

Rend_Bomba (%)	0.56987	Rend_Motor (%)	0.68384
temp tunc (h/dias)	6	d (anos)	4
Tarfifa_cons - (R\$/KWh)	0.1		
hf_Comb	8.29366	Hman_Comb	28.4735
hf_ABNT	97.3658	Hman_ABNT	117.546
PB_Comb (CV)		3.08423	
PM_Comb (CV)		4.0095	
PM_ABNT (CV)		14.6423	
CUSTO_ABNT (R\$)		1551.85	
CUSTO_Comb (R\$)		424.943	
ECONOMIA (ABNT - Comb) (R\$)		1126.91	

Relatorio - 6

Sistema		COMBUSTÃO	
Pot Bomba (CV)	3.08423	Pot Mot_ABNT (CV)	14.6423
Pot Motor (CV)	4.0095	Hman_ABNT	117.546
Pot Bomba_ABNT (CV)	12.7325	D_ABNT (m)	0.062546
Hman	28.4735	v_ABNT (m/s)	1.50679
D_Otimo (m)	0.09902		
v (m/s)	0.601188		
CME (R\$)	1618.94	CAV (R\$)	667.003
CBH (R\$)	2119.58	CAF (R\$)	4093.76
CTpvc (R\$)	9546.68	CAT (R\$)	4760.76

4. Energia Solar

OTIMIZAÇÃO CAT x DIÂMETRO - SISTEMA SOLAR

OTIMIZA CAT	Dados de entrada
Reset	Area_irrigada (m ²) <input type="text" value="10000"/> ta (h/dia) <input type="text" value="6"/>
Teoria	Rugosidade (m) <input type="text" value="0.0015"/> Comprimento Total (m) <input type="text" value="1000"/>
	Hgs (m) <input type="text" value="10"/> Hgr (m) <input type="text" value="10"/>
BOMBA	Dado de saída
Relatorio_9	CAF_min (R\$) <input type="text" value="3.54003e+012"/> D ÓTIMO (m) <input type="text" value="0.08407"/>
Dimensiona Painéis	Dados de entrada Tarifa (KWh) <input type="text" value="0.10"/> d (meses) <input type="text" value="4"/>
	Dados de saída
	Ham (m) <input type="text" value="40.2406"/> Ham_ABNT (m) <input type="text" value="117.712"/>
	PB_solar (CV) <input type="text" value="4.35884"/> PB_ABNT (CV) <input type="text" value="12.7505"/>
	PM_solar (CV) <input type="text" value="5.66649"/> PM_ABNT (CV) <input type="text" value="14.663"/>
<<	ECONOMIA (ABNT - SOLAR) (R\$) <input type="text" value="750.79"/>

Relatorio - 9			
Area (m ²)	10000	Consumo (L/(m ² /dia))	10
L (m)	1000	e (m)	0.0015
Hgs (m)	10	Hgr (m)	10
D_Otimo (m)	0.08407	D_ABNT (m)	0.062546
veloc (m/s)	0.834016	veloc_ABNT (m/s)	1.50679
Vazão - Q (m ³ /s)	0.004629	CAF_ miin (R\$/ano)	3.54003e+01
Hman (m)	40.2406	Hman_ABNT (m)	117.712
Rend_Bomba (%)	0.569874	Rend_Motor (%)	0.683848
Tempo func (h/dia)	6	Tarifa (KWh)	0.1
PB_solar (CV)	4.35884	PB_ABNT (CV)	12.7505
PM_solar (CV)	5.66649	PM_ABNT (CV)	14.663

DIMENSIONAMENTO SOLAR			
CALCULAR	Dados de entrada		
Reset	Sp (h/dia)	5.94	
Ajuda	Ab (dias)	3	
Teoria	cor (%)	0.7	
	cap_D (%)	0.9	
	cap_b	115	
	ddp (volts)	24	
	Pp (W)	60	
Relatorio_10	Dado de saída		
gráfico	Eb (Wh/dia)	19248.6	Cb (Ah/dia) 802.026
<<	Ep (Wh/dia)	356.4	Cb' (Ah/dia) 1145.75
	np	54.0085	Cr (Ah) 3437.25
	Es (Wh/dia)	19248.6	Cr' (Ah) 3819.17
	Es' (Wh/dia)	0	nb 33.2102

Relatorio - 10			
Sp (h/dia)	5.94	cap_D (%)	0.9
Ab (dias)	3	cap_b	115
cor (%)	0.7	ddp (volts)	24
Pp (W)	60		
Eb (Wh/dia)	19248.6	Cb (Ah/dia)	802.026
Ep (Wh/dia)	356.4	Cb' (Ah/dia)	1145.75
np	54.0085	Cr (Ah)	3437.25
Es (Wh/dia)	19248.6	Cr' (Ah)	3819.17
Es' (Wh/dia)	0	nb	33.2102

Relatorio - 6			
Sistema		SOLAR	
Pot Bomba (CV)	4.35884		
Pot Motor (CV)	5.66649		
Pot Bomba_ABNT (CV)	12.7505	Pot Mot_ABNT (CV)	14.663
Hman	40.2406	Hman_ABNT	117.712
D_Otimo (m)	0.08407	D_ABNT (m)	0.062546
v (m/s)	0.834016	v_ABNT (m/s)	1.50679
CME (R\$)	1813.16	CAV (R\$)	1180.92
CBH (R\$)	2328.8	CAF (R\$)	60464.4
CTpvc (R\$)	7714.13	CAT (R\$)	60226.9

5. Gráficos

