

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Martha Patricia De la Ossa Ruiz**

**Modelagem preliminar de um Sistema Híbrido  
Solar/Biomassa com Acumulação Hidráulica: Estudo  
de caso de uma Comunidade Isolada**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos  
requisitos para obtenção do Título de Mestre em  
Ciências em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Conversão de Energia**

**Orientador: Prof.Dr. Electo Eduardo Silva Lora**  
**Co-orientador: Prof.Dr. Vladimir Melian Cobas**

Novembro de 2013

Itajubá

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá  
Bibliotecária Jacqueline Rodrigues de Oliveira Balducci- CRB\_6/1698

D331m

De la Ossa Ruiz, Martha Patricia.

Modelagem preliminar de um sistema híbrido solar/biomassa com acumulação hidráulica: estudo de caso de uma comunidade isolada. / Martha Patricia De la Ossa Ruiz. – Itajubá, (MG) : [s.n.], 2013.

138 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora.

Co-Orientador: Prof. Dr. Vladimir Rafael Melian Cobas

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Sistema híbrido de energia. 2. Armazenamento de energia. 3. Acumulador hidráulico. I. Lora, Electo Eduardo Silva, orient. II. Cobas, Vladimir Rafael Melian, co-orient. III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ-UNIFEI  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Martha Patricia De la Ossa Ruiz**

**Modelagem preliminar de um Sistema Híbrido  
Solar/Biomassa com Acumulação Hidráulica: Estudo  
de caso de uma Comunidade Isolada**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 18 de  
Novembro de 2013, conferindo ao autor o título de **Mestre  
em Ciências em Engenharia Mecânica.**

Banca Examinadora:

Prof.Dr. Manoel Fernandes Martins Nogueira – Universidade Federal do Pará

Prof.Dr. Osvaldo José Venturini – UNIFEI

Prof.Dr. Electo Eduardo Silva Lora – UNIFEI

Prof.Dr. Vladimir Melian Cobas – UNIFEI

Itajubá

2013

## Resumo

**De la Ossa, R. M. P.** (2013), *Modelagem preliminar de um sistema híbrido solar/biomassa com acumulação hidráulica: estudo de caso de uma comunidade isolada*, dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, IEM Universidade Federal de Itajubá, 138 p.

Apresenta-se um modelo para qualificar a produção de energia e a disponibilidade de um sistema híbrido Solar/Biomassa com armazenamento hidráulico e sua aplicação na comunidade isolada de Santo Antônio no Estado de Para (Brasil). Para tal fim tem-se desenvolvido um modelo matemático do acumulador hidráulico o qual foi validado com dados experimentais reportados na literatura e finalmente integrado em um modelo maior por meio de uma estratégia de integração e controle com modelos anteriormente desenvolvidos por outros autores para a geração de energia a partir da biomassa por meio de um sistema Gaseificador/MCI, e por meio da radiação solar com a utilização de um sistema Dish/Stirling. Os modelos foram criados e solucionados utilizando o software Simulink® de Matlab®. Observou-se mediante simulação com os modelo que embora a densidade de energia dos acumuladores seja baixa (inferior aos 10 kJ/l) este funciona como uma energia de emergência (back up), graças a sua rápida resposta, quando a fonte renovável primaria que quer ser maiormente aproveitada falhe, promovendo segurança ao sistema. Comprova-se também que os SHE baseados só em fontes renováveis podem ser uma solução para o problema de energia das regiões isoladas, já que se complementam para superar suas desvantagens individuais.

### ***Palavras-chave***

Sistema híbrido de energia, Armazenamento de Energia, Acumulador Hidraulico, modelagem matemática, Gaseificação, motor de combustão interna de ignição por centelha, Sistema Dish/Stirling

## **Abstract**

**De la Ossa, R. M. P.** (2013), *Preliminary Modeling of a Hybrid Solar - Biomass System with hydraulic accumulation: a case study of an isolated community*. disertation Master in Mechanical Engineering, IEM Universidade Federal de Itajubá, 138 p.

It is present a model to evaluate energy production and availability from a hybrid solar - biomass system with hydraulic accumulation and its application in the isolated community of Santo Antonio in the state of Para (Brazil). For this purpose has developed a mathematical model of a hydraulic accumulator validated with experimental data reported in literature, and finally integrated into a bigger model with an integration and control strategy with models previously developed by other authors for power generation from biomass with a spark engine/gasifer system; and by radiation using a Dish / Stirling system. The models were created and solved using the software Simulink ® Matlab ®. By simulation, the model shows that although the accumulator's energy density is low (less than 10 kJ / l) it acts as an emergency power (back up) given its quick response, when the primary renewable source fail providing safety to the system. It was verified also the SHE based only on renewable sources can be a solution to the energy problem in the isolated regions because they complement each other to overcome their individual disadvantages.

### **Keywords**

Hybrid power system, Energy Storage, Hydraulic Accumulator, Mathematical Modeling, Gasification, Internal Combustion Engine with Spark Ignition, Dish / Stirling System .

## Sumário

<b>RESUMO</b> -----	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> -----	<b>II</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> -----	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> -----	<b>XI</b>
<b>SIMBOLOGIA</b> -----	<b>XII</b>
Letras Latinas-----	XII
Letras Gregas-----	XIV
Siglas-----	XV
<b>CAPÍTULO 1.</b> -----	<b>17</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> -----	<b>17</b>
<b>1.1. OBJETIVOS.</b> -----	<b>20</b>
1.1.1. Objetivo Geral.-----	20
1.1.2. Objetivos Específicos.-----	20
<b>1.2. ESTRUTURA DA TESE.</b> -----	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO 2.</b> -----	<b>22</b>
<b>FUNDAMENTAÇÃO TEORICA DOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIAS (HES).</b> -----	<b>22</b>

<b>2.1.</b>	<b>GENERALIDADES.</b>	<b>22</b>
<b>2.2.</b>	<b>CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA--</b>	<b>24</b>
2.2.1.	De acordo com a rede á que estão ligados.	24
2.2.2.	De acordo com a taxa de penetração.	25
2.2.3.	De acordo á origem das fontes de energia renováveis utilizadas.	26
<b>2.3.</b>	<b>CONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS</b>	<b>26</b>
2.3.1.	Configuração em Série.	26
2.3.2.	Configuração Comutada.	28
2.3.3.	Configuração em Paralelo	29
<b>2.4.</b>	<b>MODELAGEM DE SISTEMAS HÍBRIDOS</b>	<b>30</b>
2.4.1.	Modelagem logístico de sistemas híbridos	30
2.4.2.	Modelagem dinâmica de sistemas híbridos.	31
<b>2.5.</b>	<b>TRABALHOS REALIZADOS SOBRE PROJETO E MODELAGEM DE SISTEMAS HÍBRIDOS</b>	<b>32</b>
<b>2.6.</b>	<b>SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO</b>	<b>42</b>
2.6.1.	Acumulador Hidráulico	44
2.6.2.	Ar comprimido.	45
2.6.3.	Bombeamento.	46
2.6.4.	Volante de inercia (Flywheel).	47
2.6.5.	Supercondutores Magnéticos (SMES)	48
2.6.6.	Supercapacitores.	49
2.6.7.	Hidrogénio	50

2.6.8. Baterias líquidas (FBES).-----	51
2.6.9. Baterias de Células.-----	53
2.6.10. Armazenamento Térmico (TES).-----	54
2.6.11. Considerações finais dos sistemas de armazenamento -----	55
<b>CAPÍTULO 3. -----</b>	<b>57</b>
<b>SISTEMA HÍBRIDO SOLAR/BIOMASSA -----</b>	<b>57</b>
3.1. GENERALIDADES.-----	57
3.2. MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO, COM UTILIZAÇÃO DE GÁS DE BIOMASSA OBTIDO A PARTIR DE UM GASEIFICADOR CO-CORRENTE. -----	60
3.3. MOTOR DE COMBUSTÃO EXTERNA CICLO STIRLING, COM UTILIZAÇÃO DE PRATOS PARABÓLICOS (SISTEMA DISH/STIRLING). --	62
3.4. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO COM ACUMULADORES HIDRÁULICOS. -----	64
3.4.1. Modelagem do sistema de armazenamento hidráulico. -----	66
3.4.2. Bomba e Motor Hidráulico. -----	86
<b>CAPÍTULO 4. -----</b>	<b>91</b>
<b>INTEGRAÇÃO. -----</b>	<b>91</b>
4.1. ESTRUTURA GERAL.-----	92
4.2. MODELO DINAMICO. -----	93
4.3. RESULTADOS E ANALISES.-----	97
<b>CAPÍTULO 5. -----</b>	<b>104</b>
<b>ESTUDO DE CASO – COMUNIDADE SANTO ANTÔNIO.-----</b>	<b>106</b>

<b>5.1.</b>	<b>A COMUNIDADE.</b> -----	<b>105</b>
5.1.1.	Recurso Solar e disponibilidade de Biomassa na comunidade. -----	106
<b>5.2.</b>	<b>DEMANDA DE ENERGIA DA COMUNIDADE.</b> -----	<b>108</b>
<b>5.3.</b>	<b>SISTEMA PROPOSTO.</b> -----	<b>110</b>
<b>5.4.</b>	<b>RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.</b> -----	<b>116</b>
<b>CAPÍTULO 6.</b> -----		<b>121</b>
<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> -----		<b>121</b>
<b>6.1.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> -----	<b>121</b>
<b>6.2.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> -----	<b>123</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> -----		<b>124</b>

## Lista de figuras

Figura 2. 1. Esquema de um Sistema híbrido isolado. Adaptado de (Abbasi, et al., 2012) ....	25
Figura 2. 2. Classificação geral dos sistemas híbridos de energia.....	27
Figura 2. 3. Configuração em serie de um sistema hibrido. ....	28
Figura 2. 4. Configuração comutada de um sistema hibrido. ....	28
Figura 2. 5. Configuração em paralelo de um sistema hibrido.....	29
Figura 2. 6. Classificação geral da modelagem de sistemas híbridos de energia. ....	30
Figura 2. 7. Evolução do emprego dos sistemas híbridos (Tavares e Fagundes, 2008).....	32
Figura 2. 8. Sistema híbrido eólico diesel da Ilha de Fernando de Noronha. Modificado (da Silva, 2002).....	33
Figura 2. 9. Configuração de um SHE Fotovoltaico/ Eólico (Ekren, et al.,2009).....	35
Figura 2. 10. Configuração de um SHE Fotovoltaico/ Eólico da vila de Joanes. (Tavares e Fagundes, 2008) .....	36
Figura 2. 11. Configuração de um SHE Fotovoltaico/Biomassa(Tavares e Fagundes, 2008).	37

Figura 2. 12. Configuração do SHE Solar/Biomassa em desenvolvimento na UNIFEI. ....	38
Figura 2. 13. Possíveis integrações Mecânicas do SHE Solar/Biomassa em desenvolvimento na UNIFEI .....	39
Figura 2. 14. Classificação das tecnologias de armazenamento de energia, adaptado (Swierczynski, et al., 2010) .....	43
Figura 2. 15. Acumuladores Hidráulicos (Rabie, 2009).....	44
Figura 2. 16. Sistema de armazenamento de energia por ar comprimido. (Chen, et al., 2013) .....	46
Figura 2. 17. Constituição e topologia simplificada de um sistema de bombagem. (Mufron, et al., 2003).....	47
Figura 2. 18. O flywheel e suas partes. (SOCOMEK, 2013).....	48
Figura 2. 19. Estrutura do um supercondutor magnético. (Molina, 2010) .....	49
Figura 2. 20. Esquema de um supercondensador. (Molina, 2010) .....	50
Figura 2. 21. Esquema de uma célula a combustível.....	51
Figura 2. 22. Bateria líquida de Polissulfato de Bromo (Ibrahim, et al., 2008).....	52
Figura 3. 1. Variação da radiação solar no Brasil. (ANEEL, 2008).....	58
Figura 3. 2. SHE solar / biomassa .....	59
Figura 3. 3. Sistema gaseificador / motor de combustão interna para geração de energia.....	61
Figura 3. 4. Sistema Dish / Stirling. ....	63
Figura 3. 5. Sistema SHR. (Greenmotorsblog, 2010).....	65
Figura 3.6. Sistema SHE Eólico/Diesel com armazenamento hidráulico (Nacfaire, 2004)....	66
Figura 3. 7. Etapas de operação do acumulador (Bosch Rexroth, 2009). ....	68
Figura 3. 8. Constante de tempo térmica (Pourmovahed e Otis, 1990).....	72
Figura 3. 9. Modelo dinâmico do acumulador desenvolvido em Simulink®.....	75

Figura 3. 10. Diagrama de blocos do modelo do acumulador.....	76
Figura 3. 11. Comparação do Volume do acumulador calculado por diferentes modelos.....	77
Figura 3. 12. Comparação da pressão no acumulador calculada por diferentes modelos. ....	78
Figura 3. 13. Comparação da temperatura do acumulador calculada por diferentes modelos.	78
Figura 3. 15. Temperatura do gás no acumulador .....	81
Figura 3. 15. Volumem do gás no acumulador.....	81
Figura 3. 16. Pressão do gás no acumulador .....	82
Figura 3. 17. Variação do SOC no acumulador.....	82
Figura 3. 18. Energia armazenada no acumulador .....	83
Figura 3. 19. Influência do fluxo de carga na energia armazenada (Acumulador Padrão) .....	84
Figura 3. 20. Influência do fluxo de descarga na energia armazenada (Acumulador Padrão)	85
Figura 3. 21. Bomba Volumétrica a de pistões axiais (Vickers, 2000).....	88
Figura 3. 22. Configuração de bombas em: a) Série b)Paralelo.....	89
Figura 3. 23. Operação de bombas em: serie e paralelo.....	89
Figura 4. 1. Modelo dinâmico do Sistema Híbrido Solar/Biomassa .....	96
Figura 4. 2. Variação da irradiação solar na cidade de Itajubá (15/10/2010).....	98
Figura 4. 3. Potência mecânica e RPM desenvolvida pelo Sistema Dish/Stirling. ....	98
Figura 4. 4. Potência mecânica Vs. rpm desenvolvida pelo Gaseificador/MCI.....	99
Figura 4. 5. Potência elétrica desenvolvida pelo sistema de Armazenamento Vs. Demanda. .....	100
Figura 4. 6. Potência elétrica desenvolvida pelo sistema Dish/Stirling Vs. Demanda.....	100
Figura 4. 7. Variação do SOC do Sistema de armazenamento.....	101
Figura 4. 8. Potência elétrica a gerada pelo Sistema SHE.....	102

Figura 4. 9. Potência elétrica a gerada pelo sistema Gaseificador/MCI Vs. Demanda. ....	102
Figura 5. 1. Vista geral de Santo Antônio e suas residências (Pinheiro, 2011).....	105
Figura 5. 2. Distribuição dos prédios na comunidade de Santo Antônio (Pinheiro, 2011) ..	106
Figura 5. 3. Estações solarimétricas mais próximas à Santo Antônio (CRESESB, 2013)....	107
Figura 5. 4. Radiação Solar diária media de Santo Antônio (CRESESB, 2013). ....	108
Figura 5. 5. Carga estimada da vila da comunidade. (Pinheiro, 2011).....	108
Figura 5. 6. Carga estimada para a fábrica de cabos de vassouras. (Pinheiro, 2011).....	109
Figura 5. 7. Curva de carga estimada da vila na comunidade. (Pinheiro, 2011).....	109
Figura 5. 8. Potência mecânica Vs. rpm desenvolvida pelo Gaseificador/MCI.....	111
Figura 5. 9. Consumos de gás de biomassa pelo MCI e consumo de biomassa do gaseificador Vs as rpm/MCI. ....	112
Figura 5. 10. Consumos Vs RPM do MCI .....	113
Figura 5. 11. Variação da irradiação solar na comunidade .....	114
Figura 5. 12. Potência mecânica e RPM desenvolvida pelo Sistema Dish/Stirling. ....	115
Figura 5. 13. Esquema funcional do SHE solar / biomassa.....	115
Figura 5. 14. Potência elétrica desenvolvida pelo sistema Dish/Stirling Vs. Demanda.....	116
Figura 5. 15. Potência elétrica desenvolvida pelo sistema de armazenamento Vs. Demanda. ....	117
Figura 5. 16. Variação do SOC do Sistema de armazenamento.....	118
Figura 5. 17. Potência elétrica desenvolvida pelo Gaseificador/MCI Vs. Demanda. ....	118
Figura 5. 18. Potência elétrica desenvolvida pelo Sistema híbrido solar/biomassa da comunidade Santo Antônio. ....	119

## Lista de tabelas

Tabela 3. 1- Parâmetros do motor no modelo de Centeno (2010).....	62
Tabela 3. 2- Erros meios do modelo do acumulador no processo de carga. ....	77
Tabela 3. 3- Predição da Energia Armazenada pelo acumulador (Padrão).....	79
Tabela 3. 4- Influencia da vazão de descarga e descarga na energia armazenada no acumulador. ....	86
Tabela 3. 5- Tipos de bombas de deslocamento positivo.....	87
Tabela 4. 1- Dados do funcionamento do sistema SHE.....	103
Tabela 5. 1 - Características típicas da biomassa em Santo Antônio.....	107
Tabela 5. 2- Parâmetros do motor. ....	110
Tabela 5. 3- Dados do funcionamento do sistema SHSB na comunidade de Santo Antônio.....	120

## Simbologia

### Letras Latinas

a	-	Constante da equação de BWR
A	m <sup>2</sup>	Área de transferência de calor do acumulador
A <sub>0</sub>	-	Constante da equação de BWR
b	-	Constante da equação de BWR
B <sub>0</sub>	-	Constante da equação de BWR
c	-	Constante da equação de BWR
c <sub>v</sub>	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \text{K}$	Calor específico com volume constante
C <sub>0</sub>	-	Constante da equação de BWR
D <sub>b</sub>	m <sup>3</sup>	Deslocamento da bomba
D <sub>m</sub>	m <sup>3</sup>	Deslocamento do motor hidráulico
h	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção
m	kg	Massa do gás no acumulador
n <sub>b</sub>	rpm	Rotação de acionamento da bomba

$n_m$	rpm	Rotação de saída do motor hidráulico
$P$	kPa	Pressão do gás
$P_0$	kPa	Pressão inicial de Pré-carga do gás no acumulador
$P_1$	kPa	Pressão mínima do acumulador
$P_2$	kPa	Pressão máxima do acumulador
$P_b$	kPa	Pressão de operação da bomba
$P_{in}$	kPa	Pressão do gás no acumulador no instante de tempo
$P_m$	kPa	Pressão de operação do motor hidráulico
$P_{Ob}$	kW	Potência de acionamento da Bomba
$P_{Om}$	kW	Potência de saída do motor hidráulico
$Q_a$	$\frac{m^3}{s}$	Vazão do óleo do acumulador
$Q_b$	$\frac{m^3}{s}$	Vazão da bomba
$Q_m$	$\frac{m^3}{s}$	Vazão do motor hidráulico
$\dot{Q}_{Conv}$	kW	Taxa de transferência de calor por convecção
$R$	$\frac{kPa \cdot m^3}{kmol \cdot K}$	Constante universal dos gases
$t$	s	Tempo de simulação
$T$	K	Temperatura do gás no acumulador
$T_a$	K	Temperatura ambiente
$U$	kJ	Energia Armazenada no acumulador
$\dot{U}$	kJ	Varição da energia interna do acumulador
$V$	$m^3$	Volume do gás
$V_0$	$m^3$	Volume nominal do acumulador

$V_1$	$m^3$	Volume do gás á Pressão mínima
$V_2$	$m^3$	Volume do gás á Pressão máxima
$V_{in}$	$m^3$	Volume de óleo no acumulador no instante de tempo
$V_{max}$	$m^3$	Volume mínimo de óleo no acumulador
$V_{min}$	$m^3$	Volume máximo de óleo no acumulador
$\dot{W}$	kW	Potencia
$X_b$	-	Fração do deslocamento da bomba
$X_m$	-	Fração do deslocamento do motor hidráulico

### Letras Gregas

$\alpha$		Constante da equação de BWR
$\gamma$		Constante da equação de BWR
$\eta_{me-b}$	-	Eficiência mecânica da bomba
$\eta_{me-m}$	-	Eficiência mecânica do motor hidráulico
$\eta_{vol-b}$	-	Eficiência volumétrica da bomba
$\eta_{vol-m}$	-	Eficiência volumétrica do motor hidráulico
$\eta_{t-b}$	-	Eficiência total da bomba
$\eta_{t-m}$	-	Eficiência total do motor hidráulico
$v$	$\frac{m^3}{kg}$	Volume específico do gás
$\tau$	s	Constante de tempo térmica

**Siglas**

AT	Armazenamento térmico
ATQ	Armazenamento termoquímico
BWR	Benedict-Webb-Rubin
CD	Corrente Direta
CELPA	Centrais Elétricas do Pará
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CPFL	Companhia paulista de força e luz
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
EMBA	Laboratório de Energia, Biomassa e Meio Ambiente
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
FC	Célula a combustível
GEDAE	Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
GM	General Motor
MCI	Motor de combustão interna
MMF	Materiais de mudança de fase
NEST	Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída
PM	Bomba / motor hidráulico
PV	Sistema Fotovoltaico

SAB	Sistemas de armazenamento por bombagem
SAEAC	Sistemas de armazenamento de energia por ar comprimido
SAPH	Sistemas de armazenamento por hidrogênio
SC	Supercondensadores
SEBL	Sistemas de armazenamento por baterias líquidas
SHE	Sistemas Híbridos de Energia
SHSB	Sistema híbrido Solar/Biomassa
SM	Supercondutores Magnéticos
SOC	Estado de carga
SRH	Sistema regenerativo hidráulico
UFPA	Universidade Federal do Pará
UNIFEI	Universidade federal de Itajubá

## Capítulo 1.

# INTRODUÇÃO

Estima-se que o consumo mundial de energia do ano 2005 vai duplicar para 2030 (Energy Information Administration, 2008). A maior parte da energia é obtida pela queima de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás. A energia fóssil compreende cerca de 86% do consumo de energia do mundo (Chu e Majumdar, 2012).

As emissões de gases de efeito estufa provenientes do uso de combustíveis fósseis desde a revolução industrial têm sido associadas ao aumento da temperatura e mudança climática global, além disso, alguns acreditam que, se as emissões de gases de efeito estufa, como o CO<sub>2</sub> não são reduzidas, o clima do mundo será irremediavelmente danificado levando a consequências desastrosas para a vida na terra (Change, 2001). Reduzir as emissões de carbono na escala de tempo é necessário para mitigar os riscos da mudança climática. Apesar do crescimento significativo da utilização de energias renováveis, a fração total correspondente às fontes de energia não emissora de carbono se manteve constante durante as duas últimas décadas, isso é preocupante (Chu e Majumdar, 2012).

De acordo com a Agência Internacional de Energia, em 2009, a energia proveniente das fontes renováveis representou quase 16% do consumo energético mundial (IEA, 2012; REN,

2011). Neste contexto o Brasil é líder mundial no uso de fontes renováveis de energia, de acordo com dados da EPE (2011).

Por outro lado, World Energy Outlook 2012 mostra 1,3 bilhão de pessoas não têm acesso à eletricidade (IEA, 2013). O acesso à eletricidade é uma das chaves para o desenvolvimento, proporcionando iluminação, aquecimento e força motriz para usos produtivos e comunicação. Existe um grande número de pessoas sem atendimento, e esse número cresce apesar dos programas de eletrificação rural, porque estes não são suficientes para cobrir o aumento populacional. Além disso, boa parte destas pessoas vive em comunidades ou áreas isoladas, distantes e de difícil acesso (Tiago, 2008).

Neste contexto, uma motivação para a utilização de fontes de energias renováveis é a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e melhorar a qualidade de vida da espécie humana. Isto é especialmente verdadeiro em áreas isoladas, autônomas, pequenas ilhas, onde o acesso a fontes de energia renováveis pode ser a única solução para satisfazer as suas necessidades energéticas (Ribeiro et al. , 2011), mas a principal desvantagem das energias renováveis é o comportamento variável inerente. Armazenar a energia (Rei et al. , 2002) e/ou combinar diferentes tipos de recursos renováveis, poderia reduzir o problema. (Pérez-Navarro et al. , 2010).

Os Sistemas Híbridos de Energia (SHE) são compostos por uma fonte renovável (tais como vento, sol, água, mar e biomassa) e uma fonte de energia convencional ou mais de uma fonte renovável com ou sem fontes de energia convencionais, que funciona em modo autônomo ou ligado à rede. Os SHE estão se tornando populares para geração de energia autônoma em locais isolados. A característica importante do SHE é combinar duas ou mais tecnologias de geração de energia renováveis para fazer o melhor uso de suas características operacionais e obter maior eficiência do que poderia ser obtido a partir de uma única fonte de energia (Prabodh e Vaishalee, 2012). Um SHE composto por uma fonte solar com biomassa combina duas fontes de energia que se complementam para superar suas desvantagens individuais (Nixon et al., 2012), e o uso de um sistema de armazenamento reduz a demanda de biomassa, melhorando assim a segurança energética.

O grupo de pesquisa NEST, tem desenvolvido vários trabalhos na área da geração de energia a partir de fontes renováveis, que incluem estudos experimentais (Martinez, 2009), e teóricos (Centeno, 2010; Mendoza, 2012). A ênfase dos estudos detalhados em Centeno (2010) e Martinez (2009) foi a determinação das condições de operação dos gaseificadores

com uso da biomassa como matéria prima e qualidade do gás para uso em motores de combustão interna, e Mendoza (2012) na geração de energia elétrica a partir da radiação solar na cidade de Itajubá, utilizando sistemas Dish/Stirling (pratos parabólicos e motores Stirling ).

Esta dissertação foca-se no desenvolvimento de um modelo matemático de um sistema de armazenamento de energia para a integração de dois modelos teóricos de sistemas de geração de energia baseado em fontes renováveis (biomassa e sol) cujos modelos foram desenvolvidos no grupo de pesquisa NEST (Centeno, 2010 e Mendoza, 2012), com a finalidade de estudar a disponibilidade de energia e o comportamento preliminar de um sistema SHE.

Este trabalho também fornece subsídios para o projeto de pesquisa experimental em andamento da CPFL (P&D 0041 SHSB), o qual tem como objetivo definir, projetar, construir e testar um Sistema Híbrido Solar/Biomassa para geração de energia que possa ser utilizado em comunidades isoladas.

## **1.1. OBJETIVOS.**

### **1.1.1. Objetivo Geral.**

Avaliar a produção de energia e disponibilidade de um sistema híbrido solar/biomassa com armazenamento de energia utilizando como ferramenta a modelagem matemática.

### **1.1.2. Objetivos Específicos.**

Investigar e estudar o desenvolvimento de sistemas híbridos de energia renovável solar/biomassa.

Formular um modelo matemático para o sistema de acumulação de energia em Simulink/Matlab.

Validar o modelo matemático do sistema de acumulação de energia.

Integrar os modelos existentes (Dish-Stirling, gaseificador-MCI) e o modelo do sistema de acumulação de energia desenvolvido em Simulink/Matlab.

Desenvolver um estudo de caso da implementação de um SHE uma comunidade isolada.

## 1.2. ESTRUTURA DA TESE.

No **Capítulo 2** apresentam-se a pesquisa relacionada com Sistemas Híbridos de Energias Renováveis e os Sistemas de Armazenamento de energia. Esta revisão levou em conta trabalhos disponível na literatura científica.

No **Capítulo 3** são apresentados os sistemas que integram o SHE, um Sistema de geração de eletricidade a partir de energia solar utilizando pratos parabólicos e motores Stirling (Dish/Stirling) e um sistema integrado por um motor ciclo Otto/Gaseificador Co-corrente, trabalhos desenvolvidos no grupo de pesquisa NEST. Finalmente apresenta-se o modelo do sistema de armazenamento (Acumulador Hidráulico de Bexiga), primeiramente o modelo matemático e termodinâmico desenvolvido. No final do capítulo se apresenta a validação do modelo a qual foi feita por comparação com dados obtidos na literatura científica.

No **Capítulo 4** são apresentados os detalhes da metodologia desenvolvida na integração dos modelos do sistema SHE . Incluem-se os resultados e avaliação da energia fornecida por modelo para atender uma carga constante.

No **Capítulo 5** mostra-se um caso de estudo: fornecimento de energia com o Sistema SHE desenvolvido a comunidade isolada de Santo Antônio localizada na Ilha do Marajó, no município de Breves (Pará).

Finalmente, no **capítulo 6**, mostram-se as conclusões, recomendações e propostas de pesquisas futuras a partir da experiência obtida no desenvolvimento da presente tese.

## Capítulo 2.

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIAS (SHE).

## 2.1. GENERALIDADES.

A energia renovável é definida como a energia que é produzida por recursos naturais, tais como o sol, o vento, a chuva, as ondas, as marés e o calor geotérmico que são naturalmente reabastecidos dentro de um intervalo de tempo pequeno, após serem utilizados. A energia renovável inclui as tecnologias que convertem recursos naturais em energia úteis (Lund, 2009):

- Vento, Ondas do mar, e Energia Hidrelétrica (incluindo micro hidrelétrica e de correnteza).
- A energia solar (incluindo fotovoltaica), solar térmica e geotérmica.
- Tecnologias de Biocombustíveis (incluindo biogás).
- Biomassa e fração renovável de resíduos (resíduos domésticos e industriais)

Uma das aplicações mais promissoras das tecnologias de energia renovável é a instalação de sistemas híbridos de energia em áreas remotas (Nema et al., 2008). O termo sistema híbrido de energia refere-se a aplicações nas quais várias fontes e tecnologias de

conversão de energia são usados em conjunto para fornecer uma quantidade requerida de energia. A definição mais geral de um SHE é a seguinte: " Sistemas híbridos de energia são combinações de dois ou mais dispositivos de conversão de energia (por exemplo, geradores de eletricidade), ou dois ou mais combustíveis para o mesmo dispositivo, que quando são integrados, superam limitações que podem ser inerentes a ambos ". Estes sistemas são frequentemente usados em aplicações isoladas e incluem normalmente, pelo menos, uma fonte de energia renovável na configuração. Os sistemas híbridos são utilizados como uma alternativa aos sistemas convencionais, que normalmente se baseiam numa única fonte de energia (Manwell J. , 2004).

Devido à natureza intermitente das fontes renováveis, combinações híbridas de duas ou mais das respectivas tecnologias de geração de energia, juntamente com o armazenamento, pode melhorar o desempenho do sistema. Em geral, todos os sistemas híbridos convertem todas suas fontes em uma forma de energia (tipicamente elétrica) e / ou armazenam a energia em uma forma (Química, ar comprimido, térmica, mecânica. volante de inercia, etc.). A hibridização pode resultar em aumento da confiabilidade. Fontes de geração de energia renováveis diferentes também podem ajudar uns aos outros para alcançar uma maior eficiência energética total e / ou melhorar o desempenho. O armazenamento é uma parte essencial de um sistema SHE.

Em geral, os sistemas híbridos que utilizam fontes de energia renováveis incluem pequenas Turbinas Eólicas, Energia Solar Fotovoltaica (PV), Células de Combustível, biomassa, micro hidrelétricas e motores Stirling (Gupta et al., 2007).

Os Sistemas Híbridos de Energia Renováveis estão geralmente na faixa de potência de 1 quilowatt (kW) a várias centenas de quilowatts (Qian et al., 2009). Estes sistemas são únicos entre os sistemas de abastecimento de energia, porque seu desempenho e projeto dependem inteiramente da localização e das condições climáticas (National Renewable Energy Laboratory, 2005)

## 2.2. CLASSIFICAÇÃO GERAL DOS SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA

Na literatura existem diversos critérios para classificar os sistemas híbridos de energia alguns enfocados nos recursos energéticos utilizados, outros de acordo a sua funcionalidade (o carregamento da bateria, bombeamento de água, etc.), estrutura, características da rede que fornecem energia, ou regime de operação, etc. A seguir encontram-se as classificações mais comuns.

### 2.2.1. De acordo com a rede à que estão ligados.

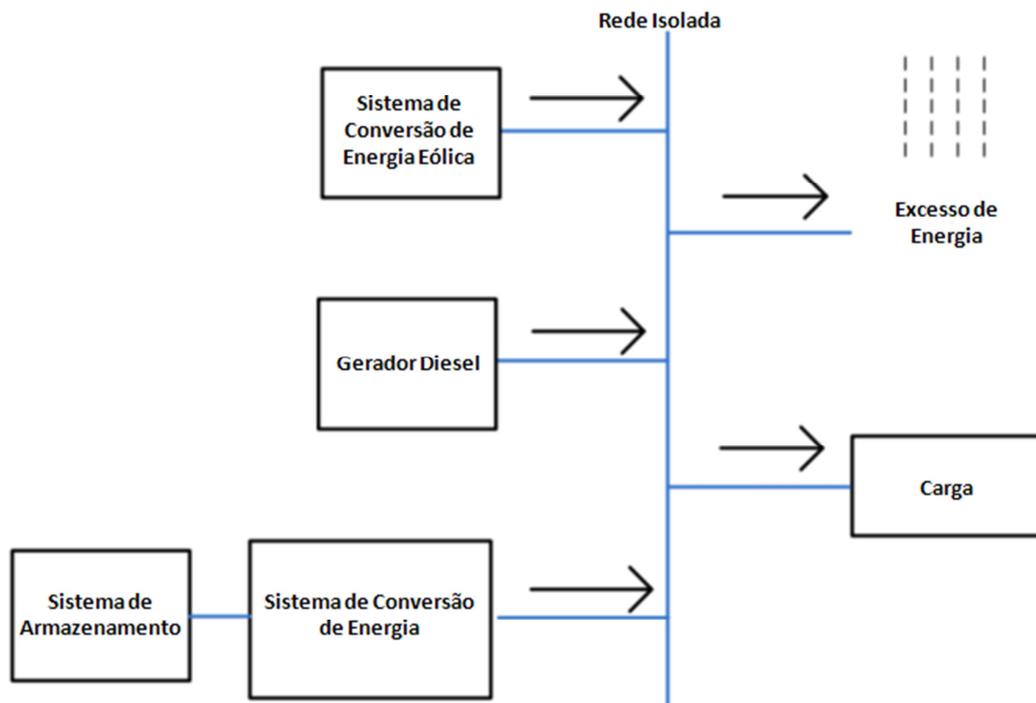
Os sistemas híbridos nesta categoria podem ser divididos em dois grupos, os que trabalham em paralelo ligados a uma rede interligada, e os que estão conectados a uma rede isolada.

Os *Sistemas híbridos ligados a uma rede isolada* devem proporcionar toda a energia que é requerida em qualquer momento e têm que ser capazes de definir a frequência da rede e controlar a tensão. Estas aplicações certamente exigem um sistema regulador, tais como baterias, células-combustível, e geradores diesel convencionais ou uma combinação destes, para a confiabilidade do fornecimento da demanda em todas as condições operacionais (Erdinc e Uzunoglu, 2012).

Os *Sistemas híbridos ligados a uma rede interligada* só ajudam a atender a demanda da rede a que estão ligados.

Existem também *sistemas híbridos isolados* ( não ligados a uma rede), que são utilizados para fins específicos como bombeamento de água (Vick e Byron, 2012), irrigação (Abdel-Salam et al., 2011), aquecimento, dessalinização (Voropoulos, et al., 2004), purificação de água (Vick, et al., 2003), funcionamento de moinhos ou outras máquinas. Nestes sistemas o controle da voltagem e a frequência não tem uma maior importância e não existe um controle para o excesso de energia produzido.

Na figura 2.1 mostra-se o esquema de um sistema híbrido conectado a uma rede isolada, que está composto por um ou mais sistemas de conversão de energia eólica e um gerador diesel. Um sistema de armazenamento de energia está integrado ao sistema para reduzir o uso do gerador diesel e diminuir as emissões. Outra vantagem do sistema do armazenamento de energia é que realiza o controle da frequência e voltagem, além de captar o excesso de energia gerado pela fonte renovável.



**Figura 2. 1.** Esquema de um Sistema híbrido isolado. Adaptado de (Abbasi, et al., 2012)

### 2.2.2. De acordo com a razão de penetração.

Define-se razão de penetração como a relação da energia instantânea gerada pela fonte renovável dividida entre a carga elétrica total demandada. Os *sistemas híbridos de baixa penetração* são aqueles que têm uma razão na ordem de 20% ou menos, o que quer dizer que o impacto da fonte renovável na rede é pequeno. Os *sistemas híbridos de meia penetração* que têm uma razão maior do 20% e menor do 50%. Finalmente, os *sistemas híbridos de alta penetração* têm uma razão, geralmente, superior a 50%, podendo exceder o 100%, então o impacto da fonte renovável no sistema é significativo. Neste último caso é necessário um equipamento especial de controle, que pode incluir um sistema de armazenamento (Manwell J., 2004).

### **2.2.3. De acordo à origem das fontes de energia renováveis utilizadas.**

Os sistemas híbridos podem ser divididos de acordo à fonte de energia renovável utilizada e/ou sua correspondente tecnologia de geração renovável. *Sistemas híbridos solares fotovoltaicos, Sistemas híbridos eólicos, Sistemas híbridos á base de biomassa*, etc.

A seleção das fontes renováveis determina-se de acordo a sua disponibilidade na localização geográfica, onde vai ser utilizado o sistema, e a decisão do uso de uma fonte convencional (fóssil) de energia e/ou um sistema de armazenamento de acordo com a demanda da rede.

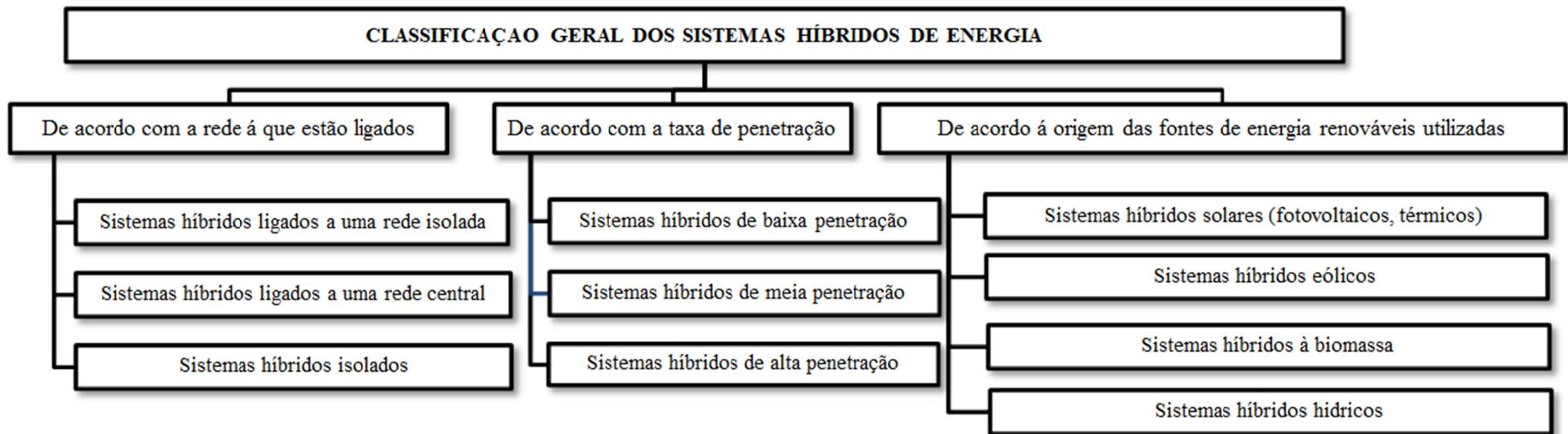
Na figura 2.2. Encontra-se um resumo com a classificação geral dos sistemas híbridos de energia.

## **2.3. CONFIGURAÇÃO DOS SISTEMAS HÍBRIDOS**

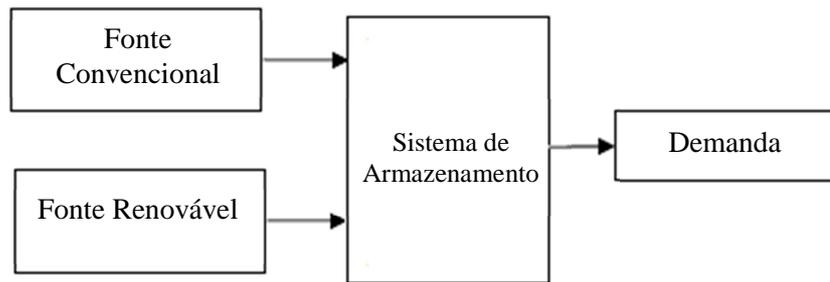
Na literatura encontrasse principalmente 3 configurações na modelagem e projeto de sistemas híbridos, com ou sem fontes renováveis: em série, comutado ou em paralelo (Setiawan et al, 2009), (Bhikabhai, 2005), (Ashari e Nayar, 1999), (Wichert, 1997), (Nayar et al., 1993). O foco dessas configurações são os sistemas compostos por uma fonte renovável e uma fonte convencional, principalmente o grupo gerador diesel.

### **2.3.1. Configuração em série.**

Na configuração em série, figura 2.3, as fontes convencionais e as fontes renováveis são utilizadas para manter sempre carregado o sistema de armazenamento, ou seja, toda a energia passa através do banco de baterias antes de suprir a demanda.



**Figura 2. 2.** Classificação geral dos sistemas híbridos de energia.

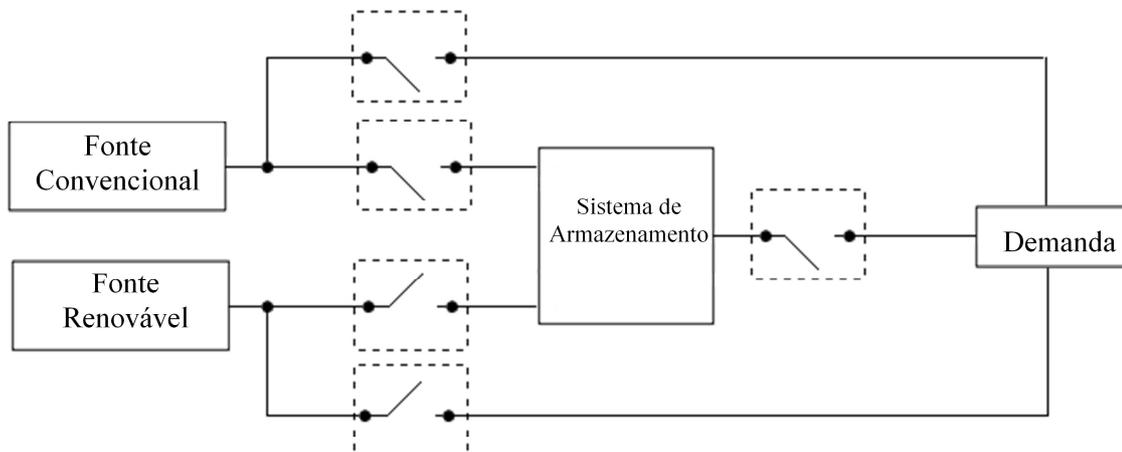


**Figura 2. 3.** Configuração em serie de um sistema híbrido.

Esta configuração é a mais simples e fácil que existe porque só precisa monitorar e controlar a carga e descarga das baterias, mas suas principais desvantagens são a baixa eficiência geral do sistema e um dimensionamento muito grande do banco das baterias.

### 2.3.2. Configuração Comutada.

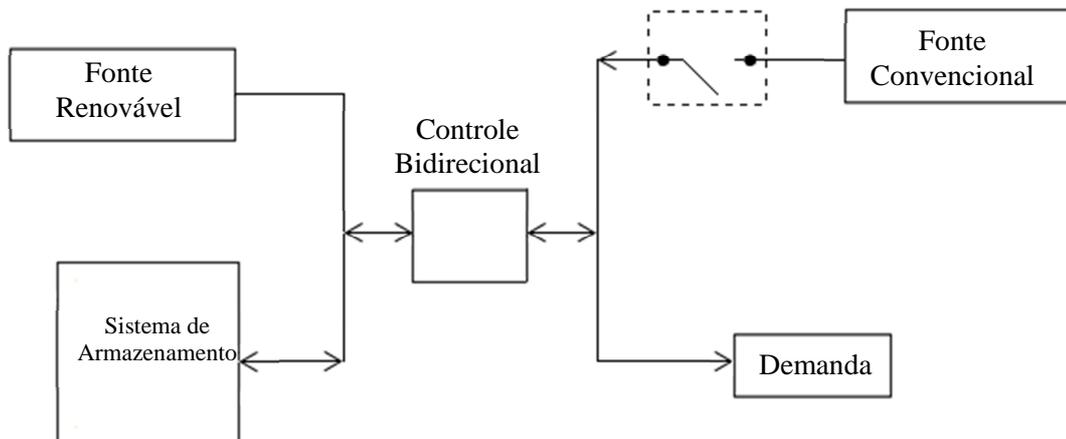
A configuração comutada é uma das instalações mais comuns (Wichert, 1997). Nesta, as fontes convencionais, as fontes renováveis, ou o sistema de armazenamento podem suprir diretamente a demanda. O sistema de armazenamento pode ser carregado por qualquer das fontes. Um esquema da configuração é mostrada na figura 2.4. Sua principal desvantagem é que a alimentação da demanda por mais de duas fontes ao mesmo tempo não é possível.



**Figura 2. 4.** Configuração comutada de um sistema híbrido.

### 2.3.3. Configuração em Paralelo

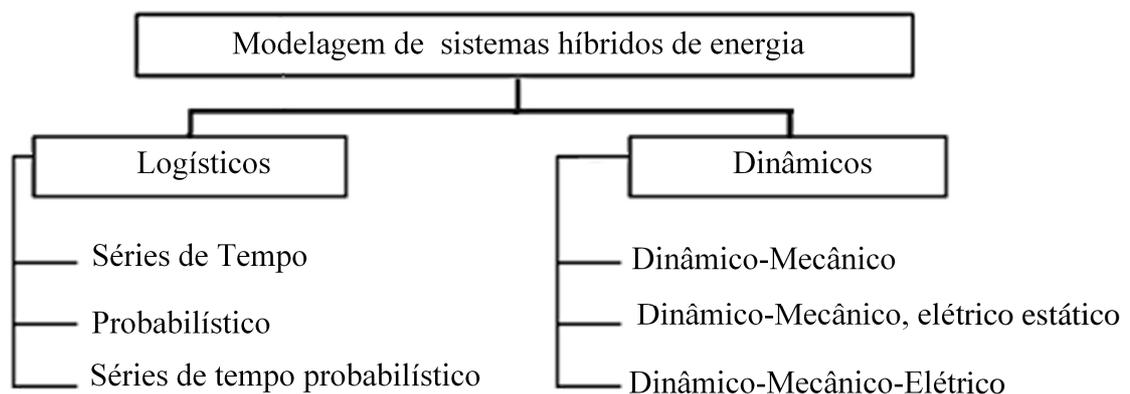
A configuração em paralelo, mostrada na figura 2.5, tem a característica que a carga pode ser suprida por qualquer das fontes que integram o sistema híbrido e o sistema de armazenamento, individualmente ou todas ao mesmo tempo. Esta topologia tem um desempenho superior em relação ao sistema híbrido em série (Ashari e Nayar, 1999). Neste esquema, as fontes de energia renováveis e a fonte convencional podem fornecer uma porção da carga diretamente, resultando em uma maior eficiência global do sistema. Quando existe um excesso de energia no sistema o sistema de armazenamento é carregado. A principal desvantagem desta configuração é seu controle complexo.



**Figura 2. 5.** Configuração em paralelo de um sistema híbrido.

## 2.4. MODELAGEM DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Nos últimos tempos, muitos modelos foram desenvolvidos para sistemas híbridos. Por exemplo, pesquisadores da Universidade de Massachusetts desenvolveram vários modelos analíticos de diferente sofisticação e seu uso geral para sistemas híbridos eólicos / diesel (Manwell et al., 2006) e embora o foco desses modelos sejam os sistemas híbrido eólico / diesel, o mais estudados e desenvolvidos, também podem ser aplicados a sistemas híbridos de geração de energia constituído por fontes renováveis intermitentes e uma fonte fixa que garante a cobertura da demanda e segurança do sistema. Geralmente, podem-se classificar estes modelos em duas grandes categorias (figura 2.6): Logísticos e Dinâmicos.



**Figura 2. 6.** Classificação geral da modelagem de sistemas híbridos de energia.

### 2.4.1. Modelagem logístico de sistemas híbridos

Os modelos logísticos são utilizados principalmente para as previsões de desempenho a longo prazo, dimensionamento de componentes, e fornecer critério nas análises econômicas. Estes modelos podem ser divididos em três categorias (Infield et al., 1990 apud Manwell et al., 2006):

Séries de Tempo (ou estado quase estável): Este tipo de modelo requer a série de tempo a longo prazo das variáveis, como velocidade do vento, insolação ou demanda no tempo.

- Probabilístico: Estes modelos geralmente requerem dados da carga e recursos de longo prazo (por exemplo, mensal ou sazonal) como entradas. Seu modelo analítico baseia-se na utilização de técnicas de modelagem de estado estável.
- De séries de tempo probabilístico: estes modelos são uma combinação dos dois modelos antes mencionados. Estes modelos utilizam as séries de tempo para ter em conta as variações da carga e de recursos ao longo de intervalos que variam tipicamente desde 10 minutos até uma hora. Flutuações em intervalos menores são tratadas por meio de técnicas estatísticas.

#### **2.4.2. Modelagem dinâmica de sistemas híbridos.**

Os modelos dinâmicos são usados principalmente para a concepção de componentes, análise da estabilidade do sistema, e determinação de qualidade de energia. Eles são geralmente utilizados para sistemas híbridos de energia sem capacidade de armazenamento, ou com sistemas de armazenamento mínimo. Dependendo do tamanho do passo de tempo e do número de componentes modelados, eles podem ser divididos em três categorias (Manwell et al., 2006):

- Dinâmico-Mecânico: Este tipo de modelo é baseado nas equações do movimento e balanço de energia. Ele pode ser usado para obter uma primeira aproximação do comportamento dinâmico de um sistema.
- Dinâmico-Mecânico, elétrico estático: Este modelo é baseado nas equações mecânicas do movimento e as equações de estado estacionário dos componentes elétricos do sistema. Ele pode dar uma primeira aproximação do comportamento elétrico do sistema.

- *Dinâmico-Mecânico-Elétrico*: baseiam-se nas equações dinâmicas de movimento dos componentes mecânicos e elétricos do sistema. Eles são destinados a investigar a estabilidade elétrica do sistema (escala de milissegundos) e vibrações mecânicas.

## 2.5. TRABALHOS REALIZADOS SOBRE PROJETO E MODELAGEM DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Inúmeros sistemas híbridos têm sido instalados em muitos países do mundo nas últimas três décadas, fundamentalmente com a finalidade de fornecer eletricidade para comunidades isoladas, para pequenos sistemas de bombeamento e dessalinização de água, refrigeração, entre outras aplicações.

Atualmente, não há uma base de dados que aponte o número de sistemas híbridos implantados e em funcionamento no mundo, tampouco um registro do ano de implantação do primeiro sistema. No entanto, sabe-se que a utilização dos sistemas híbridos teve seu início na década de 1970, provavelmente decorrente da busca de uma alternativa energética frente à crise do petróleo de 1973 (Tavares e Fagundes, 2008). Na figura 2.7 apresenta-se resumidamente a evolução do emprego dos sistemas híbridos.

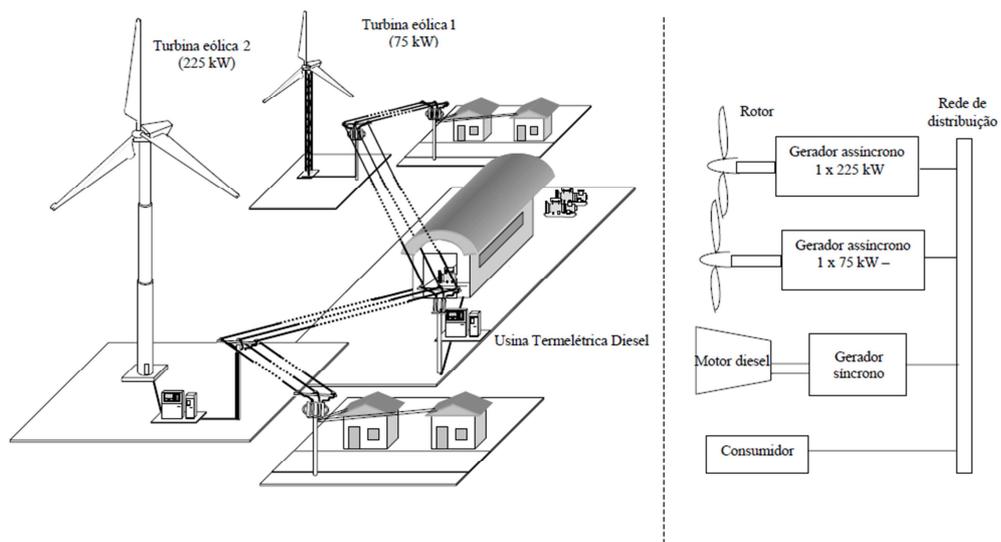


**Figura 2. 7.** Evolução do emprego dos sistemas híbridos (Tavares e Fagundes, 2008)

Segundo Borges et al. (2010) uns dos primeiros sistemas instalado foi Eólico-Diesel, o mais comum hoje em dia, no ano de 1977 em Clayton, Novo México, Estados Unidos da América (EUA). Em Nelson (2002) encontra-se que no ano de 1978, um sistema híbrido foi instalado na reserva indígena Papago, Arizona (EUA). O sistema estava integrado por geradores diesel e módulos fotovoltaicos.

O resultado positivo incentivou novas combinações, como as pequenas hidrelétricas, células de combustível e unidades a biomassa. Com o objetivo de verificar a evolução dos sistemas híbridos no América e o Caribe estão listadas na Tabela 2.1 as configurações mais comuns. Nesta tabela é possível verificar a presença de geradores a diesel em quase todas as instalações. Isso reforça a tese de que a redução de combustíveis fósseis tem sido o principal objetivo e motivação. Também podese observar a evolução das configurações, entre os anos de 1970 e 1980, o predomínio foi Eólico-Diesel. Após 1990, as configurações Fotovoltaico-Diesel e Fotovoltaico-Eólico-Diesel tornam-se mais comuns (Borges, et al., 2010).

Como é mostrado na tabela 2.1, no Brasil o primeiro sistema híbrido foi instalado no ano de 1992 na ilha de Fernando de Noronha, no Estado de Pernambuco. O sistema Eólico-Diesel tinha uma turbina eólica com capacidade de 75 kW e um motor diesel de 50 kW. No ano 2001 com a instalação de uma segunda turbina de 225 kW a capacidade total de geração do sistema híbrido aumento-se para 2,1 MW com 300 kW de capacidade eólica e 1,8 MW Diesel (da Silva, et al., 2005). O esquema do sistema e mostrado na figura 2.8.



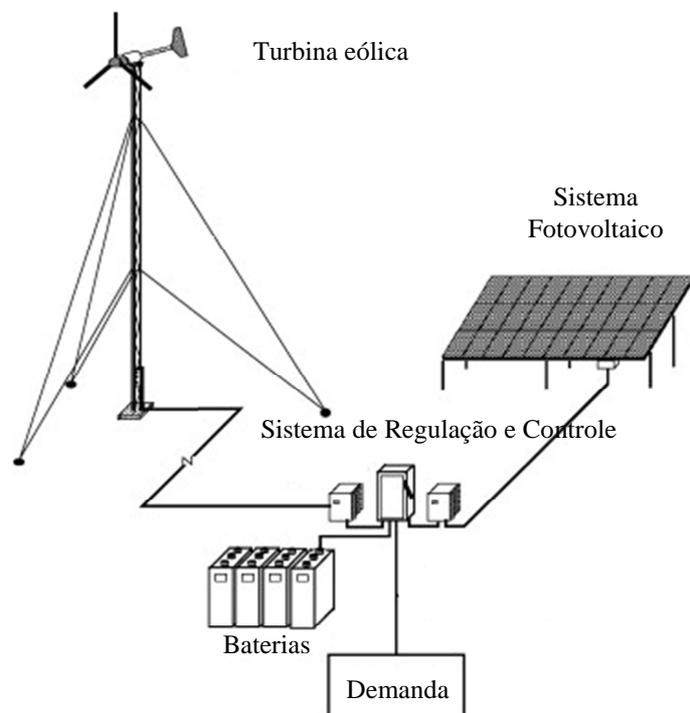
**Figura 2. 8.** Sistema híbrido eólico diesel da Ilha de Fernando de Noronha. Modificado (da Silva, 2002)

**Tabela 2. 1.** Sistemas híbridos instalados em América e o Caribe (Borges, et al., 2010).

Configuração	Lugar/nome	País	Capacidade (kW)	Ano
<b>Eólico+Diesel</b>	Clayton	EUA	200 + Não definido	1977
	Block Islands	EUA	250 + 1125	1979
	Ft. Severn	Canadá	60 + 405	1985
	Calvert Island	Canadá	2-3+12	1986
	AWST	Canadá	37,5+ 2-5	1987
	Cambridge Bay	Canadá	4-25+ Não definido	1987
	Fernando de Noronha	Brasil	75 + 50	1992
	Isla Huapi	Chile	Não definido	1996
	Puacho	Chile	Não definido	1996
	Praia Grande	Brasil	7,5 + 15	1998
	Cayo Romano	Cuba	10 + 10	1999
Isla Tac	Chile	15 + 12	2000	
<b>Fotovoltaico+Diesel</b>	Papago Indian Reservation	EUA	3,5 + Não definido	1978
	Natural Bridges	EUA	100 + 40	1980
	Vila Campinas	Brasil	52,2 + 96	1996
	Joanes	Brasil	10,2 + 40	1997
	Joshua Tree	EUA	21 + Não definido	1998
	Chorreras Icemaker	México	2,4 + 6,3	1999
	RAPS Indiana	Peru	60 + 200	2001
	Araras	Brasil	20,5 + 162	2001
<b>Fotovoltaico +Eólico+Diesel</b>	Maria Magdalena Village	México	4,3 + 5 + 16,7	1992
	San Antonio Agua Bendita	México	12,4 + 20 + 40	1993
	X-Calak	México	Não definido	1993
	Costa de Cocos	México	1 + 10 + 15	1996
	Tamaruteua	Brasil	3,84 + 15 + 32	1999
	San Juanico Village	México	17 + 100 + 80	1999
	Morn Savane	Haiti	224 + 1,2 + 12,5	2001
	Hilairi	Haiti	2,24 + 2,4 + 12,5	2001
	São Tomé	Brasil	3,2 + 7,5 + 16	2003
	Sucuriju	Brasil	20 + 37,5 + 48	2008
	Ilha deLençois	Brasil	21 + 22,5 + 53	2008
<b>Fotovoltaico + Eólico</b>	El Oyameo	México	Não definido	1991
<b>Pequenas hidrelétricas + Diesel</b>	Jujuy	Argentina	50 + 48	1996
<b>Fotovoltaico+Propano</b>	Volcanos National Park	EUA	0,9 + 4,5	1998

O sistema híbrido eólico/diesel em operação na Ilha de Fernando de Noronha, por exemplo, é composto por geradores diesel e por duas turbinas eólicas. Essas turbinas injetam potência elétrica diretamente na rede elétrica isolada (da Silva, 2002).

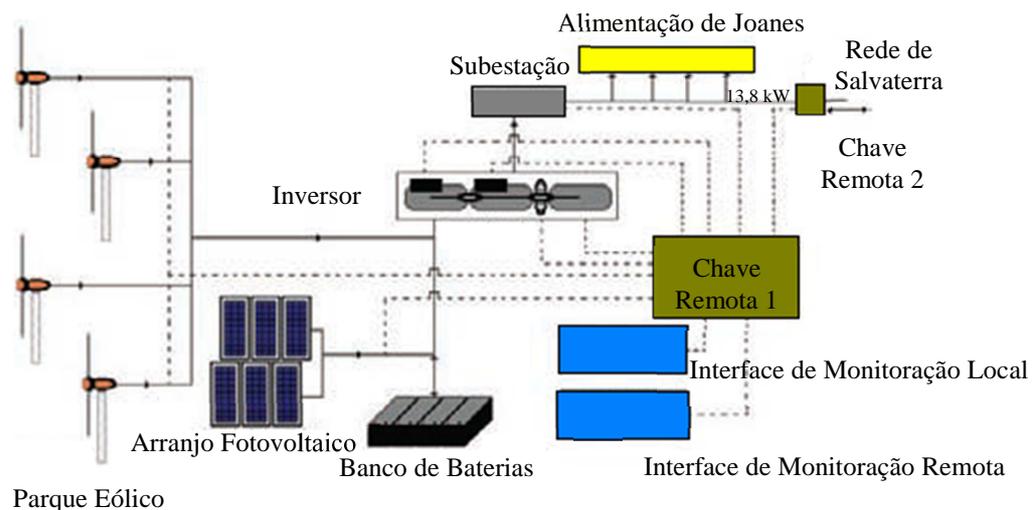
As investigações feitas por Borges et al. (2010) mostram que embora o sistema Eólico-Diesel é o mais estudado e desenvolvido, existe um crescente interesse na proposta de configurações que possam substituir completamente a dependência de combustíveis fósseis em áreas isoladas. Os SHE sem fontes convencionais de energia (geradores Diesel) mais comuns atualmente são os sistemas Fotovoltaico/ Eólico. Um diagrama esquemático deste sistema é mostrado na figura 2.9. Como pode ser visto na figura, a eletricidade produzida através do gerador fotovoltaico e da turbina eólica é regulada antes de suprir a demanda. O excesso de energia produzida pelo sistema híbrido é armazenado nas baterias para ser utilizada mais tarde quando a demanda não pode ser suprida só com os sistemas das fontes renováveis. Neste sistema, a quantidade de eletricidade produzida depende da radiação solar incidente total e da velocidade do vento.



**Figura 2. 9.** Configuração de um SHE Fotovoltaico/ Eólico (Ekren, et al.,2009).

Estas aplicações, SHE sem fontes convencionais de energia, tem como unidade de apoio os sistemas de armazenamento de energia. No sistema da figura 2.9 as baterias são utilizadas para dar confiabilidade do fornecimento para a a demanda em todas as condições operacionais e armazenar o excesso de energia produzido.

No Brasil no ano de 1997 entrou em funcionamento um SHE Fotovoltaico/ Eólico na vila de Joanes, município de Salvaterra, ilha do Marajó, Estado do Pará. O sistema foi concebido para ser interligado à rede da usina termelétrica a diesel do município de Salvaterra, que atende a Joanes, visando complementar e aliviar a sua geração nos momentos de déficit e durante o horário de ponta. Os principais dados do sistema são: um arranjo fotovoltaico de 10,2 kW, quatro aerogeradores de 10 kW cada, e um banco de baterias. O sistema é mostrado na figura 2.10.

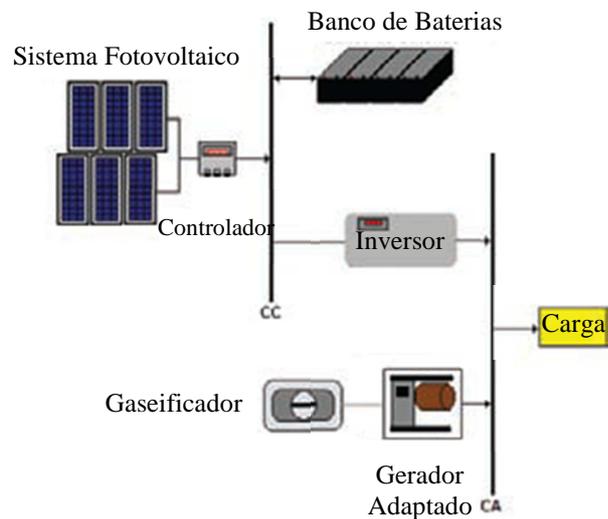


**Figura 2. 10.** Configuração de um SHE Fotovoltaico/ Eólico da vila de Joanes. (Tavares e Fagundes, 2008)

Este sistema híbrido pode operar tanto de forma isolada quanto conectado à rede existente em Joanes a qual esta conectada a usina termelétrica da localidade de Salvaterra (UTE-Salaterra). Na estratégia de operação isolada, a geração proveniente do sistema híbrido fotovoltaico/eólico que atende a vila, aliviando assim a planta de Salvaterra, principalmente

no período de demanda máxima. Quando a demanda em Joanes ultrapassa a capacidade de geração do sistema híbrido, a rede de distribuição é conectada à UTE-Salvterra, complementando a geração renovável e recarregando o banco de baterias através do inversor bidirecional (Tavares e Fagundes, 2008) .

Segundo Tavares e Fagundes (2008) a necessidade de obtenção de maior eficiência global dos sistemas híbridos, motiva atualmente a inserção de outras formas de geração nos mesmos. Dentre elas destacam-se a biomassa e a célula a combustível. Na figura 2.11 apresenta o esquema de um sistema híbrido utilizando uma central térmica a biomassa através da gasificação.

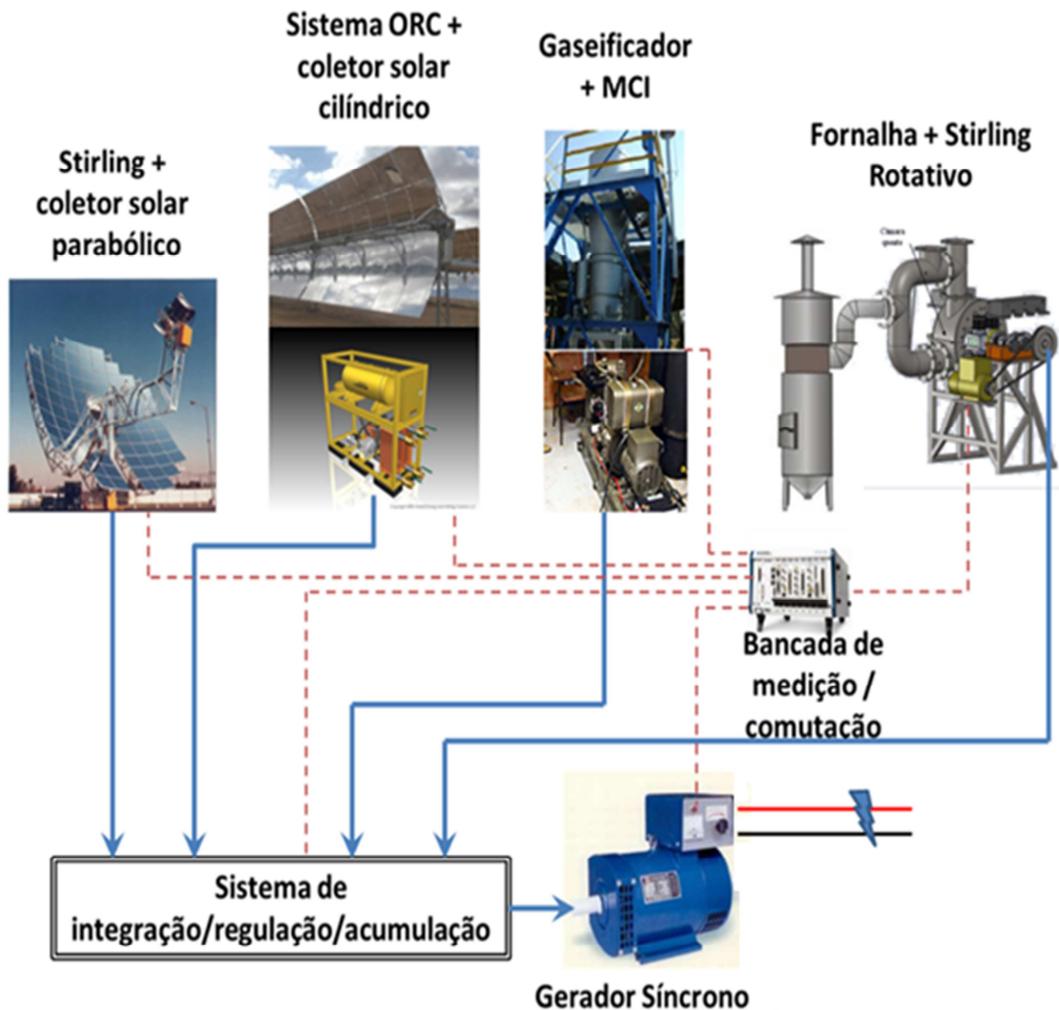


**Figura 2. 11.** Configuração de um SHE Fotovoltaico/Biomassa(Tavares e Fagundes, 2008).

N figura 2.11, o sistema de armazenamento de energia (baterias) é utilizado para armazenar só os excesso de energia produzidos pelo sistema solar e ser posteriormente utilizado.

Segundo Bernal e Dufo (2009) nos sistemas híbridos com baterias e sem fontes convencionais de energia ( geradores a diesel), a estratégia de controle é muito simples: a bateria ( sistema de armazenamento) é carregada se a energia renovável é gerada em excesso depois de atender a demanda, e descarregada se o consumo excede a energia produzida pelo sistema renovável.

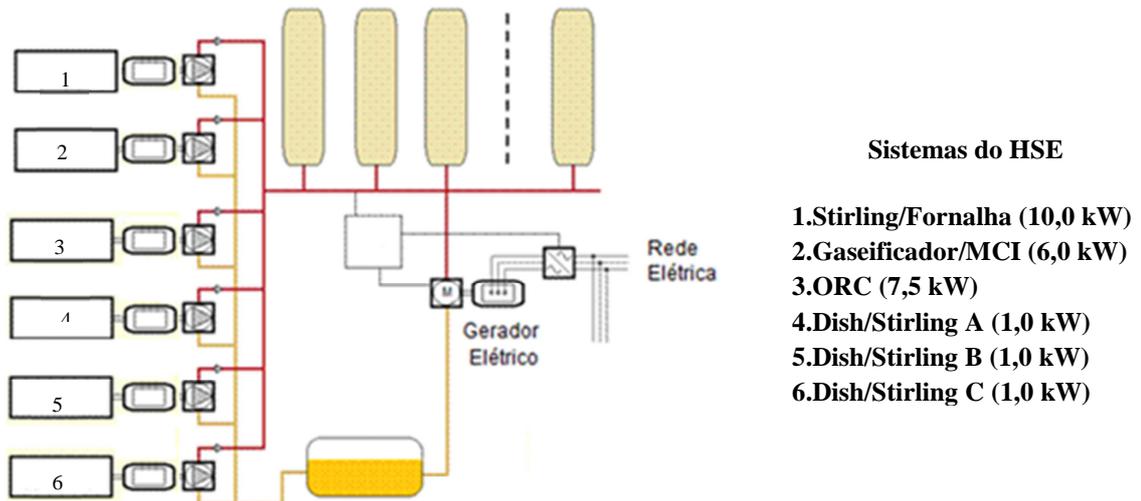
Na Universidade Federal de Itajubá está sendo desenvolvido um projeto experimental junto à CPFL (P&D 0041 SHSB) pelo grupo de pesquisa NEST, para o desenvolvimento de um sistema de conversão de energia híbrido solar/biomassa (Figura 2.12) composto por sistemas Dish/Stirling, Sistemas Gaseificador motor de combustão interna, Sistema ORC (Ciclo Orgânico Rankine), Sistema Stirling/Fornalha e um sistema de integração, regulação/acumulação mecânica e/ou elétrica para geração de energia.



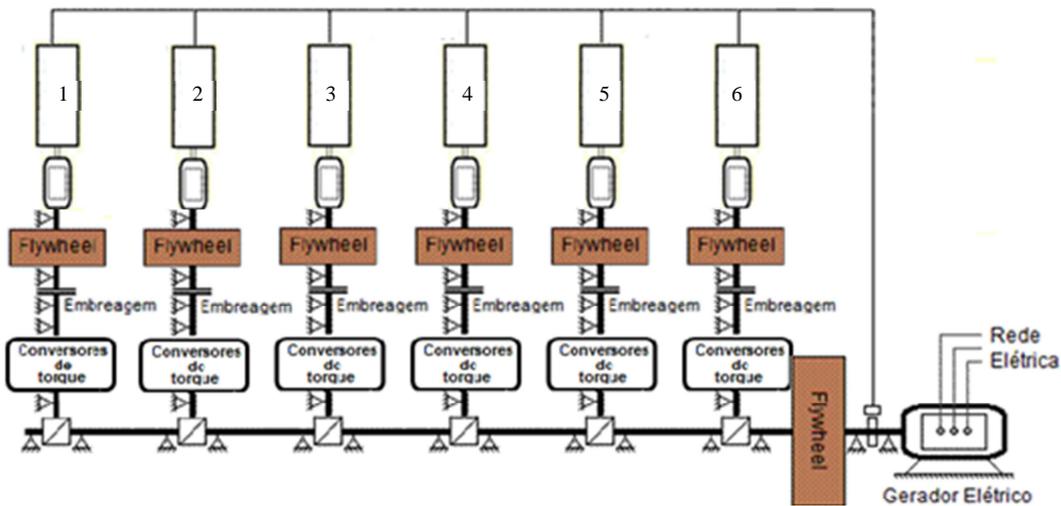
**Figura 2. 12.** Configuração do SHE Solar/Biomassa em desenvolvimento na UNIFEI.

Os diferentes sistemas mostrados na figura 2.12 podem ser integrados, utilizando algum sistema de armazenamento. O uso de fontes convencionais de energia e as baterias de células (as mais utilizadas para este fim atualmente) neste sistema foram descartados pela natureza do uso de energia renováveis do SHE, é por isso que o projeto procura um sistema

de armazenamento de energia para a integração e controle do SHE. Em uma integração mecânica (Volantes de Inercia, Acumuladores hidráulicos, etc.) as saídas de potência dos eixos dos motores (Stirling e MCI) dos sistemas podem ser integradas como é mostrado na figura 2.13.



#### a) Integração Hidráulica



#### b) Integração com Volantes de Inercia (Flywheel)

**Figura 2. 13.** Possíveis integrações Mecânicas do SHE Solar/Biomassa em desenvolvimento na UNIFEI

Neste trabalho de mestrado se estuda um sistema de armazenamento para integração e o controle do SHE Solar/Biomassa com o propósito fornecer subsídios para o projeto em desenvolvimento na UNIFEI.

A modelagem e o projeto dos SHE são principalmente dependentes do desempenho dos sistemas que o compõem. A fim de prever o desempenho do sistema completo, devem ser modelados individualmente os componentes e depois pode ser avaliado o conjunto para atender a demanda de forma confiável (Deshmukh e Deshmukh, 2008). Na literatura cerca de 90% dos estudos dos SHE enfocam-se em seu projeto e análise econômico. No entanto, poucos estudos concentram-se no controle do SHE (Nema, et al., 2009).

O sistema de controle é um dos elementos mais importantes de qualquer SHE. Como o seu nome indica é o encarregado do controle dos componentes através das entradas e saídas de cada um no SHE S, isto é, gerencia o fluxo de energia entre os diferentes componentes do sistema de energia híbrido. O sistema de controle é necessário para a seleção da fonte de energia, existem dois níveis distintos no controle de um SHE:

- Controle dinâmico, que trata com o controle da frequência e magnitude da tensão de saída do sistema.
- Controle de Despacho, que trata com o fluxo de energia no sistema das várias fontes para atender a demanda.

A estratégia de atendimento da demanda do SHE é um algoritmo de controle para a interação entre os vários componentes do sistema. Esta estratégia determina os fluxos de energia a partir das fontes existentes no SHE, como gerador diesel e diferentes fontes renováveis, para atender a demanda, incluindo a carga e descarga dos sistemas de armazenamento de energia. A incorporação de um sistema de armazenamento faz o controle mais prático e relativamente fácil (Gupta, et al., 2011).

Segundo Gupta et al. (2010) e Gupta et al. (2011) na literatura existem principalmente 5 estratégias de controle de despacho nos SHE para atender a demanda:

1. Estratégia do carregamento do sistema de armazenamento: o uso do sistema de armazenamento é só para absorver o excedente da energia gerada pelas fontes

renováveis, a fonte convencional ( gerador diesel) nunca é utilizado para carregar o sistema de armazenamento. A absorção de energia ( Carregamento do sistema de Armazenamento) continua até que:

- A capacidade máxima do sistema de armazenamento é alcançada. (SOC<sup>1</sup>=100%).
  - A energia gerada pela fonte renovável não é suficiente para suprir a demanda.
2. Estratégia da descarga do sistema de armazenamento: o sistema de armazenamento é utilizado quando a energia gerada pela fonte renovável não é suficiente para suprir a demanda e continua até que:
- O SOC mínimo do sistema de armazenamento é alcançado.
  - A energia gerada pela fonte renovável é suficiente para suprir a demanda.
3. Estratégia de atendimento imediato da demanda: a fonte convencional (gerador Diesel) é ligada para atender totalmente demanda, o sistema de armazenamento não é carregado ou descarregado.
4. Estratégia do ciclo do carregamento: a fonte convencional (gerador Diesel) é ligada para suprir a demanda e carregar o sistema de armazenamento e continua ligado até:
- O SOC do sistema de armazenamento é máximo.
  - A energia gerada pela fonte renovável é igual o maior para suprir a demanda.
5. Estratégia de corte de picos: a fonte convencional (gerador Diesel) trabalha a plena potência. A energia do sistema de armazenamento só é utilizada para suprir flutuações instantâneas na demanda ( se a demanda é constante).

---

<sup>1</sup> SOC (State of Charge): é o estado (nível) de carga do sistema de armazenamento. As unidades do SOC são pontos percentuais, 0% = vazio (sem carga) e 100% = totalmente carregado.

Gupta et al. (2011) afirma que principalmente a estratégia do carregamento do sistema de armazenamento é a de maior prioridade e as outras são usadas alternativamente quando a energia gerada pela fonte renovável não é suficiente para suprir a demanda.

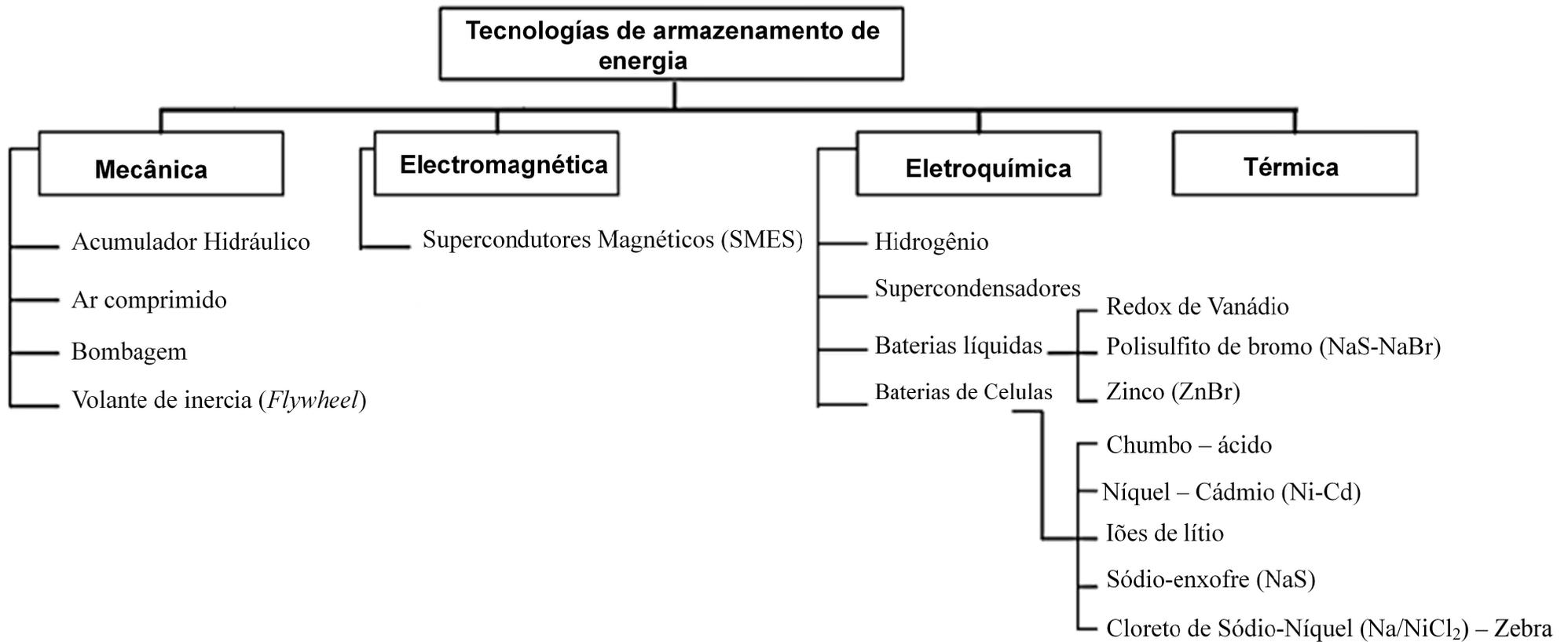
## 2.6. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO

O armazenamento de energia elétrica há muito é considerada uma tecnologia crítica. Hoje, estes sistemas desempenham o importante papel de unificação, distribuição e incremento das capacidades dos sistemas de energias alternativas e renováveis. (Farret e Godoy, 2006).

O desenvolvimento e uso de energias renováveis tem experimentado um crescimento acelerado nos últimos anos. Nos próximos 20-30 anos, todos os sistemas de energia sustentável terão que ser baseados no uso racional dos recursos tradicionais e uma maior utilização de energias renováveis (Ibrahim, et al., 2008).

A natureza das fontes renováveis, como a solar e eólica, é intrinsecamente variável no tempo, dependendo dos ciclos diários, das estações do ano e das variações aleatórias da atmosfera. Como consequência disso, são muitos os momentos nos quais a potência elétrica que pode ser entregue pela parte renovável difere, por excesso ou por déficit, da que é demandada por uma determinada aplicação. No caso particular dos sistemas híbridos de produção de eletricidade, o correto fornecimento elétrico da aplicação exige, portanto, poder armazenar energia nos momentos em que a produção excede a demanda, para utilizá-la em situação inversa. Denomina-se de sistema de armazenamento ao componente do sistema que se encarrega de realizar tal função (Fagundes Barreto, et al., 2008).

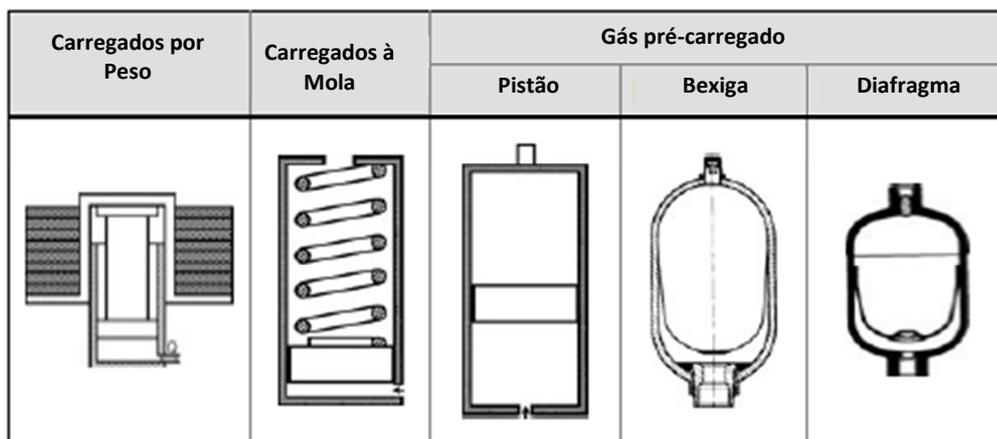
A eletricidade pode ser transformada em uma forma de energia armazenável (química, mecânica, elétrica, ou energia potencial) e ser transformada novamente quando é necessário. Existem diferentes tecnologias de sistemas de armazenamento de energia (ESS) (Ibrahim, et al., 2012). Na figura 2.14 apresenta-se uma classificação geral dos sistemas de armazenamento de energia.



**Figura 2. 14.** Classificação das tecnologias de armazenamento de energia, adaptado (Swierczynski, et al., 2010)

### 2.6.1. Acumulador Hidráulico

Um acumulador hidráulico é um recipiente, que pode conter uma quantidade relativamente grande de fluido hidráulico sob pressão. Ele é utilizado em uma ampla variedade de aplicações, como um dispositivo de armazenamento de energia, um amortecedor de pulsação, um supressor de picos, um compensador de dilatação térmica, ou uma fonte de energia de emergência (Pourmovahed e Otis, 1990). Seu comportamento é análogo a um condensador elétrico, mas nenhuma reação química está presente, um gás inerte ou uma mola de aço é comprimido apenas pela pressão do fluido hidráulico para armazenar energia. (Minav, et al., 2012). Os acumuladores que contêm um gás inerte pressurizado (na maioria dos casos nitrogênio) contêm duas câmaras, uma para o óleo e uma para o gás, separadas por uma bexiga, um diafragma ou um êmbolo como é mostrado na figura 2.15. Quando o fluido hidráulico é bombeado para dentro do acumulador o gás é comprimido, fazendo sua pressão aumentar e armazenar energia. Quando o fluido é descarregado através do motor, a pressão do gás diminui enquanto proporciona energia.



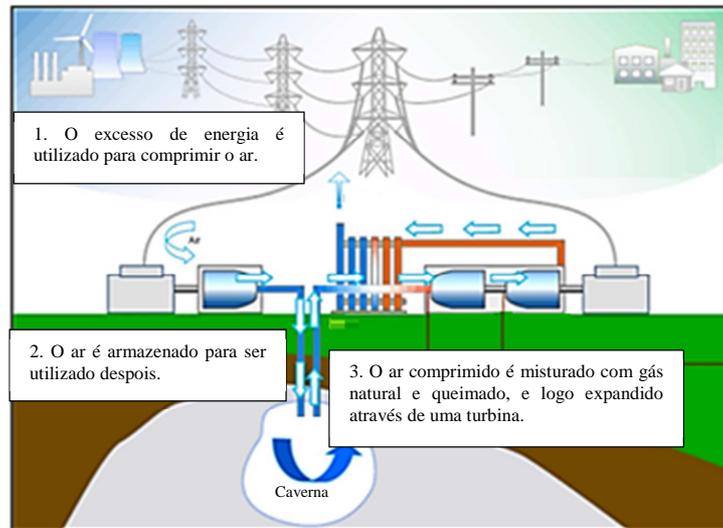
**Figura 2. 15.** Acumuladores Hidráulicos (Rabie, 2009).

Os acumuladores hidráulicos como sistemas de armazenamento têm as vantagens de seu ciclo de vida ser longo e de não serem dependentes dos perfis de carga /descarga,

precisam de pouca manutenção, a capacidade de armazenamento não é dependente do tempo de uso (vida do sistema), a sobrecarga do sistema é quase impossível porque é protegido por uma válvula de escape. Sua densidade de energia é pequena comparada com as baterias químicas, varia 3,2-5,55 Wh / kg (250 bar de pressão), porque no momento existem limitações de materiais para resistir a altas pressões (a densidade de energia aumenta com a pressão), e a eficiência é ligeiramente inferior à bateria de chumbo-ácido, em torno de 73%. (Hadjipaschalis, et al., 2009).

### **2.6.2. Ar comprimido.**

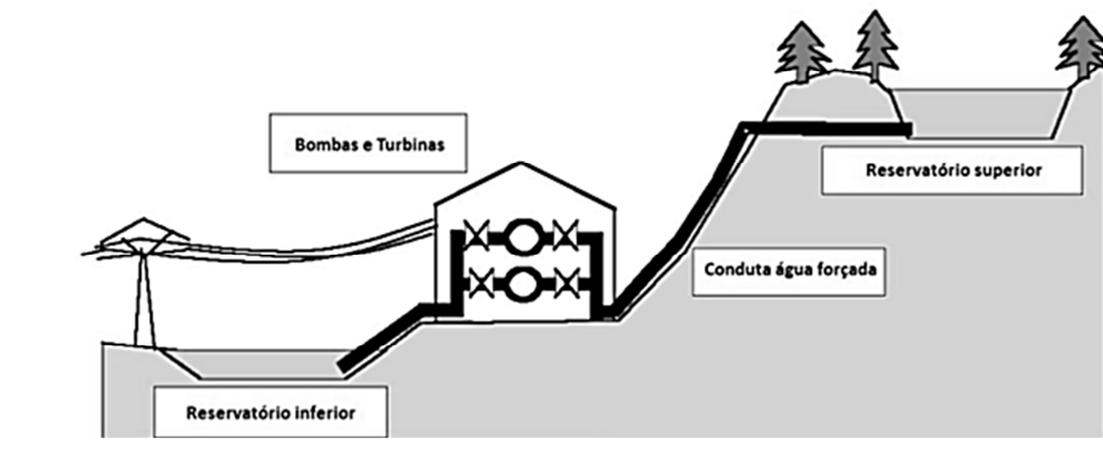
Os sistemas de armazenamento de energia por ar comprimido (SAEAC) remontam-se ao ano 1949 quando Stal Laval apresentou a primeira patente do SAEAC, que usou uma caverna subterrânea para armazenar o ar comprimido. Como é mostrado na figura 2.16, SAEAC separa a compressão e expansão do ciclo de turbina a gás convencional em dois processos e armazena a energia na forma de ar comprimido. No período de baixa demanda, a energia é armazenada através da compressão do ar num espaço (tipicamente 4,0 ~ 8,0 Mpa) que pode ser uma caverna de armazenamento subterrâneo. Para extrair a energia armazenada, o ar comprimido é retirado do recipiente de armazenagem, misturado com gás natural e queimado, e então expandido através de uma turbina. A turbina está ligada a um gerador para produzir eletricidade. O calor residual dos gases de escape pode ser retornado ao ciclo através de um recuperador antes de ser liberado para a atmosfera. Os SAEAC estão na faixa de 50 a 300 MW, o período de armazenagem também é mais longo do que os outros métodos de armazenagem, uma vez que as perdas são muito pequenas, este sistema pode ser utilizado para armazenar energia durante mais de um ano e seu valor típico de eficiência de armazenamento está no intervalo de 60-80%. Os custos de capital para instalações SAEAC variam dependendo do tipo de armazenamento subterrâneo, mas estão tipicamente na faixa de \$ 400 até \$ 800 por kW. Sua densidade energética é de 3-6 Wh / litro ou 0,5-2 W / litro e seu o tempo de vida é de 20-40 anos. (Chen, et al., 2013).



**Figura 2. 16.** Sistema de armazenamento de energia por ar comprimido. (Chen, et al., 2013)

### 2.6.3. Bombeamento.

Os sistemas de armazenamento por bombeamento (SAB) são a única tecnologia de armazenamento disponível operando em grande escala (Ming, et al., 2013). O princípio básico do SAB é utilizar a diferença da altitude para armazenar energia elétrica. O sistema é composto por dois reservatórios de água em diferentes altitudes conectados por um sistema de canais, e um número de bomba e turbinas (Figura 2.17). Durante o tempo de pouca demanda de eletricidade, o excesso de energia é usada para bombear a água para o reservatório superior. Quando a demanda é alta, a água do reservatório superior é liberada de volta para o inferior através de turbinas que geram eletricidade. A eficiência desse tipo de instalações é de entre 70% - 85% (ESA, 2013). Os sistemas SAB são capazes de fornecer energia confiável em poucos minutos e são adequados para a regulação de frequência, nivelamento de carga, e gestão de energia. Por estas capacidades, Os SAB pode ser utilizada em sistemas isolados, onde as tecnologias de energia renovável são utilizadas, a fim de melhorar a qualidade de energia e aumentar o seu nível de penetração. As principais desvantagens desta tecnologia são os longos tempos de construção e sua dependência em relação à geografia, restrições ambientais e ecológicas (Connolly, 2009).

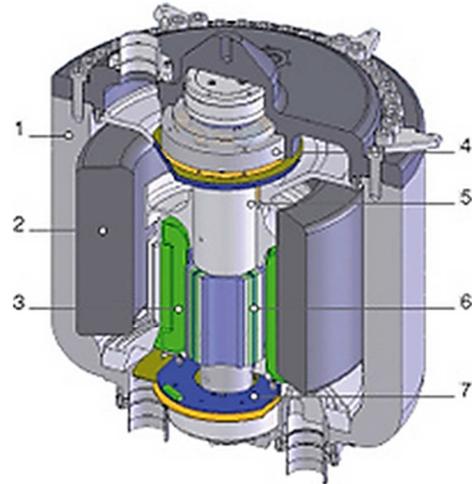


**Figura 2. 17.** Constituição e topologia simplificada de um sistema de bombagem. (Muftron, et al., 2003)

#### 2.6.4. Volante de inércia (Flywheel).

O volante de inércia armazena energia em uma massa em rotação. Dependendo da inércia e da velocidade da massa em rotação, uma dada quantidade de energia cinética é armazenada como energia de rotação. Para eliminar as perdas por atrito devido ao ar, o volante é colocado em um recipiente a vácuo e suspenso por mancais magnéticos para uma operação estável. A energia é transferida para dentro e fora do volante, utilizando uma máquina elétrica que pode funcionar como um motor ou gerador. Algumas das vantagens deste sistema são: tem pouca degradação da sua capacidade, o tempo de vida do volante é quase independente da profundidade e do ciclo de descarga, podem funcionar bem em descargas profundas ou pequenas, o estado de carga (SOC, State of Charge) pode ser facilmente medido pela velocidade de rotação, não é necessária nenhuma manutenção periódica, seu tempo de recarga é curto, e tem um baixo impacto ambiental (Bolund, et al., 2007). A eficiência típica deste sistema é de cerca de 85%, é sua resposta é muito rápida, mas a principal desvantagem é o curto tempo de descarga. Conseqüentemente, eles são adequados para aplicações de controle ou regulação de frequência, mas apenas para uma escala de tempo pequeno. (Swierczynski, et al., 2010). A figura 2.18 mostra os principais componentes de um Flywheel.

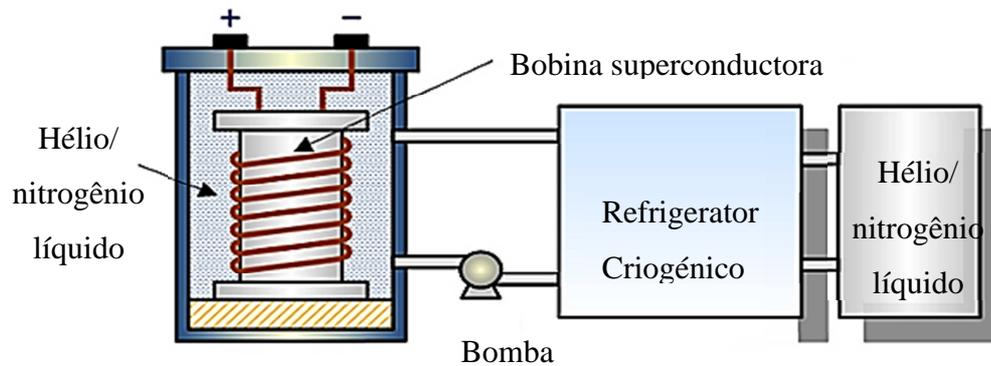
1. Corpo
2. Volante de inercia.
3. Enrolamentos estatóricos.
4. Rolamento magnético superior.
5. Sistema de vácuo.
6. Rotor.
7. Rolamento magnético inferior.



**Figura 2. 18.** O flywheel e suas partes. (SOCOMEK, 2013)

### 2.6.5. Supercondutores Magnéticos (SM)

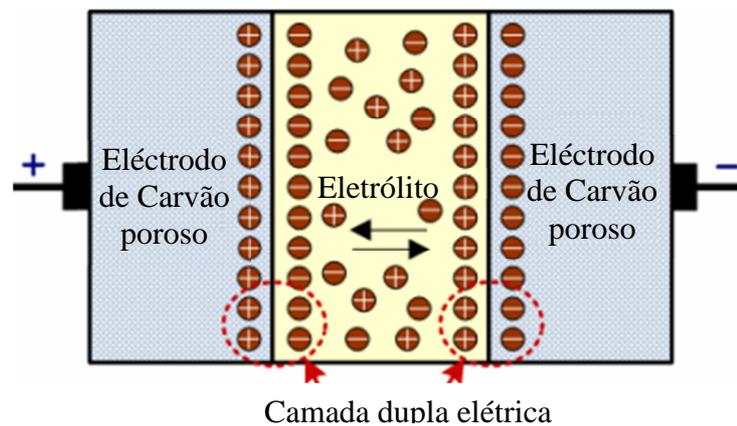
Os supercondutores magnéticos são um sistema que armazena energia em forma de eletricidade. O sistema é composto principalmente por uma bobina supercondutora, um refrigerador criogénico e um recipiente de vácuo que preserva baixa a temperatura da bobina ( $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). O meio de refrigeração é o hélio ou nitrogênio líquido). O esquema geral do sistema é mostrado na figura 2.19. Nesta temperatura, a resistência do material à corrente elétrica desaparece, o que permite elevadas eficiências de até 97% (Naish, et al., 2008). Os SMES são capazes de descarregar quase a totalidade da energia armazenada, e seu tempo de resposta rápido (menos de 100 ms) faz este sistema ideal para regular a estabilidade da rede. Sua principal desvantagem é o sistema de refrigeração que, embora não seja um problema em si, é muito caro e torna a operação mais complicada (Ibrahim, et al., 2008).



**Figura 2. 19.** Estrutura do um supercondutor magnético. (Molina, 2010)

### 2.6.6. Supercapacitores.

Os supercapacitores (SC) também conhecidos como capacitores elétricos de camada dupla, capacitores eletroquímicos de camada dupla, ou ultracapacitores, armazenam energia através de um campo elétrico formado quando uma tensão contínua é aplicada entre duas placas condutoras chamadas eletrodos (feitos de carvão poroso geralmente) imersos numa solução eletrolítica (tipicamente hidróxido de potássio ou ácido sulfúrico). O SC consta também de um separador que evita o contato físico dos eletrodos como mostra a figura 2.20, mas permite a transferência de Iões entre eles. A energia é armazenada como uma separação de carga na camada dupla formada na interface entre a superfície do material sólido (eletrodo) e o eletrólito líquido nos microporos do eletrodo (Molina, 2010). Os SC podem ser carregados substancialmente mais rápido do que as baterias convencionais e podem ser utilizadas dezenas de milhares de vezes, com uma alta eficiência. A as capacidades de armazenamento de energia são substancialmente maiores do que a dos capacitores convencionais, por aproximadamente duas ordens de magnitude (10-100 kW) mas seu principais problema são os curtos períodos de tempo e a auto descarga. (Chen, et al., 2009).



**Figura 2. 20.** Esquema de um supercondensador. (Molina, 2010)

### 2.6.7. Hidrogênio

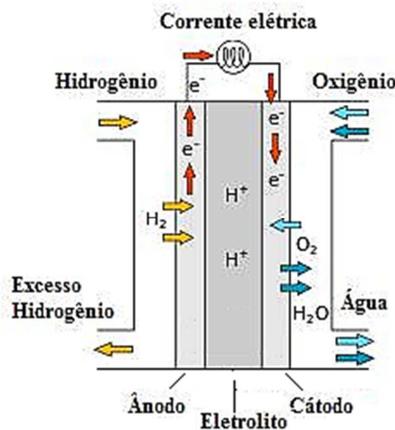
O armazenamento de energia por hidrogênio (SAPH) é uma das mais novas tecnologias e consiste de três etapas principais:

- Produção do hidrogênio
- Armazenamento do hidrogênio
- Geração de energia a partir do hidrogênio

O hidrogênio pode ser produzido por: extração de combustíveis fósseis, reação de metano com vapor e por eletrólise. A produção a partir de combustíveis fósseis é quatro vezes mais cara do que usar o próprio combustível. Ademais, a produção de hidrogênio a partir da reação de vapor de metano produz poluição. Últimos avanços aumentaram a eficiência da produção de hidrogênio a 85%. O armazenamento de hidrogênio pode ser feito por compressão, ou liquefação, a opção mais frequentemente é comprimir o hidrogênio (65 - 75% de eficiência). Para produzir energia a partir de hidrogênio são utilizados dois métodos: motor de combustão interna (MCI) e célula a combustível (FC), e sua eficiência é de 30-50% (Swierczynski, et al., 2010).

A FC converte a energia química em energia elétrica armazenada e consiste em dois eletrodos que estão separados por um eletrólito. No ânodo da célula, os elétrons e prótons de

hidrogênio são separados. Os elétrons viajam através de um circuito, gerando energia elétrica. No cátodo, um processo catalítico leva os elétrons de volta, combinando-os com os prótons, que tenham viajado através do eletrólito. As maiores vantagens da FC são sua maior eficiência em comparação com o motor de combustão interna. Na figura 2.21 é ilustrado o princípio de funcionamento da célula de combustível.



**Figura 2. 21.** Esquema de uma célula a combustível.

Supercapacitores e hidrogênio como sistemas armazenamento são métodos relativamente imaturos. A eficiência do armazenamento de hidrogênio, também não justifica o custo do sistema (Coppez, et al., 2010).

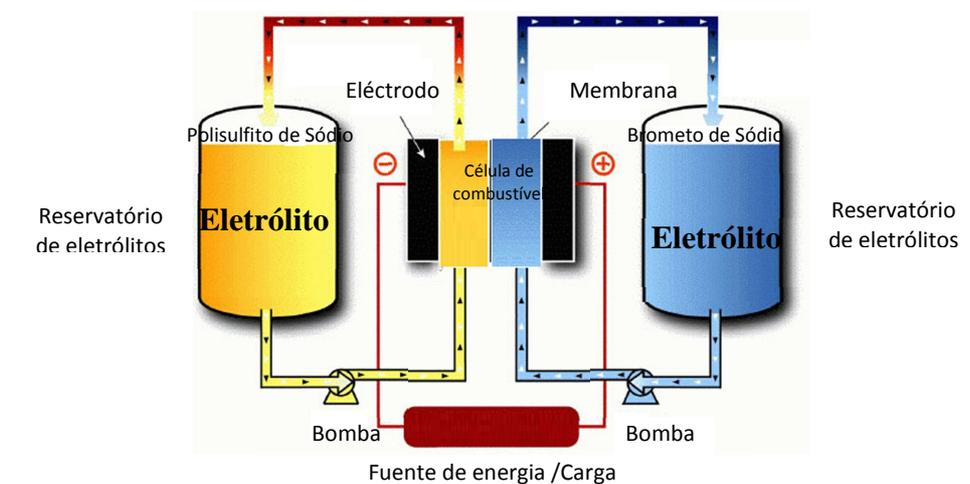
### 2.6.8. Baterias líquidas.

O sistema de armazenamento por baterias líquidas (SABL) consiste de dois reservatórios de eletrólitos desde os quais estes circulam (pela ação das bombas) através de uma célula eletroquímica, onde a energia química é convertida em eletricidade, que compreende um cátodo e ânodo e um separador de membrana, como mostra a figura 2.22. A energia é armazenada como energia potencial química por meio de uma reação reversível entre dois eletrólitos. O tamanho dos reservatórios, e a quantidade de eletrólito determina a densidade de energia das baterias e do fluxo das reações do eletrodo que ocorrem no anodo e cátodo.

Podem-se encontrar três tipos de eletrólitos:

- Redox de Vanadio(VR).
- Polissulfito de bromo (NaS-NaBr), também chamada Célula de combustível regenerativa.
- Zinc-Bromo (ZnBr).

A reação eletroquímica através da membrana da célula pode ser invertida (carga-descarga). Ao utilizar grandes reservatórios e acoplar um grande número de células é possível armazenar grandes quantidades de energia.



**Figura 2. 22.** Bateria líquida de Polissulfito de Bromo (Ibrahim, et al., 2008).

Entre as características das SABL tem-se: alta potência, longa duração, os eletrólitos podem ser substituídos facilmente, resposta rápida e pode ir do modo de carga para descarga em cerca de 1 ms (porque a maioria das reações redox tem um tempo de reação muito curto), baixa eficiência (devido à energia necessária para fazer circular o eletrólito e as perdas devidas a reações químicas). O sistema não tem nenhuma auto descarga, porque os eletrólitos não podem reagir quando estão armazenados separadamente (Divya e Østergaard, 2011).

### 2.6.9. Baterias de Células.

As baterias de células são atualmente a forma mais utilizada de armazenamento de energia, estão compostas por uma ou mais células eletroquímicas e cada célula é constituída por um líquido, ou um eletrólito sólido, junto com um eletrodo positivo (ânodo) e um eletrodo negativo (cátodo). Durante a descarga, as reações eletroquímicas ocorrem nos dois eletrodos, gerando um fluxo de elétrons através de um circuito externo. As reações são reversíveis, permitindo que a bateria seja recarregada através da aplicação de uma tensão entre os eletrodos externos (Chen, et al., 2009).

Tem se diferentes tipos de baterias de células disponíveis comercialmente:

- *Bateria de Chumbo – ácido:* são os dispositivos eletroquímicos recarregáveis mais antigo e mais usados e são de baixo custo. Eles podem tolerar uma profundidade de descarga de 75% sua eficiência é de 72-78%. Suas desvantagens são seu limitado ciclo de vida (especialmente em sistemas com de descarga profunda) e o chumbo utilizado nestas baterias é tóxico. Além disso, o ácido sulfúrico utilizado tipicamente como eletrólito é corrosivo e, quando a bateria é sobrecarregada gera hidrogénio, o que apresenta um risco de explosão (Naish, et al., 2008).
- *Baterias de Níquel:* Existem várias baterias baseadas em níquel atualmente disponíveis ou em desenvolvimento: níquel-cádmio (Ni-Cd), níquel-hidreto metálico (Ni-Mh), níquel-zinco (Ni-Zn) e cloreto de sódio-níquel (Na/NiCl<sub>2</sub>). Ni-Cd e Ni-Mh são as mais comuns, seu processo de fabricação é caro (o dobro do custo de baterias de lítio, quatro vezes o custo das baterias de chumbo-ácido) e têm uma alta taxa de auto descarga perdendo entre 5 e 20% da carga realizada por mês (Naish, et al., 2008). A desvantagem mais significativa de baterias de Ni-Cd é o cádmio, altamente tóxico, utilizado dentro delas. As baterias de Cloreto de Sódio-Níquel (Na/NiCl<sub>2</sub>) conhecidas como Zebra (Zero Emission Battery Research Activities), pertencem à família de baterias de alta temperatura. O ponto de fusão da sal utilizada neste dispositivo é 157 °C, portanto, esta é a temperatura de operação mínima teórica, mas o alcance típico

é de 270-350 °C. A operação é independente das alterações na temperatura ambiente, podem perder 10% ou mais de sua energia por dia, se ela não estiver funcionando (devido ao requisito de aquecimento para manter a temperatura do dispositivo) mas ela pode ter zero perdas se o sistema está funcionando, sua vida útil é afetada por a corrosão (Bradbury, 2010).

- *Baterias de Lítio*: Tem se dois tipos de Íons de Lítio (Li-íon) e polímero de lítio (Li-pol). As baterias de lítio têm peso reduzido e alta eficiência. Estas são utilizadas nos equipamentos elétricos portáteis, como laptops. O principal obstáculo associado com os sistemas de armazenamento de energia com baterias de Li é o custo, devido à embalagem especial e os circuitos de proteção de sobrecarga internos, portanto, não são atualmente consideradas para grandes aplicações. Além disso, o eletrólito utilizado em algumas baterias de lítio é tóxico (Bradbury, 2010).
- *Sódio-enxofre (NaS)*: As baterias de Sódio-enxofre tornaram-se comercialmente disponíveis em 2000, têm uma eficiência de 89%. Seu custo é relativamente alto, no entanto, considera-se vai diminuir com uma produção em massa, porque são construídas a partir de materiais baratos, abundantes e recicláveis. Nestas baterias o enxofre tem que ser mantido na forma líquida, razão pela qual a bateria tem que operar no intervalo de temperatura 320-340 ° C, o que necessita de energia, diminuindo a eficiência global do sistema de armazenamento (Swierczynski, et al., 2010).

#### **2.6.10. Armazenamento Térmico (AT).**

Os sistemas de armazenamento térmicos, armazenam energia como *calor sensível*, utilizando materiais de mudança de fase (MMF) que fazem uso da energia armazenada quando um material ou substância passa de uma fase para outra; ou o armazenamento *termoquímico* (ATQ) usando reações químicas para armazenar e liberar energia térmica. Os sistemas de AT armazenam energia por meio da refrigeração, aquecimento, fusão, solidificando ou vaporização de uma substância, e a energia se torna disponível na forma de calor, quando o processo é invertido. Os sistemas de armazenamento baseado em ATQ e MMF necessitam de

melhorias na estabilidade do desempenho de armazenamento, que está relacionado com as propriedades do material.

Os sistemas AT são utilizados particularmente em edifícios e processos industriais, mas estão se tornando particularmente importantes para o armazenamento de eletricidade em combinação com as centrais de energia solar para a produção de energia elétrica quando a luz solar não está disponível. Nos sistemas AT o custo é um grande problema. Em geral, os sistemas MMF e ATQ são mais caros do que os sistemas de calor sensível e são economicamente viáveis somente para aplicações com um número elevado de ciclos (IRENA, 2013).

#### **2.6.11.Considerações finais dos sistemas de armazenamento**

O armazenamento de energia é a parte mais fraca dos SH, este é o elemento chave que permite a integração e maior utilização das energias renováveis (Ibrahim, et al., 2007).

Para os pequenos sistemas de geração de energia (alguns kW) nas áreas isoladas, que dependem de energia renovável, o elemento chave é a autonomia. A bateria de chumbo continua sendo a melhor solução entre desempenho e custo. As baterias de Íons de Lítio tem melhor desempenho, mas ainda são muito caras. Para sistemas maiores (algumas centenas kW), a bateria de chumbo é ainda preferida, frente à bateria de lítio, e as soluções alternativas são ou menos eficientes ou são muito caroa: ar comprimido (problemas de auto descarga), as células de combustível (eficiência baixa e ainda muito cara), e baterias de fluxo (altos custos de manutenção) (Ibrahim, et al., 2008). SAB e SAEAC são adequados para potencias muito elevadas, mas tem custos de investimento altos (Hadjipaschalis, et al., 2009).

SAB, SAEAC, baterias, baterias de fluxo, células de combustível e as SM têm influências negativas sobre o meio ambiente devido a razões diferentes. A construção de SAB envolve inevitavelmente a destruição de árvores e terras verdes para construção de reservatórios, o que pode alterar o sistema ecológico local. SAEAC é baseado na tecnologia de turbina a gás convencional e envolve a queima de combustível fóssil, portanto, as emissões podem ser uma preocupação ambiental. As baterias e as bateria de Fluxo têm restos /

resíduos tóxicos. Os SM podem ser prejudiciais para a saúde humana devido a forte campo magnético (Chen, et al., 2009).

Finalmente, certas tecnologias são capazes de satisfazer as necessidades de armazenamento para fontes de energia renovável (intermitentes) como os acumuladores hidráulicos e Supercondutores Magnéticos (SM) (Ibrahim, et al., 2007).

Os acumuladores hidráulicos têm sido usados há várias décadas em sistemas de acionamento hidráulico, normas de segurança têm sido desenvolvidas em um nível elevado e os dispositivos de segurança são bem conhecidos para pressões elevadas, é uma tecnologia desenvolvida e disponível (Erkkilä, et al., 2013).

## Capítulo 3.

# SISTEMA HÍBRIDO SOLAR/BIOMASSA

## 3.1. GENERALIDADES.

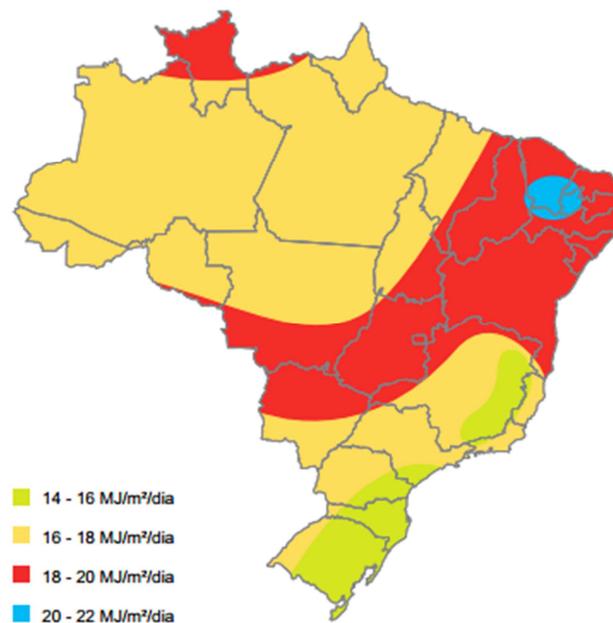
Entre todas as fontes de energias disponíveis, a energia solar é a mais abundante e pode ser explorada nas formas direta e indireta. Se 0,1% da radiação solar que atinge a superfície terrestre fosse convertida em energia elétrica, a 10% de eficiência, seria gerada uma quantidade equivalente a quatro vezes a capacidade de produção mundial instalada. No entanto, 80% da energia utilizada atualmente no mundo possui a sua origem em fontes não renováveis (Altoé, et al., 2012).

Brasil é privilegiado em termos de radiação solar. O Plano Nacional de Energia 2030<sup>2</sup> reproduz dados do Atlas Solarimétrico do Brasil e registra que essa radiação varia de 8 a 22

---

<sup>2</sup> O Plano Nacional de Energia, também conhecido como PNE 2030, consiste em uma pesquisa de planejamento integrado dos recursos energéticos brasileiros feitos pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o Ministério de Minas e Energia (MME).

MJ (megajoules) por metro quadrado ( $m^2$ ) durante o dia, sendo que as menores variações ocorrem nos meses de maio a julho, variando de 8 a 18 MJ/ $m^2$ , na figura 3.1 mostra a Variação da radiação solar no Brasil. Além disso, complementa o estudo, o Nordeste possui radiação comparável às melhores regiões do mundo nessa variável, como a cidade de Dongola, no deserto do Sudão, e a região de Dagget, no Deserto de Mojave, Califórnia (ANEEL, 2008).



**Figura 3. 1.** Variação da radiação solar no Brasil. (ANEEL, 2008)

Por outro lado, a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional como no Brasil, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e na consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. A quantidade estimada de biomassa existente na Terra é da ordem de 1,8 trilhões de toneladas. Este volume, quando confrontado com o grau de eficiência das usinas em operação no mundo no ano de 2005, aponta para uma capacidade de geração de 11 mil TWh por ano no longo prazo – ou mais da metade do total de energia elétrica produzida em 2007, que foi de 19,89 mil TWh, mas seu

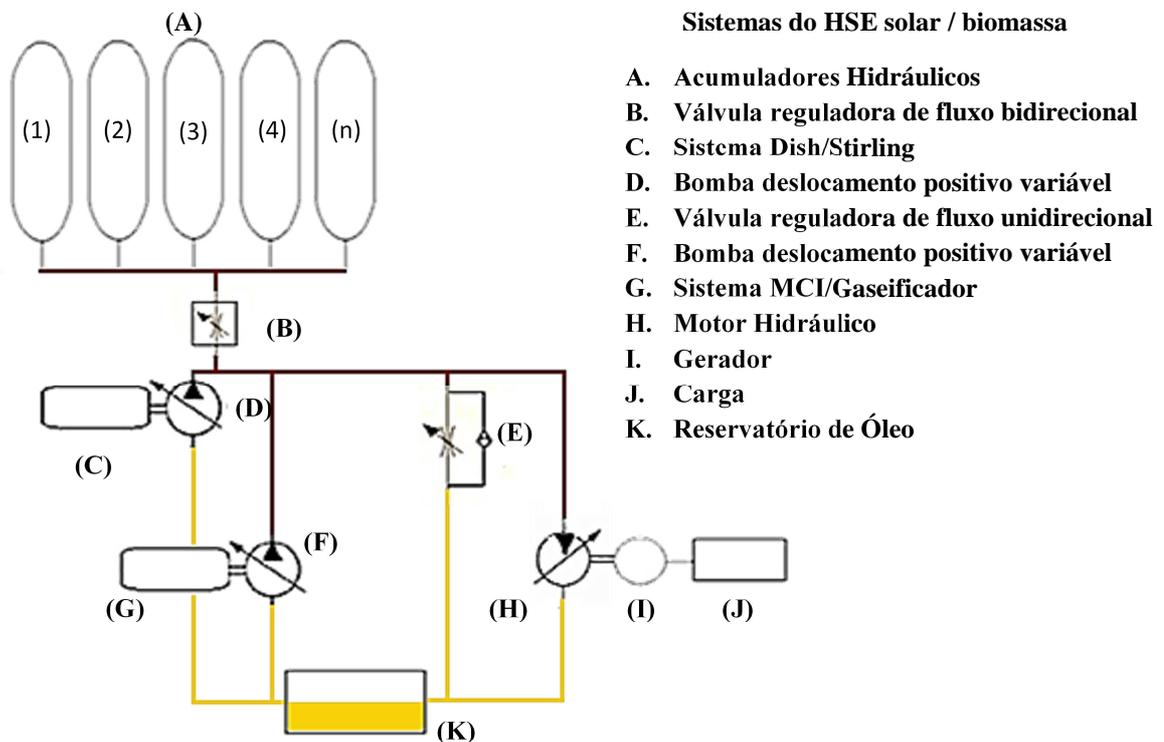
aspecto mais negativo é a necessidade de grande extensão de terras para seu cultivo, o que competiria com a produção de alimentos (ANEEL, 2008).

A hibridação de energia solar com a biomassa combina duas fontes de energia que se complementam, para superar suas desvantagens individuais. Durante o dia, a energia solar pode ser aproveitada para a geração de energia e a biomassa pode ser utilizada como fonte adicional para o funcionamento constante, compensando a natureza variável da fonte solar. Em comparação com um sistema somente a biomassa, a hibridação com energia solar reduz a demanda da biomassa, melhorando assim a segurança energética e diminuindo a terra, necessária de plantio energético (Nixon et al., 2012).

Os modelos que compõem o SHE solar / biomassa estudado nesta dissertação são:

- Motor de combustão interna ciclo Otto, com utilização de gás de biomassa obtido a partir de um gaseificador co-corrente.
- Motor de combustão externa ciclo Stirling, com utilização de pratos parabólicos (sistema Dish/Stirling) desenvolvido por Mendoza (2012).
- Sistema de armazenamento com acumuladores hidráulicos.

O esquema do sistema é apresentado na figura 3.2.



**Figura 3. 2.** SHE solar / biomassa

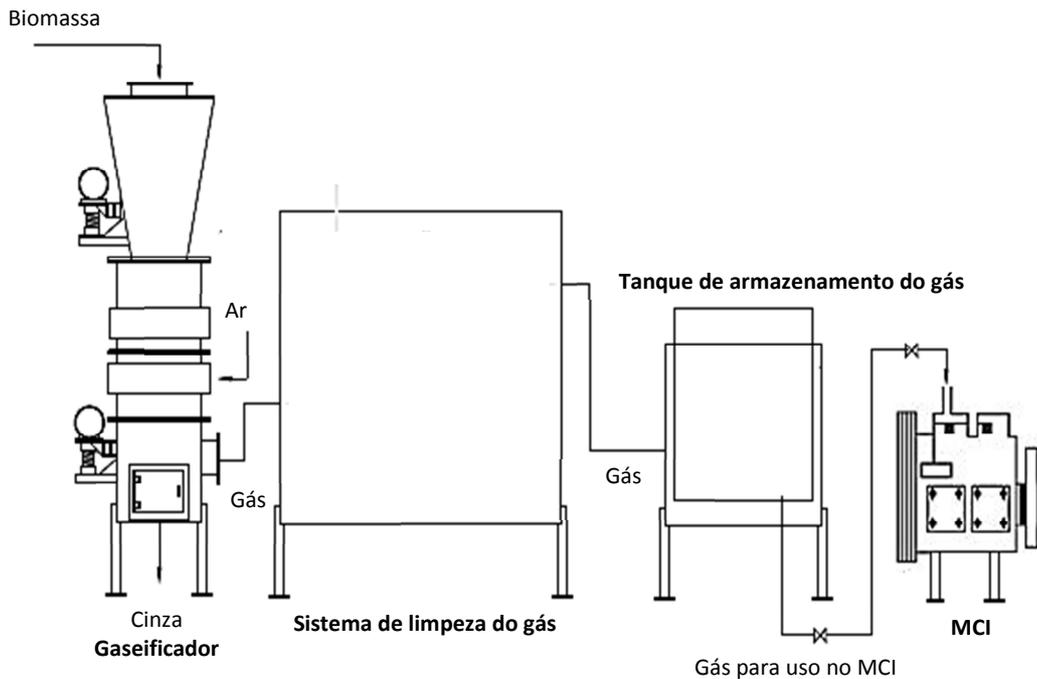
### **3.2. MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO, COM UTILIZAÇÃO DE GÁS DE BIOMASSA OBTIDO A PARTIR DE UM GASEIFICADOR CO-CORRENTE.**

A gaseificação é um processo termoquímico no qual um substrato com alto teor de carbono (por exemplo: carvões, biomassa, plásticos, etc.) é transformado em um gás combustível por uma série de reações que ocorrem na presença de um agente gaseificador (ar, oxigênio ou vapor de água). A composição do gás é muito dependente das condições nas quais se realiza a gaseificação. O material de alimentação e o agente gaseificador são os parâmetros que determinam se o conteúdo de energia do gás (poder calorífico) é maior ou menor. A gaseificação ocorre dentro de um reator chamado gaseificador e este pode ser de tipos diferentes (leito fixo, leito fluidizado, leito arrastado, etc.) (Centeno F. , 2010).

Uma grande vantagem da gaseificação de biomassa em comparação com a combustão direta é que o gás combustível produzido pode ser usado para alimentar motores de combustão interna, e o motor pode ser usado para geração de energia. Quando o gás da gaseificação vai ser utilizado como combustível para um motor de combustão interna é aconselhável o uso de um gaseificador leito fixo co-corrente, devido a sua configuração que levar menor quantidade de alcatrão junto com o gás, o que é desejável para a proteção do motor (Andrade, 2007).

O uso do gás de biomassa como combustível para motores de combustão interna é uma tecnologia que se tem utilizado durante mais de um século. Os motores de ignição por centelha, normalmente alimentados com gasolina, são capazes de funcionar alimentando unicamente com gás pobre (Centeno, et al., 2013). Uma configuração geral do sistema gaseificador / motor de combustão interna para geração de energia é a apresentada na figura 3.3.

Os detalhes do modelo matemático analítico do gaseificador de biomassa tipo leito fixo co-corrente operando em regime permanente e do motor baseado na geometria do motor YANMAR BTD 22 do laboratório do NEST que foi construído originalmente para trabalhar com Diesel, mas depois foi modificado adicionando um sistema de acendimento por centelha para trabalhar com gás natural, são apresentados por Centeno (2010) e Centeno (2012).



**Figura 3.3.** Sistema gaseificador / motor de combustão interna para geração de energia

A tabela 3.1 mostra algumas características geométricas do motor e algumas considerações do modelo de Centeno (2010).

O modelo desenvolvido por Centeno (2010) permite prever o comportamento do motor de combustão interna (rpm, Potência indicada, etc.) funcionando com gás de biomassa, gasolina ou metano.

Os resultados obtidos por Centeno (2010) mostram que a potência obtida com o motor operando com gás de biomassa é ao redor de 59 e 65 % da obtida operando o motor com gasolina e que para obter maiores potências com alimentação com gás de biomassa é recomendada a utilização de motores com elevada relação de compressão.

**Tabela 3. 1-** Parâmetros do motor no modelo de Centeno (2010).

<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
Diâmetro do cilindro (m)	0,09
Curso do pistão (m)	0,09
Relação de compressão	12:1
Número de cilindros	2
A temperatura da mistura inicial (K)	350

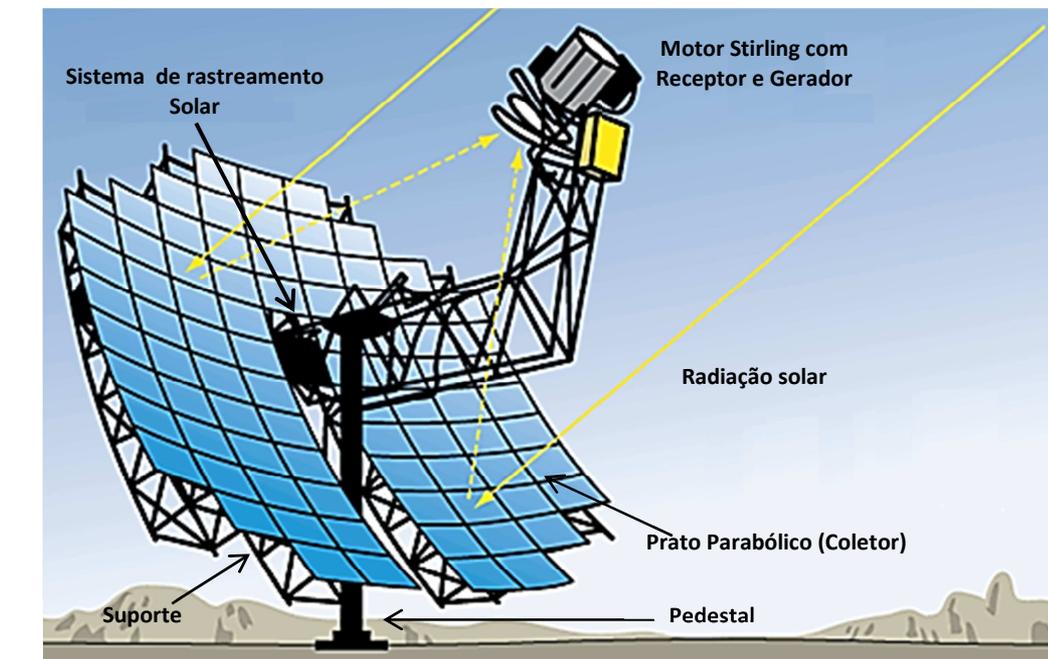
### **3.3. MOTOR DE COMBUSTÃO EXTERNA CICLO STIRLING, COM UTILIZAÇÃO DE PRATOS PARABÓLICOS (SISTEMA DISH/STIRLING).**

O motor Stirling é um motor de combustão externa que converte o calor em energia mecânica. Ele funciona num ciclo termodinâmico fechado constituído por dois processos a volume constante e dois processos isotérmicos. Devido ao esgotamento dos recursos naturais e a contaminação ambiental causada pelos combustíveis fósseis, motores Stirling vêm ganhando atenção novamente (Çinar, et al., 2012). Ele é silencioso e pode trabalhar com uma infinidade de fontes de energia, especialmente de energia renovável (solar, biomassa, geotérmica, carvão, etc.) (Gheith, et al., 2012).

O sistema Dish / Stirling é uma tecnologia solar térmica de geração de energia que se caracteriza por uma alta eficiência (29,4% registrados em 1984, e um novo recorde de 31,25% em 2007) (Xiao et al., 2012). O sistema consiste em um concentrador solar, espelhos de vidro em forma de um prato, que refletem a luz solar em uma pequena área, e uma unidade de conversão de energia térmica (Motor Stirling) que inclui um receptor e um gerador. O receptor térmico inclui tubos por onde circula um fluido, geralmente hidrogénio ou hélio, para transferir o calor ao gerador e produzir eletricidade (Castellano, 2012). Durante o dia,

pratos solares são automaticamente direcionados para o sol e refletem a radiação solar para o motor Stirling (Pavlović, et al., 2012), na figura 3. 4 é mostrado o esquema geral do sistema.

Os detalhes da modelagem do sistema Dish/Stirling são apresentados por Mendoza (2012). A modelagem permite analisar o comportamento do sistema para diferentes dimensões geométricas e materiais do Coletor.



**Figura 3. 4.** Sistema Dish / Stirling.

Alguns dos resultados obtidos por Mendoza (2012) mostram que eficiências médias do sistema Dish/Stirling trabalhando em uma cidade como Itajubá- M.G- Brasil, estão entre 20 a 24% e a faixa de funcionamento é de aproximadamente 5 horas durante o dia, gerando aproximadamente 10 kWe.

### 3.4. SISTEMA DE ARMAZENAMENTO COM ACUMULADORES HIDRÁULICOS.

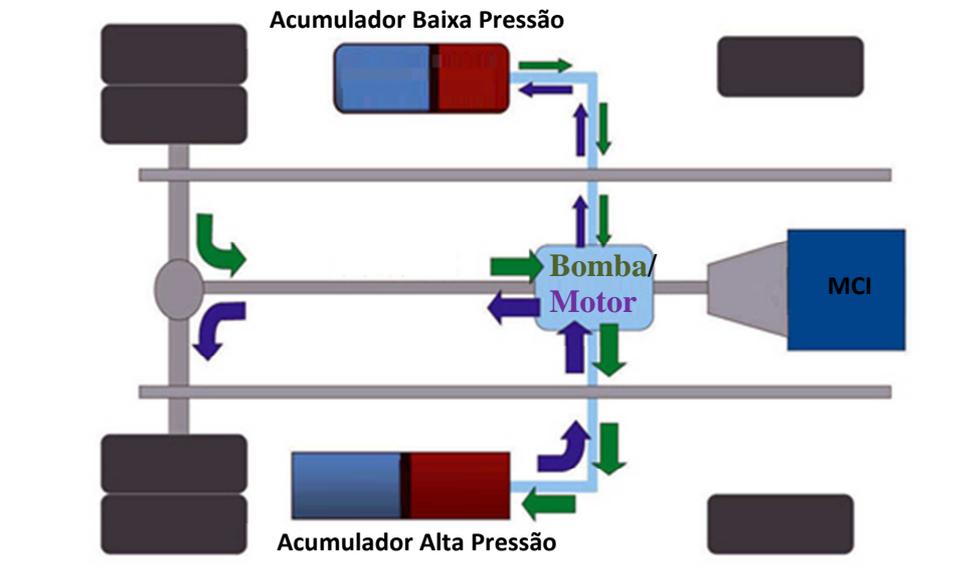
Na revisão bibliográfica feita no capítulo 2 foi encontrado que o sistema de armazenamento hidráulico é uma tecnologia capaz de satisfazer as necessidades de armazenamento de uma fonte de energia intermitente, neste caso o Sol. Os acumuladores hidráulicos como já vimos anteriormente tem algumas vantagens sobre as bateria de chumbo acido (que é ainda preferida), além de ser uma tecnologia desenvolvida e não tóxica.

Os acumuladores hidráulicos são amplamente utilizados em um grande número de sistemas hidráulicos para o cumprimento de uma ou mais funções como:

1. *Armazenamento de energia*
  - Fonte de energia de reserva.
  - Bomba de descarga
2. *Manter a pressão constante; compensação por perdas devido a vazamento.*
3. *Compensação térmica.*
4. *Suavizar a pressão e pulsação do fluxo*
5. *A absorção de choques hidráulicos.*
6. *Mola hidráulica na suspensão do carro.*

Uma das primeiras tecnologias em utilizar os acumuladores hidráulicos como sistemas de armazenamento de energia foram os sistemas SHR nos anos 1970 pela GM (General Motor) em seus automóveis, onde um motor hidráulico é conectado às rodas do veículo controlando sua aceleração e desaceleração. o HRS utiliza a diferença de pressão entre dois acumuladores pressurizados, para acionar uma bomba / motor hidráulico (PM). Durante a desaceleração, o fluido é bombeado de um acumulador de baixa pressão para um de alta pressão armazenando energia e fornecendo um torque de frenagem nas rodas. Durante a aceleração o processo é invertido: O fluido pressurizado é utilizado para acionar o PM e fornecer um torque positivo para as rodas, o sistema é apresentado na figura 3.5 Mais

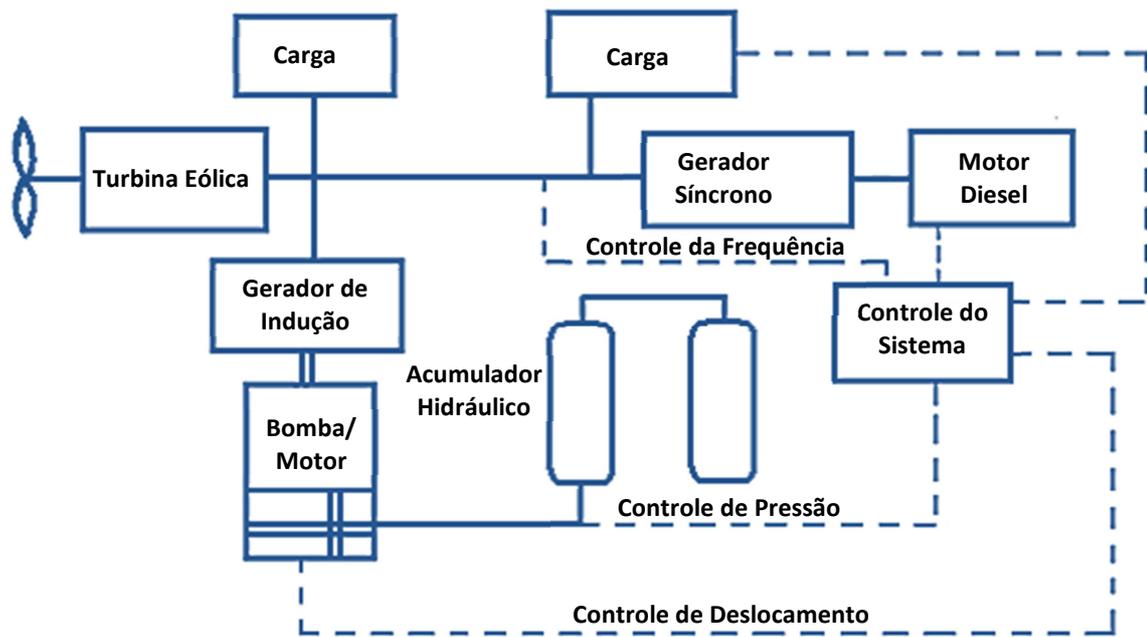
informações sobre os sistemas SHR podem ser encontradas em Chen e Vu (2011), Zhang, et al. (2011) e Midgley e Cebon (2011).



**Figura 3. 5.** Sistema SHR. (Greenmotorsblog, 2010)

Nos sistemas SHE tem-se dois trabalhos experimentais e analíticos desenvolvidos na universidade de Reading com acumuladores hidráulicos como sistema de armazenamento com um protótipo em Machynlleth (Galês), Slack e Musgrove (1986) apud Nacfaire (2004). O sistema SHE Eólico/Diesel desenvolvido nestes trabalhos incluiu um acumulador hidráulico para fornecer energia armazenada de alta potência em curto prazo. Um diagrama esquemático do sistema é mostrado na figura 3.6.

Neste sistema quando há um excesso de energia eólica, a energia elétrica é utilizada para acionar uma bomba/motor hidráulico no modo de bomba para aumentar a pressão do acumulador. Inversamente, se a demanda do consumidor excede a produção de energia, a bomba / motor é operada no modo de motor para acionar um grupo gerador com a energia armazenada no acumulador. Os testes mostraram que uma redução significativa óleo pode ser conseguida através da utilização de armazenamento hidráulico (Nacfaire, 2004).



**Figura 3.6.** Sistema SHE Eólico/Diesel com armazenamento hidráulico (Nacfaire, 2004).

### 3.4.1. Modelagem do sistema de armazenamento hidráulico.

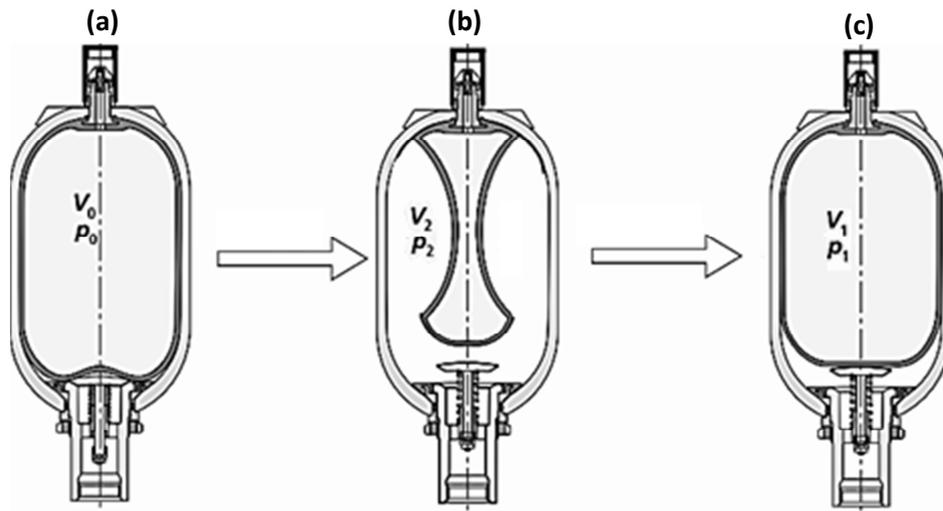
Os componentes deste sistema são as bombas hidráulicas, o motor hidráulico, os acumuladores, o gerador, e um reservatório como é mostrado na figura 3.2. Uma das bombas hidráulicas é acoplada diretamente ao MCI do sistema gaseificador /Motor para a geração de energia a partir da biomassa, e a outra é acoplada ao motor do sistema Dish/Stirling para a geração de energia a partir da radiação solar. As bombas tem o objetivo de converter a energia mecânica de rotação dos motores MCI e Stirling em energia hidráulica pressurizando um fluido no acumulador hidráulico para armazenar energia ou transferi-lo ao motor hidráulico para gerar energia mecânica que por meio de um gerador será transformada em elétrica para satisfazer uma demanda.

O componente principal do sistema de armazenamento é o grupo de acumuladores é por isso que neste trabalho é analisado com detalhe seu comportamento por meio de uma análise termodinâmica do gás pré-carregado.

### 3.4.1.1. Generalidades

Dos principais tipos de acumuladores hidráulicos, ilustrados na figura 2.4, os mais amplamente utilizados são os de tipo gás pré-carregado (também chamado de acumuladores hidropneumáticos), o gás geralmente é o nitrogênio (Rabie, 2009). Os acumuladores de gás pré-carregado com elementos de separação consistem em um corpo de aço que contém duas câmaras uma para o óleo e outra para o nitrogênio sobre pressão. Os acumuladores de gás pré-carregado são classificados em quatro tipos diferentes, de acordo com a separação: tipo pistão, tipo bexiga, tipo diafragma, e os acumuladores sem separação. O último tipo é operado em condições restritas, onde o óleo não deve ser completamente descarregado. Os acumuladores de bexiga e diafragma oferecem uma resposta mais rápida que os acumuladores de pistão e são melhores para evitar as infiltrações de gás no lado do óleo ou óleo no lado do gás, porque eles estão completamente separados, enquanto os acumuladores de pistão requerem anéis de pistão para selar as câmaras. Os acumuladores tipo diafragma são geralmente fabricados para baixos volumes, até 5 litros, para maiores volumes são utilizados os acumuladores de bexiga.

As principais etapas de funcionamento do acumulador são 3. Ao princípio o acumulador é pré-cargado com nitrogênio até uma pressão  $P_0$  e volume  $V_0$ , este processo é realizado quando o acumulador está completamente sem óleo ( figura 3.7. a). Logo o óleo flui para o acumulador até que o gás é comprimido completamente alcançando sua pressão máxima permitida  $P_2$  e seu volume diminui até  $V_2$  ( figura 3.7. b). Finalmente o óleo flui para fora do acumulador e o nitrogênio se expande até alcançar a pressão mínima admissível  $P_1$  e o volume aumente até  $V_1$ .



**Figura 3. 7.** Etapas de operação do acumulador (Bosch Rexroth, 2009).

Para obter a melhor utilização possível da capacidade do acumulador e uma maior vida útil se recomenda que a pressão de carga ( $P_0$ ) do gás seja:

$$P_0 \approx 0,9 P_1 \quad (3.1)$$

Também é muito importante ter em conta que a pressão máxima do acumulador ( $P_2$ ) não deve exceder o quádruplo da pressão de carga ( $P_0$ ), porque a elasticidade da bexiga é afetada e variações excessivas no processo de compressão resultaram em forte aquecimento do gás, isto é:

$$P_2 \leq 4 P_0 \quad (3.2)$$

Quanto menor for a diferença entre  $P_1$  e  $P_2$  maior vai ser a vida útil da bexiga do acumulador. Porém, isto reduz o grau de utilização da capacidade máxima do acumulador (Bosch Rexroth, 2009).

Predizer o comportamento de acumuladores hidráulicos requer algum conhecimento dos processos termodinâmicos do gás de carga. Se o gás trabalha a uma pressão relativamente elevada, ele deve ser tratado como um gás real. Não obstante, historicamente uma combinação de suposições para o tratamento do gás como ideal e métodos com fatores de segurança altos que levam ao sobredimensionamento têm sido utilizados na seleção de

acumuladores hidráulicos. Uma prática comum é assumir que os processos envolvidos são isotérmicos, adiabáticos, ou politrópicos. Isto significa simplesmente que as perdas térmicas são ignoradas. Além disso, o valor do expoente politrópico utilizado nos cálculos é muitas vezes desconhecido e desenhistas têm usado diferentes "regras de ouro" que provaram em alguns casos, ser imprecisas (Pourmovahed e Otis, 1990).

### 3.4.1.2. Modelagem matemática do acumulador Hidráulico.

Na literatura tem se muitas equações de estado empíricas, semi-empíricas e teóricas para descrever as propriedades dos gases reais. Em Çengel e Boles (2006) afirma-se que a equação de estado de Benedict-Webb-Rubin (BWR) é mais exata, comparada com as equações de van der Waals ou Battie-Bridgeman, ademais é utilizada para a modelagem do nitrogênio nos acumuladores nos sistemas SHR como pode ser visto em Hui (2010), Ho e Ahn (2012), Puddu e Paderi (2013).

A equação de estado de BWR contém oito parâmetros além da constante universal dos gases:

$$P = \frac{RT}{v} + \frac{\left(B_0RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2}\right)}{v^2} + \left(\frac{bRT - a}{v^3}\right) + \left(\frac{a\alpha}{v^6}\right) + \frac{2c\left(1 + \frac{\gamma}{v^2}\right)e^{\frac{-\gamma}{v^2}}}{v^3T^2} \quad (3.3)$$

E os valores de seus constantes para o caso do nitrogênio são (Çengel e Boles, 2006):

$$\begin{array}{llll} A_0 = 106,73 & B_0 = 0,04074 & C_0 = 8,164 * 10^5 & a = 2,54 \\ b = 0,002328 & c = 7,379 * 10^4 & \alpha = 1,272 * 10^{-4} & \gamma = 0,0053 \end{array}$$

O primeiro termo da equação pode ser identificado como o termo do comportamento do nitrogênio como gás ideal, e os outros termos são termos de correção para o comportamento como gás não ideal.

Logo se a câmara carregada com o gás é considerada como um sistema fechado que troca energia em forma de calor por convecção natural e trabalho com seus arredores, o óleo e a parede do acumulador, têm-se que a variação da energia interna do gás pode ser calculada como:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_{Conv} - \dot{W} \quad (3.4)$$

O calor por convecção e o trabalho feito pelo gás pode ser calculado por (Çengel e Boles, 2006):

$$\dot{Q}_{Conv} = hA(T_a - T) \quad (3.5)$$

$$\dot{W} = P \frac{dV}{dt} \quad (3.6)$$

A taxa de expansão/compressão do nitrogênio no acumulador é igual á inverso da vazão do fluido hidráulico que entra no acumulador (Ho e Ahn, 2012):

$$\frac{dV}{dt} = -\dot{Q}_a \quad (3.7)$$

A variação energia interna do gás real é dada por (Pourmovahed, et al., 1992 a), (Ho e Ahn, 2012):

$$\frac{dU}{dt} = mc_v \frac{dT}{dt} + \left[ T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] \frac{dV}{dt} \quad (3.8)$$

Substituindo as equações (3.5), (3.6), (3.8) na equação (3.4), obtém-se:

$$mc_v \frac{dT}{dt} + m \left[ T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v - P \right] \frac{dV}{dt} = hA(T_a - T) - P \frac{dV}{dt} \quad (3.9)$$

$$mc_v \frac{dT}{dt} + m T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \frac{dv}{dt} - P \frac{dV}{dt} = hA(T_a - T) - P \frac{dV}{dt} \quad (3.10)$$

$$mc_v \frac{dT}{dt} + m T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \frac{dv}{dt} = hA(T_a - T) \quad (3.11)$$

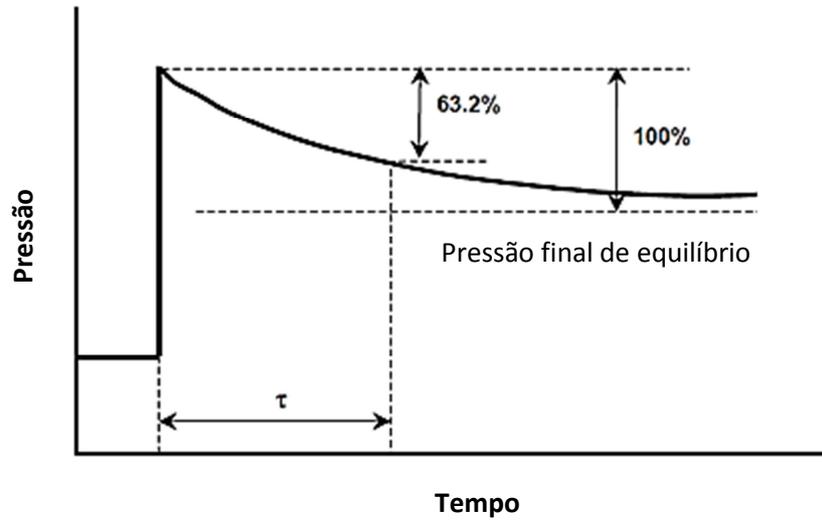
$$mc_v \frac{dT}{dt} = hA(T_a - T) - m T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \frac{dv}{dt} \quad (3.12)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{hA(T_a - T)}{mc_v} - \frac{T}{c_v} \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \frac{dv}{dt} \quad (3.13)$$

Da equação (3.13) obtém-se a expressão para achar a variação da temperatura do gás no acumulador com o tempo. Nesta equação a expressão:

$$\frac{hA}{mc_v} = \frac{1}{\tau} \quad (3.14)$$

Onde  $\tau$  é definida como a constante de tempo térmica e representa o tempo que leva a pressão ou a temperatura do gás cair até 63,2% desde a pressão ou temperatura final de equilíbrio (Pourmovahed e Otis, 1990), figura 3.8.  $\tau$  depende de  $c_v$  e de  $h$ . Em Pourmovahed e Otis (1990), mostra-se que o primeiro parâmetro depende da temperatura do gás do acumulador que varia com o tempo, e o segundo é função de muitos parâmetros que também mudam com o tempo, por conseguinte a constante de tempo térmica não é constante, mas Pourmovahed e Otis (1990) afirmam que uma boa precisão pode ser obtida por meio de um valor constante.  $\tau$  tem que ser medida ou achada utilizando um modelo de transferência de calor para cada tipo de acumulador.



**Figura 3. 8.** Constante de tempo térmica (Pourmovahed e Otis, 1990).

Em Tavares (2011) encontrasse que para um acumulador padrão carregado com nitrogênio o parâmetro  $hA$  é :

$$hA = 200 \frac{W}{K} \quad (3.15)$$

Em Stroganov e Sheshin (2011), encontrasse que para diminuir as perdas por transferência de calor no acumulador a bexiga que retém o gás é selada com uma espuma elastomérica (isolante térmico) atuando como um dissipador de calor com variações de temperatura insignificantes que permite ao calor ser transferido a partir do gás para a espuma, e vice-versa. Para um acumulador isolado carregado com nitrogênio o parâmetro  $hA$  é :

$$hA = 50 \frac{W}{K} \quad (3.16)$$

Ao derivar a equação (3.3) com respeito a  $T$  e a  $v$  constante obtêm-se:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v} + \frac{\left(B_0 R - A_0 - \frac{2C_0}{T^3}\right)}{v^2} + \left(\frac{bR}{v^3}\right) + \frac{2c\left(1 + \frac{\gamma}{v^2}\right) e^{\frac{-\gamma}{v^2}}}{v^3 T^3} \quad (3.17)$$

Finalmente ao substituir as equações (3.17) e (3.14) em (3.13) obtêm-se a expressão completa para o calculo da variação da temperatura do gás com o tempo:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{(T_a - T)}{\tau} - \left( \frac{R}{v} + \frac{(B_0 R - A_0 - \frac{2C_0}{T^3})}{v^2} + \left( \frac{bR}{v^3} \right) + \frac{2c \left( 1 + \frac{\gamma}{v^2} \right) e^{\frac{-\gamma}{v^2}}}{v^3 T^3} \right) \frac{T}{c_v} \frac{dv}{dt} \quad (3.18)$$

A energia armazenada no acumulador hidráulico pode ser calculada como, (Rabie, M. G. , 2009):

$$E = \int P dV \quad (3.19)$$

O estado de carga (SOC, State of charge) do acumulador é definido como a relação entre o volume instantâneo de óleo no acumulador sobre sua capacidade máxima (Filipi e Kim, 2010):

$$SOC = \frac{V_{max} - V_{in}}{V_{max} - V_{min}} \quad (3.20)$$

Mas na atualidade, onde os acumuladores hidráulicos são utilizados como sistemas de armazenamento de energia, o SOC é baseado na pressão do gás no acumulador porque é muito mais fácil medir a pressão do gás do que o volume do óleo dentro do acumulador (Jackey e Smith, 2005), (Hui, et al., 2010):

$$SOC = \frac{P_{in} - P_1}{P_2 - P_1} \quad (3.21)$$

### 3.4.1.3. Validação do modelo do acumulador Hidráulico.

No item anterior foram apresentados os detalhes da formulação do modelo matemático do acumulador o qual foi a base para desenvolver o modelo dinâmico no programa Simulink® de Matlab®. Simulink® é uma ferramenta utilizada para modelagem, simulação e

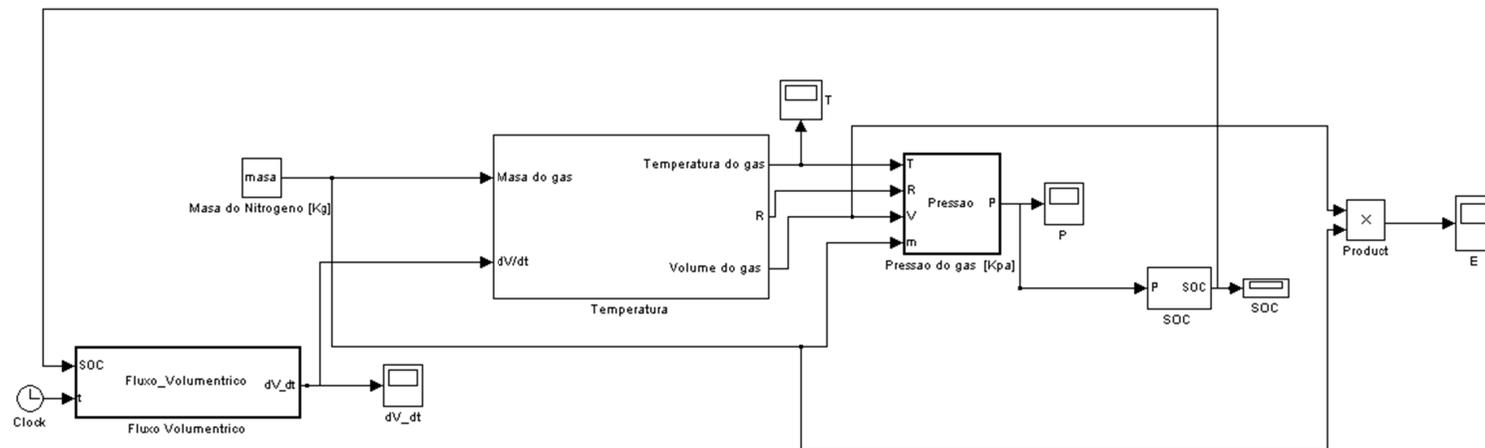
análise de sistemas dinâmicos que utiliza uma interface gráfica amigável, representando o sistema por diagramas de blocos.

O modelo desenvolvido é apresentado na figura 3.9 e na figura 3.10 seu algoritmo. Para a solução do modelo matemático da temperatura foi usado o método Runge-Kutta da biblioteca Simulink® de Matlab®.

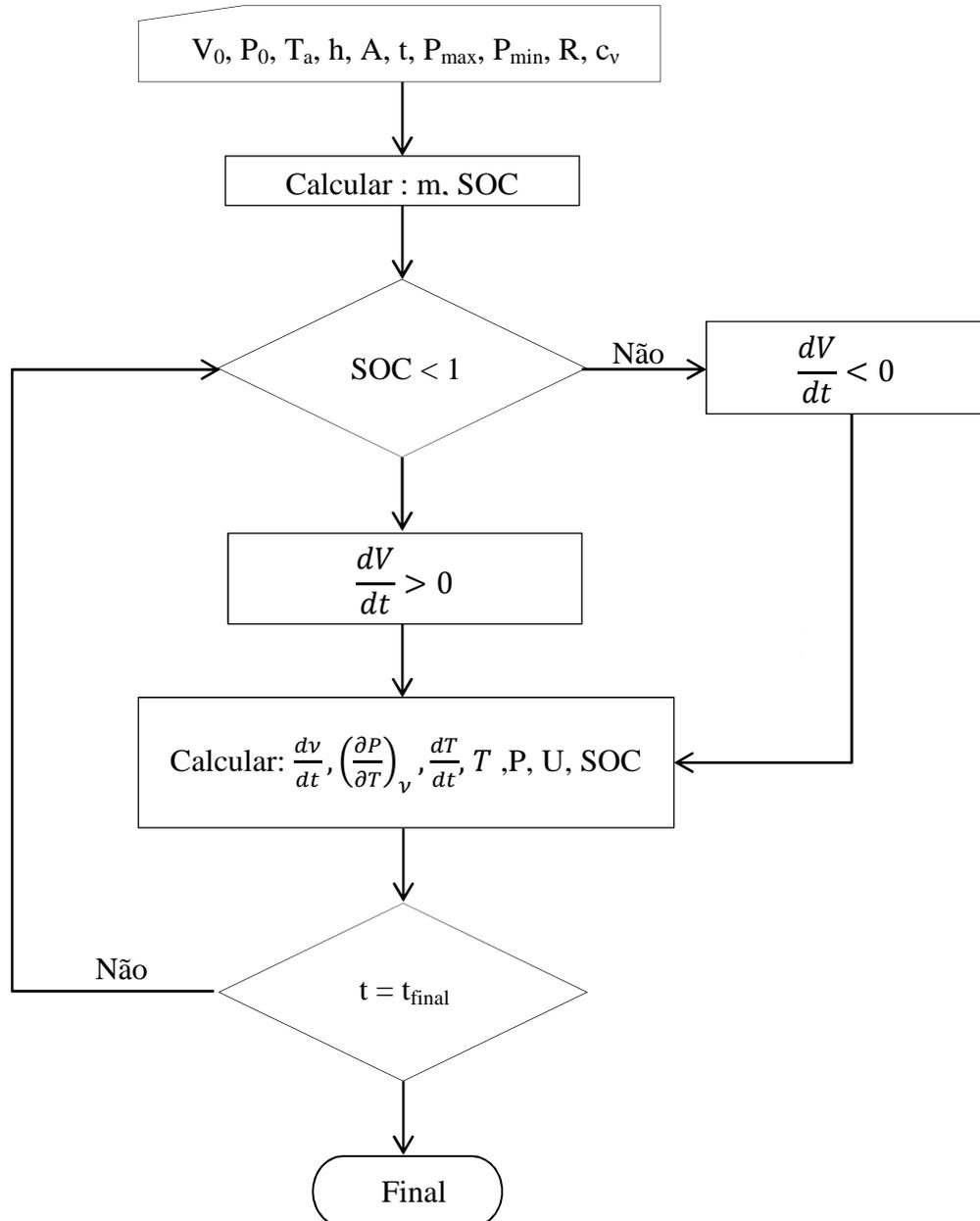
Cada bloco (Caixa) representa um subsistema, de modo que o modelo de acumulador é composto de seis subsistemas:

1. No primeiro bloco é calculada a massa do gás pré-carregado ao volume nominal e pressão de pré-carga do acumulador a temperatura ambiente por meio da equação de estado de BWR (3.3). É importante mencionar que esta massa é constante, pois a câmara do acumulador é considerada como um sistema fechado, onde nenhuma mudança em massa acontece, existem só variações da energia.
2. No segundo bloco é especificada a vazão volumétrica do acumulador, de acordo ao estado de carga (SOC). Se  $0 \leq \text{SOC} < 1$  indica que acumulador permite carga e a vazão volumétrica é positiva, mas, se  $\text{SOC} = 1$  o acumulador já não permita mais carga e vazão volumétrica é negativa.
3. Nos outros quatro blocos são calculadas a temperatura do gás, sua pressão, o SOC do acumulador e a energia armazenada.

As predições da temperatura e a pressão do gás no acumulador dada pelo modelo desenvolvido foram comparadas com o modelo apresentado em Juhala et al. (2011), que foi validado com dados experimentais. Na figura 3.11 apresentam-se os resultados do volume do cálculo no acumulador durante o tempo de simulação, e nas figuras 3.12 e 3.13 as comparações dos perfis da pressão e temperatura respectivamente, para o processo de carga. Na tabela 3.2 mostra-se a meia do erro do modelo do acumulador para cada uma das propriedades medidas tomando como referência as medições do modelo de Juhala, et al. (2011). Estas predições poderiam ser melhoradas modificando no modelo dados tais como: coeficiente de transferência de calor por convecção e área de transferência de calor do acumulador.



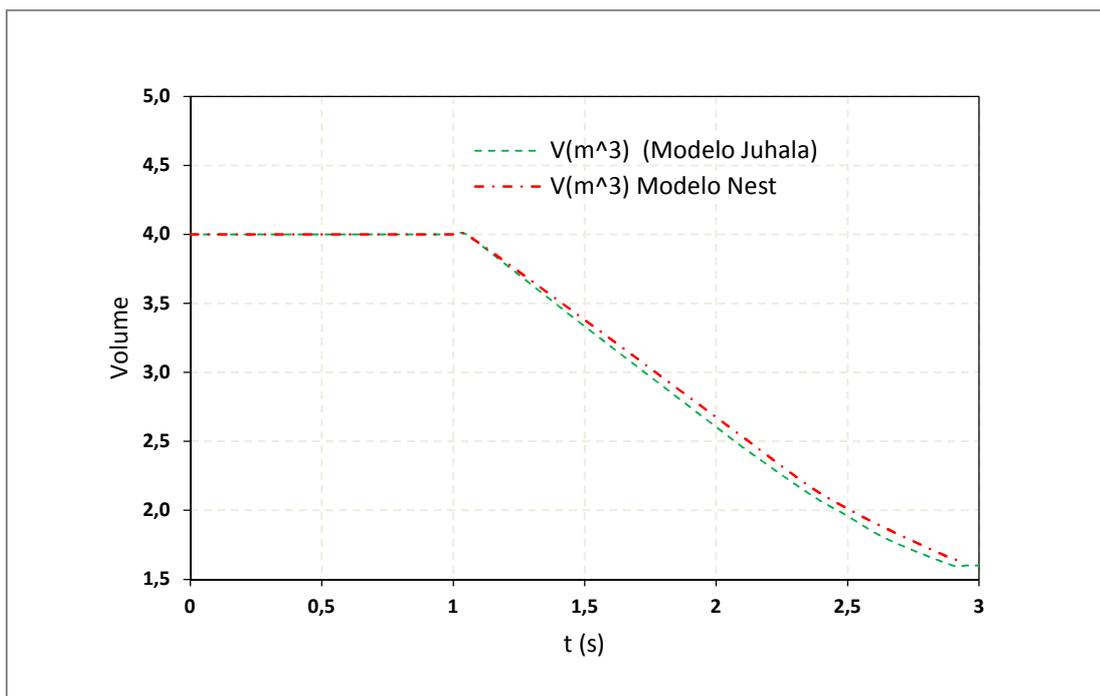
**Figura 3. 9.** Modelo dinâmico do acumulador desenvolvido em Simulink®

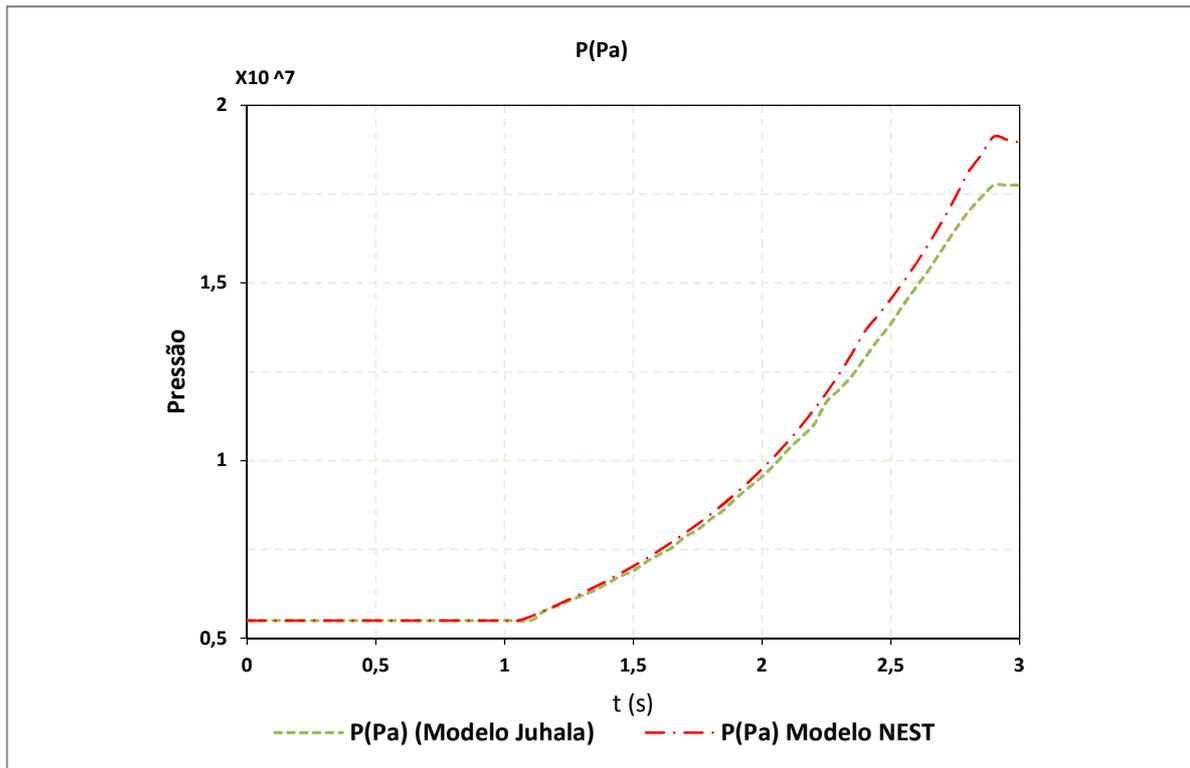


**Figura 3. 10.** Diagrama de blocos do modelo do acumulador

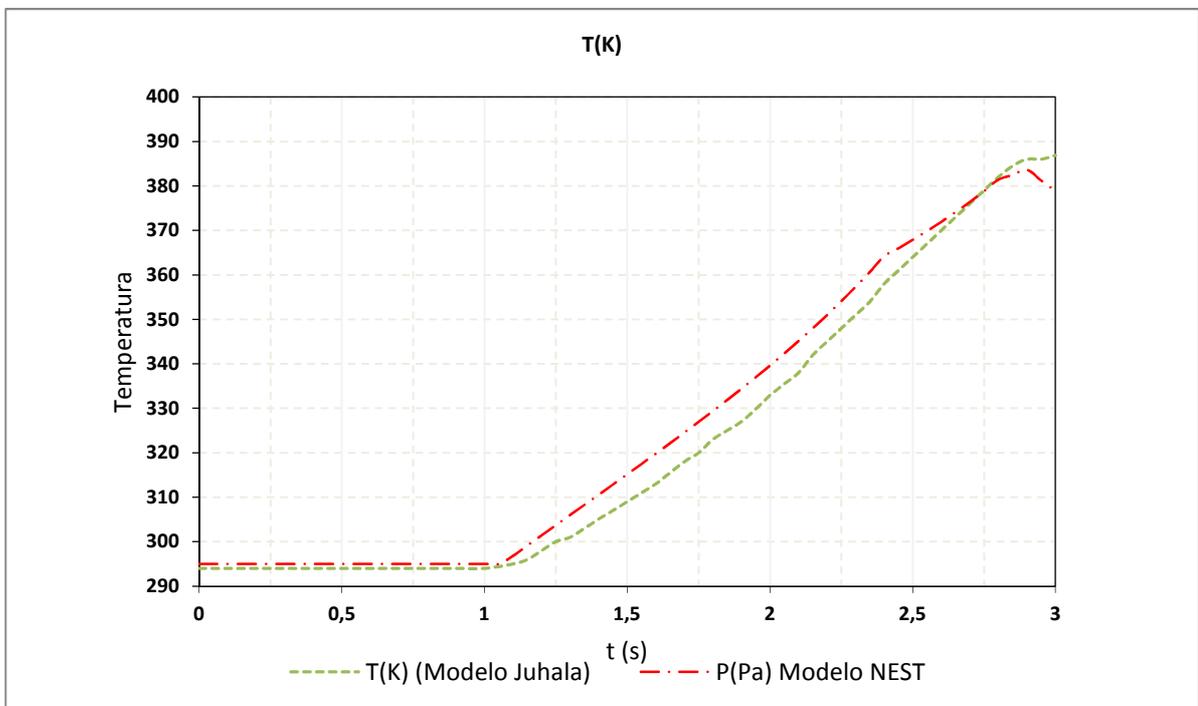
**Tabela 3. 2-** Erros meios do modelo do acumulador no processo de carga.

Propriedade	Erro (%)
Volumem	0,8
Pressão	1,5
Temperatura	0,4

**Figura 3. 11.** Comparação do Volume do acumulador calculado por diferentes modelos.



**Figura 3. 12.** Comparação da pressão no acumulador calculada por diferentes modelos.



**Figura 3. 13.** Comparação da temperatura do acumulador calculada por diferentes modelos

A energia que pode ser armazenada no acumulador tem muita dependência da pressão máxima admissível ( $P_2$ ), e de seu volume nominal ( $V_0$ ). Na literatura encontrou-se diferentes valores de densidade de energia em [kJ/l] a uma determinada pressão máxima. Na tabela 3.3 tem se a predição do valor da energia armazenada pelo modelo com os dados encontrados em Erkkilä et al. (2013). Os dados obtidos da energia armazenada em Erkkilä et al. (2013) são baseados em testes práticos de um acumulador padrão da Hydac®, empresa dedicada ao fornecimento de equipamentos hidráulicos.

**Tabela 3. 3-** Predição da Energia Armazenada pelo acumulador (Padrão).

Parâmetro	
Volume Nominal [l]	50
Pressão Máxima [bar]	330
Pressão Mínima [bar]	100
Energia Armazenada Útil , Erkkilä, et al. (2013) [kJ]	360
Energia Armazenada Útil (Modelo NEST) [kJ]	361,45
Densidade de energia , Erkkilä, et al. (2013) [kJ/l]	7,2
Densidade de energia (Modelo NEST) [kJ/l]	7,23

Outra simulação foi feita para o mesmo acumulador, mas trabalhando com uma pressão máxima de 350 bar. A densidade de energia obtida foi 7,8 (kJ/l) o que é consistente com Li et al. (2007) que afirmam que a densidade de energia para um acumulador destas características é inferior á 10 (kJ/l).

Para um acumulador isolado a energia armazenada e a densidade de energia são um pouco maiores, O protótipo da EPA (Kim, 2008) tem uma densidade de energia útil de 10 (kJ/l) á 350 bar. Os resultados no modelo do NEST para estas condições foi 9,52 (kJ/l).

#### 3.4.1.4. Análise do comportamento do acumulador hidráulico.

Para conhecer o comportamento do acumulador padrão durante um processo completo, foram simuladas as seguintes etapas no modelo:

- Carregamento do acumulador hidráulico (compressão do gás).
- Tempo do recesso
- Descarga do acumulador hidráulico (expansão do gás)
- Tempo do recesso

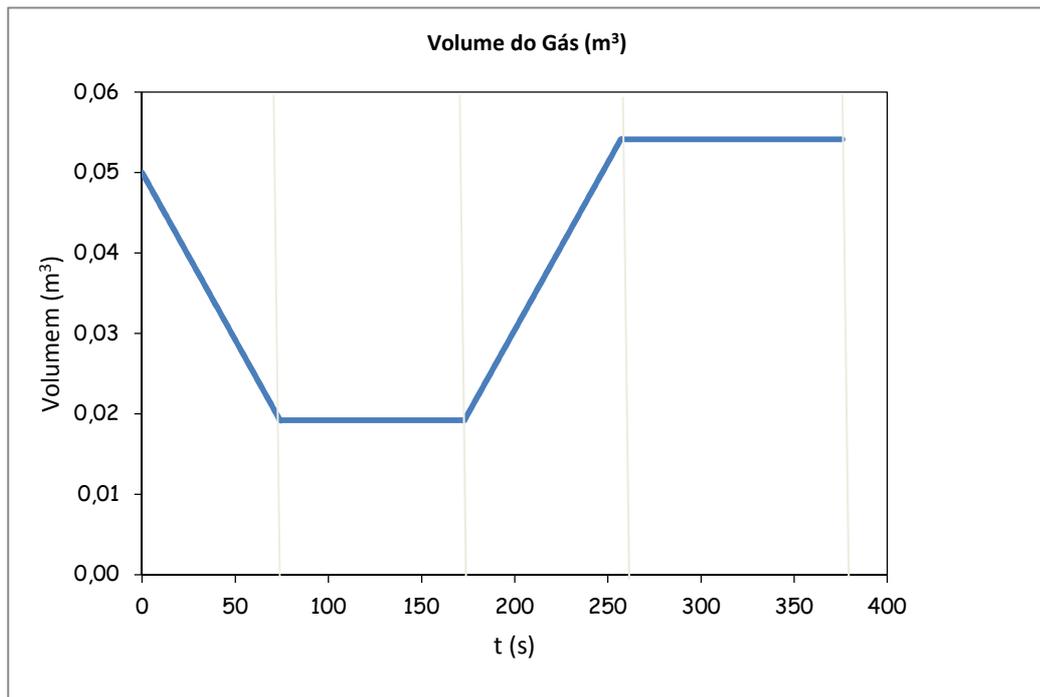
Os resultados obtidos nas variações da temperatura, pressão, SOC, e energia acumulada são apresentados nas figuras 3.14 - 3.18.

No processo de carregamento do acumulador hidráulico (compressão do gás, tempo (t): 0s - 74s): A vazão de óleo no acumulador é ativada positivamente, por conseguinte o volume do gás diminui (figura 3.14) fazendo a pressão (figura 3.16), e a temperatura (figura 3.15) de o gás aumentar até que a pressão do gás no acumulador chega à máxima permitida ( $P_2$ ). Neste processo a energia armazenada e o SOC (figura 3.17) também aumenta.

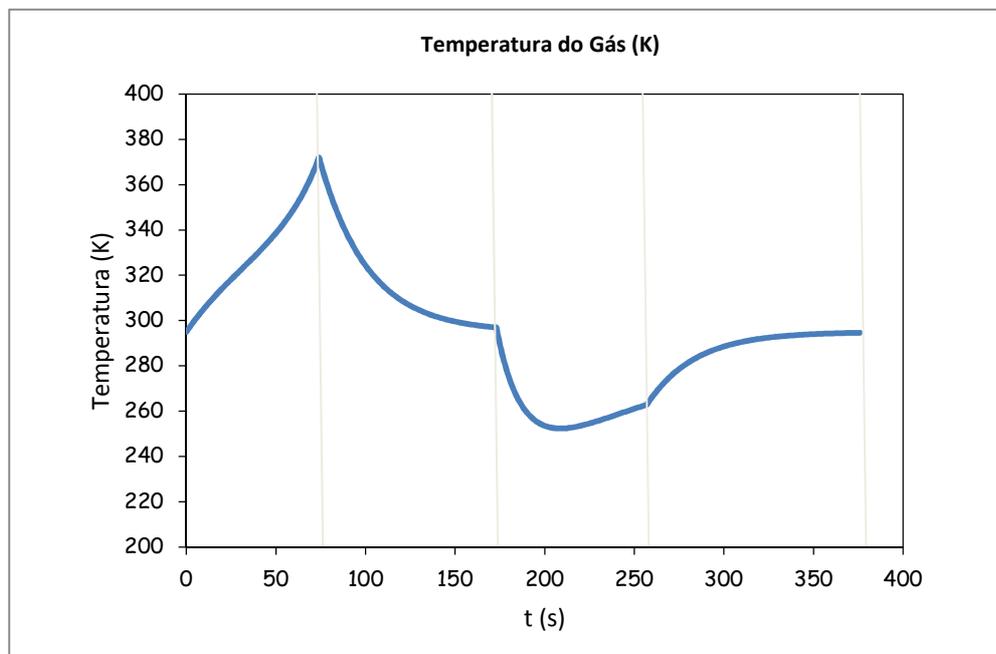
No tempo do recesso (Tempo (t): 75s - 173s): A vazão de óleo no acumulador é interrompida, por conseguinte, o volume do gás permanece constante no acumulador (figura 3.14). O gás interage com o ambiente fazendo a temperatura (figura 3.15) e por conseguinte a pressão (figura 3.16) diminuir até que a temperatura atinge a temperatura ambiente. Neste processo a energia armazenada e o SOC (figura 3.17) também diminuem.

No processo de descarga do acumulador (Expansão do Gás, Tempo (t): 174s - 257s): a vazão de óleo no acumulador é ativada negativamente, por conseguinte, o volume do gás aumenta (figura 3.14) fazendo a pressão (figura 3.16) e a temperatura (figura 3.15) diminuir até que a pressão do gás no acumulador atinge o valor mínimo permitido ( $P_1$ ). Neste processo a energia armazenada e o SOC também diminuem.

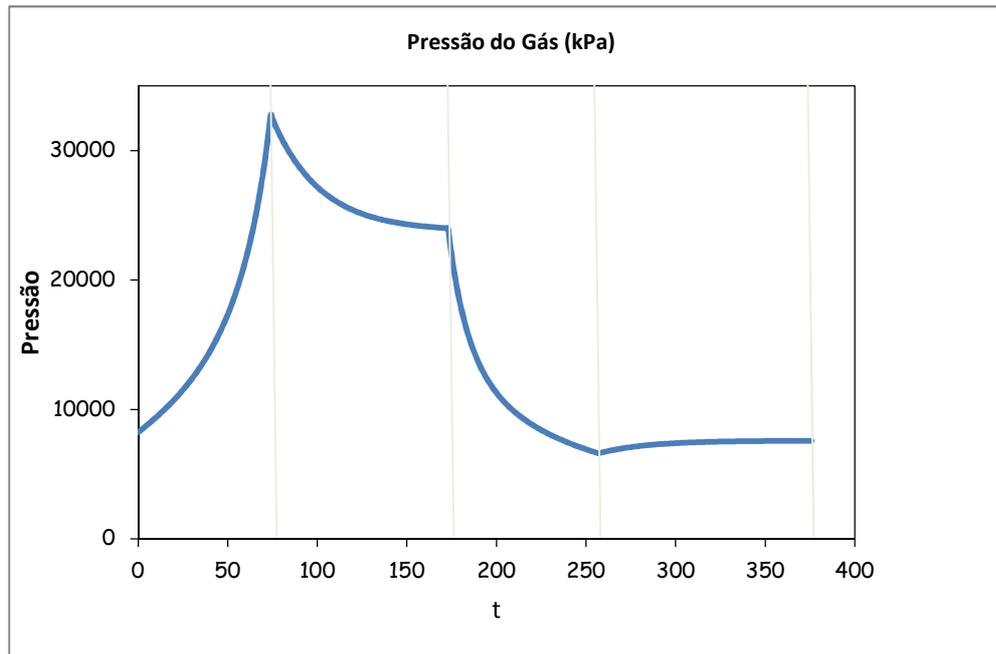
No segundo tempo de recesso (Tempo (t): 258s - 376s): a vazão de óleo no acumulador é interrompido, por conseguinte, o volume do gás permanece constante (figura 3.14). O gás interage com o ambiente fazendo a temperatura (figura 3.15) e, por conseguinte, a pressão (figura 3.16) aumentar até que a temperatura do gás atinge a temperatura ambiente. Neste processo a energia armazenada e o SOC (figura 3.17) também aumentam.



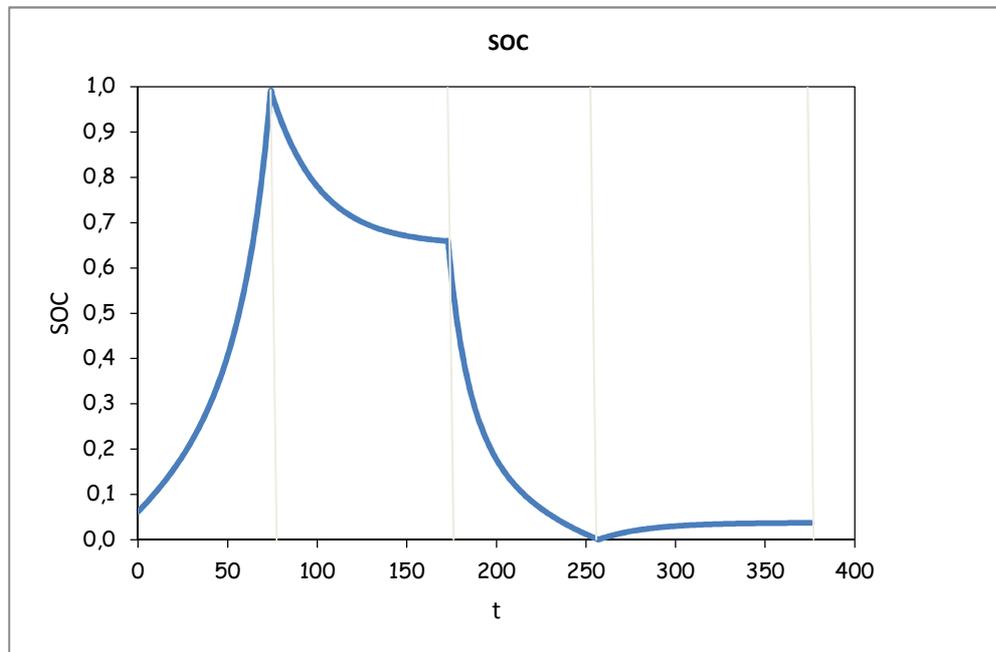
**Figura 3. 15.** Volumem do gás no acumulador.



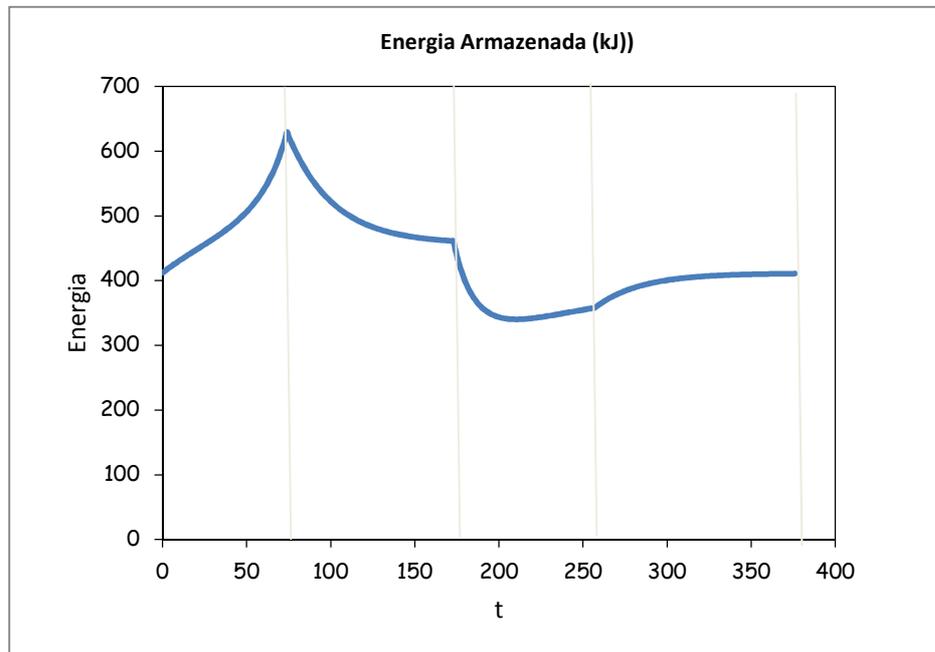
**Figura 3. 15.** Temperatura do gás no acumulador



**Figura 3. 16.** Pressão do gás no acumulador



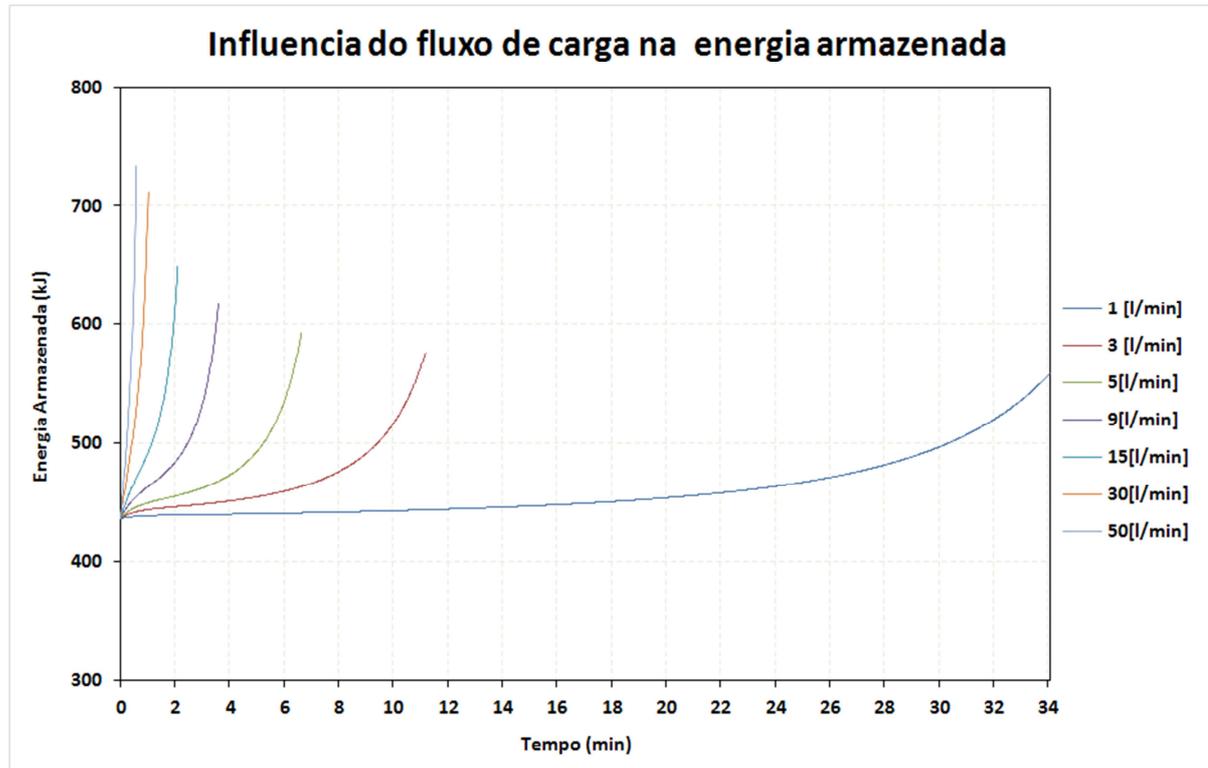
**Figura 3. 17.** Variação do SOC no acumulador.



**Figura 3. 18.** Energia armazenada no acumulador

Na figura 3.18 observa-se que o valor máximo de energia armazenada é de ao redor dos 650 kJ más devido ao fato do que acumulador tem que trabalhar numa faixa de pressões máxima e mínima ( $P_1$  e  $P_2$ ), a energia acumulada á pressão mínima não é utilizável o que leva á ter uma densidade de energia menor da que poderia obter-se se o acumulador pudera-se descarregar completamente. Neste caso a densidade de energia utilizável foi de 6.9 kJ/l.

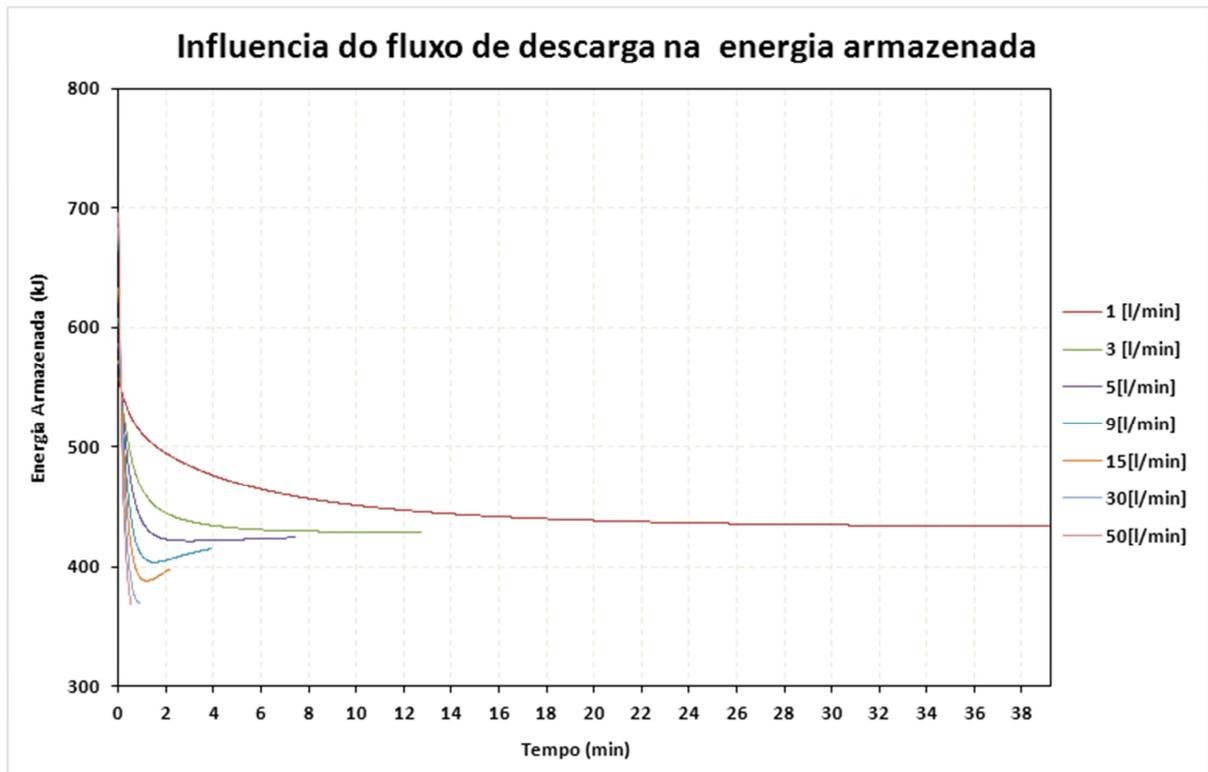
Nas simulações foi observado que quanto maior seja a vazão de carga do acumulador pode se armazenar e obter mais energia, no caso do acumulador padrão. Isto pode ser explicado pelo fato que cargas e descargas feitas lentamente o gás tem maior transferência de calor com o ambiente, e por tanto as perdas por convecção são maiores. Para analisar este comportamento do acumulador foram simulados diferentes fluxos de carga e descarga em um acumulador de 50 l que trabalha com uma pressão máxima de 350 bar.



**Figura 3. 19.** Influência do fluxo de carga na energia armazenada (Acumulador Padrão)

Na figura 3.19 se mostra como varia o tempo de carga e energia armazenada no acumulador para diferentes fluxos de carga. Quanto maior for a vazão de carga do acumulador menor é o tempo de carga e maior a energia que pode ser armazenada no acumulador. Ao princípio da simulação o acumulador tem energia armazenada (437 kJ) já que o gás encontrasse pré-cargado a uma pressão de 87,5 bar ( $P_2 \leq P_0$ ) no acumulador.

Na figura 3.20 tem se os resultados da variação do tempo de descarga e a energia que queda armazenada no acumulador a quando atinge a pressão mínima para diferentes vazões de descarga. Igual que no caso anterior, observasse que o acumulador e capaz de entregar maior quantidade de energia á medida que aumenta a vazão de descarga.



**Figura 3. 20.** Influência do fluxo de descarga na energia armazenada (Acumulador Padrão)

Na tabela 3.4 tem-se os dados dos tempos de carga e descarga total do acumulador para as diferentes vazões. Também se mostra como é a variação da densidade de energia do acumulador com as vazões, a medida que aumenta o fluxo encontra-se que a densidade de energia aumenta. Para a vazão de 30 l/min se atinge a densidade de energia que está registrada na bibliografia para um acumulador padrão 7,23 kJ/l. Para o fluxo de 50 l/min se atinge uma densidade de energia ligeiramente superior 7,88 kJ/l.

**Tabela 3. 4-** Influencia da vazão de descarga e descarga na energia armazenada no acumulador.

Vazão [l/min]	Carga		Descarga		Densidade de Energia [kJ/l]
	Tempo	Energia Armazenada [kJ]	Tempo	Energia Descarregada [kJ]	
1	00:34:04	558,60	00:39:10	124,60	2,49
3	00:11:11	576,11	00:12:42	146,47	2,93
5	00:06:38	592,79	00:07:25	167,75	3,36
9	00:02:16	617,95	00:03:53	203,05	4,06
15	00:02:06	648,49	00:02:08	250,59	5,01
30	00:01:01	711,17	00:00:55	361,17	7,22
50	00:00:35	734,23	00:00:31	394,23	7,88

Um acumulador de 50 l que trabalha com uma pressão máxima de 350 bar e uma vazão de carga e descarga de 50 [l/min) é capaz de armazenar 734,23 kJ e descarregar 394,23 kJ em 35 segundo se é necessário.

### 3.4.2. Bomba e Motor Hidráulico.

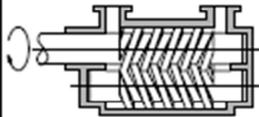
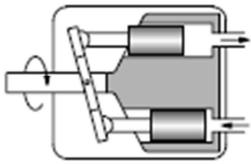
As bombas hidráulicas são responsáveis pela conversão da energia mecânica em energia hidráulica. O motor hidráulico é o responsável de transformar novamente essa energia hidráulica em energia mecânica.

As bombas e os motores utilizados geralmente nos sistemas hidráulicos são os de deslocamento positivo ou volumétrico. O deslocamento pode ser fixo ou variável, dependendo da construção interna. Quando o deslocamento é variável, a vazão da bomba e do motor pode ser controlada através da mudança do seu deslocamento.

Existem muitos tipos de bombas e motores de deslocamento positivo, mas três são as mais frequentes: as de engrenagens, de palhetas e de pistões axiais.

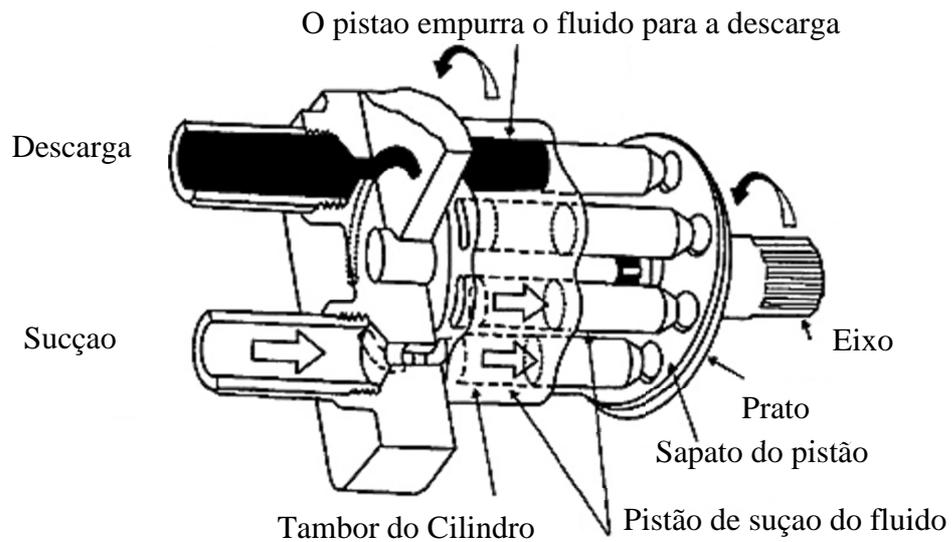
Os diferentes fabricantes reportam em seus catálogos (Bosch, Festo, Parker, Vickers) eficiências para as bombas e motores hidráulicos de deslocamento positivo na faixa de 80-93 %, na tabela 3.5 encontram-se algumas bombas e suas eficiências. Os motores hidráulicos são geralmente projetados da mesma forma que as bombas hidráulicas então suas eficiências são similares.

**Tabela 3. 5-** Tipos de bombas de deslocamento positivo.

Tipo de Bomba		Faixa de Velocidade r.p.m	Deslocamento (cm <sup>3</sup> )	Pressão (bar)	Eficiência Total
	Bomba de engrenagem externa	500 - 3500	1.2 - 250	63 - 160	0.8 - 0.91
	Bomba de engrenagem interna	500 - 3500	4 - 250	160 - 250	0.8 - 0.91
	Bomba de parafuso	500 - 4000	4 - 630	25 - 160	0.7 - 0.84
	Bomba de palhetas rotativas	960 - 3000	5 - 160	100 - 160	0.8 - 0.93
	Bomba de pistões axiais	— - 3000 750 - 3000 750 - 3000	100 25 - 800 25 - 800	200 160 - 250 160 - 320	0.8 - 0.92 0.82 - 0.92 0.8 - 0.92
	Bomba de pistões radiais	960 - 3000	5 - 160	160 - 320	0.90

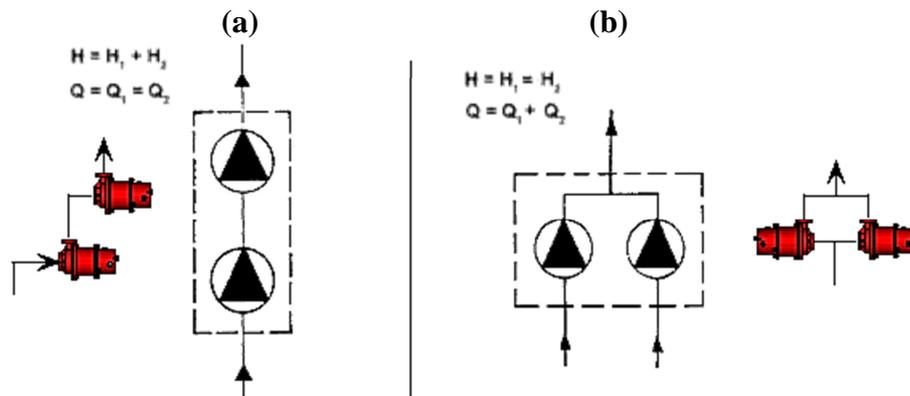
(Merkle, et al., 2003)

Na bomba volumétrica de pistões axiais (Figura 3.21), o bombeamento do fluido ocorre graças ao movimento do tambor que contém os pistões internamente; que é acionado por um motor (mecânico ou elétrico). Através da translação dos pistões uma das extremidades de cada pistão desliza sobre o prato inclinado, gerando assim movimentos axiais e produzindo fluxo. O funcionamento do motor hidráulico é semelhante, mas de maneira inversa.



**Figura 3. 21.** Bomba Volumétrica a de pistões axiais (Vickers, 2000)

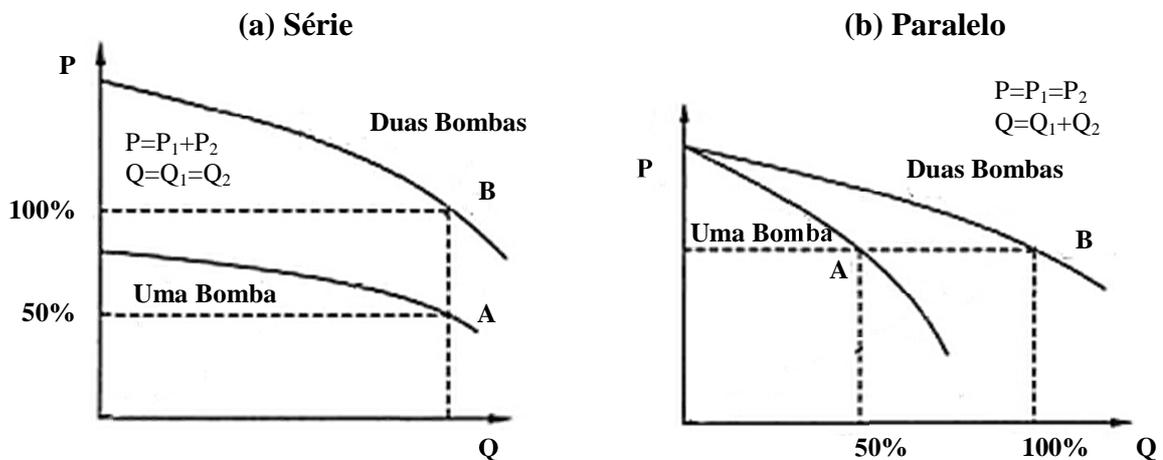
Nos sistemas hidráulicos pode ser necessário o uso de varias bombas, a fim de se obter um regime de operação desejada. As bombas podem ser conectadas em uma configuração em paralelo ou em série. Quando as bombas estão ligadas em série, a saída da primeira bomba conduz diretamente á entrada da segunda, figura 3.22 (a), em uma configuração em paralelo as saídas das duas bombas atingem o mesmo ponto, figura 3.22 (a).



**Figura 3. 22.** Configuração de bombas em: a) Série b)Paralelo

Bombas em série são geralmente utilizadas para atingir pressões maiores e bombas em paralelo para alcançar maiores vazões no sistema. A figura 3.23 mostra as características de operação de bombas idênticas conectadas em série e em paralelo. O ponto de operação de só uma bomba é o ponto A, quando as duas bombas são conectadas o ponto de operação move-se para o ponto B.

Quando duas bombas idênticas são ligadas em série a pressão é duas vezes a pressão de uma única bomba com ao mesmo fluxo. Quando as bombas são ligadas em paralelo a pressão permanece constante é a vazão duplica-se.



**Figura 3. 23.** Operação de bombas em: serie e paralelo

### 3.4.2.1. Modelagem Matemática da bomba e do motor hidráulico.

A bomba e o motor hidráulico utilizados no modelo do sistema de armazenamento de energia são do tipo de deslocamento variável. As seguintes equações (3.22-3.27), são a base para os modelos no sistema, estão baseadas em Hatami (2013).

Para a bomba tem-se:

$$Q_b = \frac{X_b D_b n_b \eta_{vol-b}}{3600} \quad (3.1)$$

$$P_{O_b} = \frac{P_b Q_b}{\eta_{t-b}} \quad (3.2)$$

$$\eta_{t-b} = \eta_{vol-b} \eta_{me-b} \quad (3.3)$$

Para o motor hidráulico tem-se:

$$Q_b = \frac{X_m D_m n_m}{3600 \eta_{vol-m}} \quad (3.4)$$

$$P_{O_b} = P_b Q_b \eta_{t-b} \quad (3.5)$$

$$\eta_{t-b} = \eta_{vol-m} \eta_{me-m} \quad (3.6)$$

## Capítulo 4.

# INTEGRAÇÃO.

O objetivo do sistema híbrido solar/biomassa é suprir a carga demandada minimizando o uso da biomassa. Para isso a demanda tem que poder ser suprida por qualquer das fontes do sistema ou o conjunto de elas. Embora o recurso solar, no caso do Brasil é ótimo, seu uso no sistema híbrido para produzir energia está limitado pela carga e/ou a capacidade do sistema armazenamento.

O objetivo principal do sistema de controle proposto na integração do SHE é reduzir, tanto quanto seja possível, a participação do MCI, tendo o máximo proveito do recurso solar, por isso o sistema de armazenamento nunca é carregado utilizando a energia proveniente da biomassa e só é utilizado para armazenar o excesso de energia produzido pelo sistema de geração solar e usado posteriormente quando a fonte solar não possa suprir a demanda totalmente (Estratégia do carregamento e descarregamento do sistema de armazenamento), quando a energia gerada pela fonte solar é menor que a demanda e o  $SOC = 0$ , o MCI é ligado para atender conjuntamente a demanda. Esta é a estratégia mais comum encontrada nos SHE estudados na revisão bibliográfica.

## 4.1. ESTRUTURA GERAL.

A estrutura geral da integração do sistema Dish/Stirling, Gaseificador/MCI e o sistema de armazenamento no sistema híbrido solar/biomassa é mostrada na figura 3.2. As saídas mecânicas dos motores de cada um dos sistemas, Dish/ Stirling e o Gaseificador/ MCI, são conectados á uma bomba volumétrica de deslocamento variável. As bombas e o sistema de armazenamento estão conectados em paralelo e suas descargas vão diretamente á linha de sucção de um motor hidráulico que está ligado a um gerador elétrico. A linha de sucção das bombas e descarga do motor hidráulico estão conectadas á um reservatório com a quantidade de óleo requerida para suprir as necessidades do sistema. Além disso, a descarga da bomba do sistema Dish/Stirling está conectada também aos acumuladores e ao reservatório.

A configuração anteriormente descrita permite que a carga possa ser fornecida por qualquer uma das fontes. Além disso, as fontes e o sistema de armazenamento podem suprir a carga ao mesmo tempo (Configuração em Paralelo). O sistema tem quatro principais modos de operação:

- O primeiro, se o sistema Dish/Stirling fornece energia suficiente, a vazão gerado por sua bomba será utilizado para carregar os acumuladores e gerar energia para suprir a carga por meio do motor hidráulico e o gerador elétrico, em caso de que a vazão seja maior da necessária para suprir a carga e carregar os acumuladores o excesso de vazão gerado pela bomba deste sistema será desviado de retorno ao reservatório.
- O segundo, se o fluxo gerado pelo sistema Dish/Stirling não é suficiente para suprir a carga e o sistema de armazenamento está carregado (SOC >0), os acumuladores seriam descarregados para a geração de energia conjuntamente.
- O Terceiro acontece quando o sistema de armazenamento estiver descarregado e o fluxo gerado pelo sistema Dish/Stirling não é suficiente para suprir a carga, então o sistema Gaseificador/MCI seria ligado para fornecer o fluxo necessário e suprir a carga conjuntamente.

- Finalmente, no caso em que o sistema Dish/Stirling não funcionar (Radiação solar baixa, nebulosidade, chuva, etc.) a carga seria suprida pelo sistema Gaseificador/MCI ou sistema de armazenamento (dependendo de seu estado de carga).

Quando o sistema Gaseificador/MCI é ligado, o sistema de armazenamento não é ativado para carga ou descarga.

Esta estrutura permite minimizar o uso da biomassa, e fornecer energia de emergência por meio do sistema de armazenamento, quando os acumuladores hidráulicos estão carregados ( $SOC > 1$ ).

A pressão do sistema é determinada pela bateria de acumuladores, se a bateria vai ser carregada a pressão do sistema tem que ser maior que a pressão dos acumuladores, se a bateria vai ser descarregada a pressão do sistema tem que ser menor que a pressão dos acumuladores e em qualquer outra situação a pressão do sistema tem que ser a mesma dos acumuladores. Isto é com o fim de garantir do que o fluxo possa ser direcionado ou não, do sistema á bateria ou da bateria ao sistema.

## 4.2. MODELO DINAMICO.

O modelo dinâmico desenvolvido em Simulink® da integração completa é apresentado na Figura 4. 1. Modelo dinâmico do para a integração dos modelos desenvolvidos em Matlab® anteriormente por Centeno (2010) e Mendoza (2012) em Simulink® foi necessário a utilização de muitos subsistemas.

Cada bloco (caixa) na Figura 4. 1. Modelo dinâmico do Sistema Híbrido Solar/Biomassa representa um subsistema:

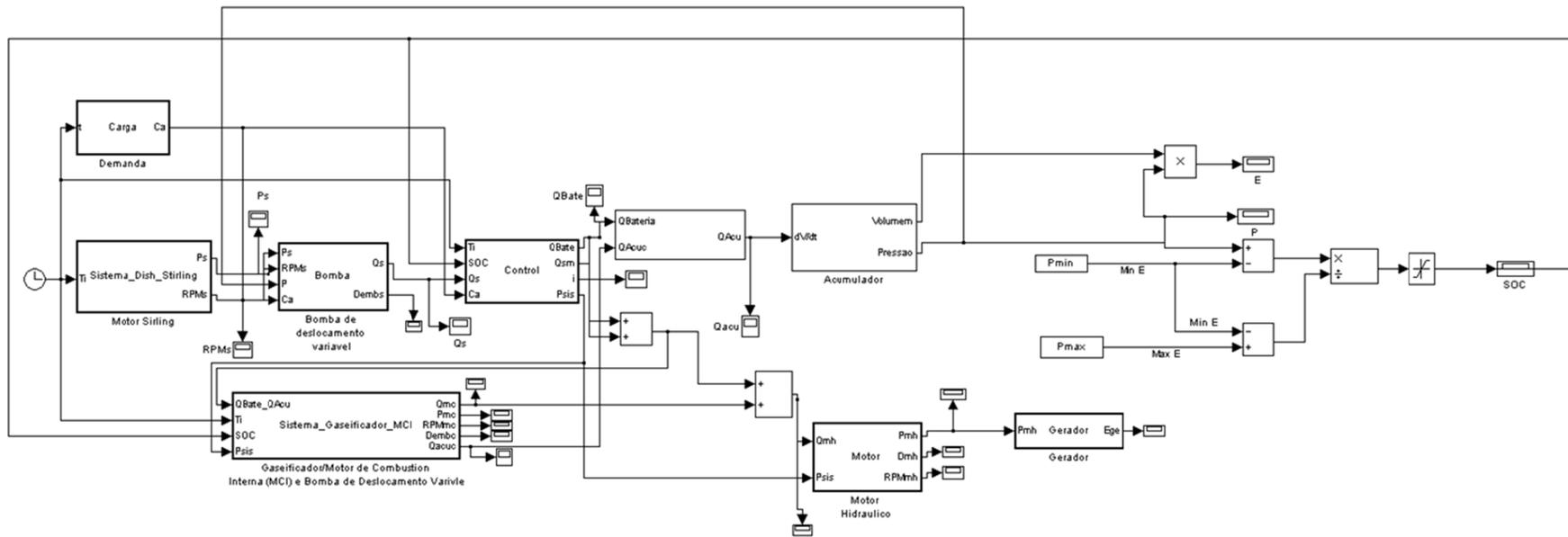
1. No primero bloco está o modelo do sistema Dish/Stirling, este bloco e carregado com os dados de radiação solar para cada hora do dia de uma data especifica para

um determinado lugar, e um diâmetro específico do coletor (Dish). Com estes parâmetros o modelo calcula a potência mecânica e as rpm desenvolvidas pelo motor Stirling.

2. O bloco do modelo da bomba hidráulica, que internamente tem os parâmetros de funcionamento (rpm mínimas, rpm máximas, deslocamento máximo), recebe os dados a potência mecânica, as rpm desenvolvidas pelo motor Stirling e pressão do sistema (pressão dos acumuladores) para calcular a vazão e o deslocamento a uma determinada pressão.
3. O bloco da carga tem os dados coletados da demanda de energia a ser fornecida pelo sistema para cada instante de tempo.
4. O bloco de controle de acordo com o dado da vazão desenvolvida pela bomba conectada ao sistema Dish/Stirling, o SOC do sistema de armazenamento e demanda, é o encarregado de pôr em funcionamento (modo carga ou descarga) o modelo do sistema de armazenamento (bateria de acumuladores) e/ou o modelo Gaseificador/MCI. Também direciona a vazão necessária para o motor para atingir a necessidade da carga.
5. O bloco do modelo do sistema Gaseificador/MCI tem os dados das RPM e sua correspondente potência mecânica desenvolvida pelo MCI trabalhando com biogás de uma determinada biomassa (da qual é conhecida sua composição), a uma pressão inicial e uma razão de equivalência de combustível-ar. Neste bloco também está o modelo de uma bomba hidráulica, idêntica à bomba que se encontra conectada ao sistema Dish/Stirling, assim é possível determinar a vazão e o deslocamento desenvolvido por esta bomba no momento de ligar o sistema Gaseificador/MCI.
6. O bloco do modelo da bateria de acumuladores recebe o dado da vazão em excesso desenvolvido pela bomba conectada ao sistema Dish/Stirling ou a necessidade de fluxo para atingir a carga. Ele é o responsável por direcionar a vazão

para cada acumulador dependendo da quantidade de acumuladores que compõem o sistema de armazenamento.

7. O bloco ou subsistema do acumulador recebe o dado vazão para ser carregada ou descarregada. O subsistema contém o modelo do acumulador desenvolvido anteriormente, fazendo possível achar o SOC de cada acumulador e finalmente da bateria, assim como sua pressão, temperatura e energia armazenada.
8. O motor hidráulico recebe o fluxo necessário para atingir a carga, aqui é possível calcular suas rpm, potência mecânica, e seu deslocamento á pressão do sistema.
9. Finalmente o bloco do gerador elétrico considera a eficiência de um gerador para transformar a potência mecânica de saída do motor hidráulico em potencia elétrica, para atingir demanda de energia elétrica da carga.



**Figura 4. 1.** Modelo dinâmico do Sistema Híbrido Solar/Biomassa

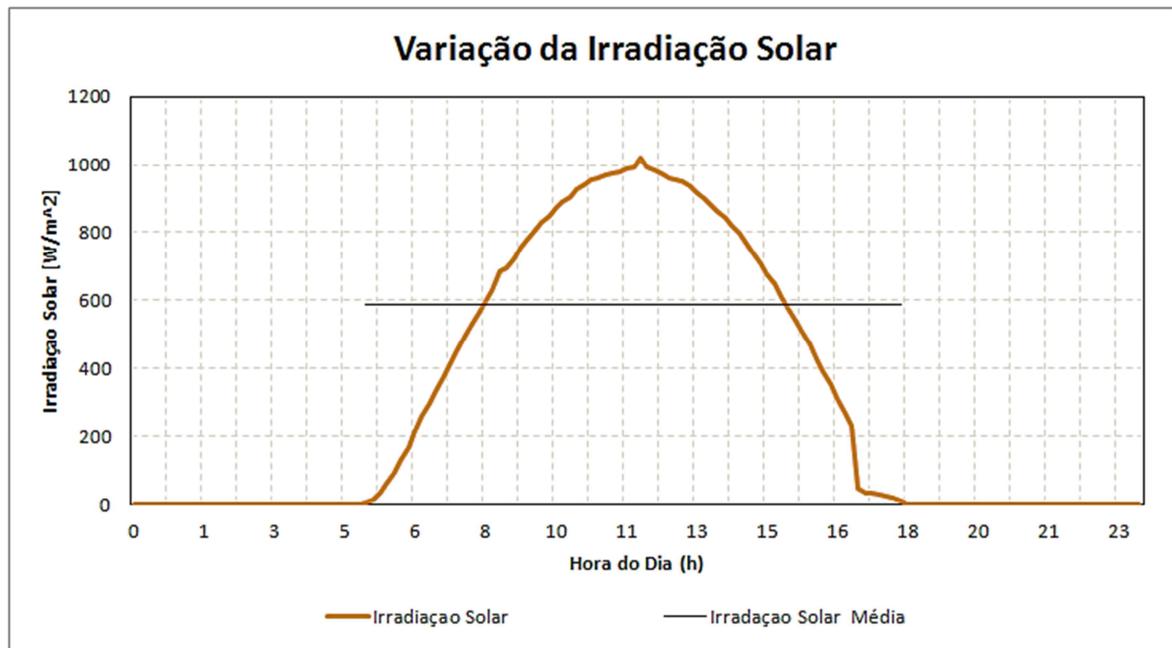
### 4.3. RESULTADOS E ANÁLISES.

Para realizar as simulações foi necessário ter em conta algumas considerações que são descritas a continuação:

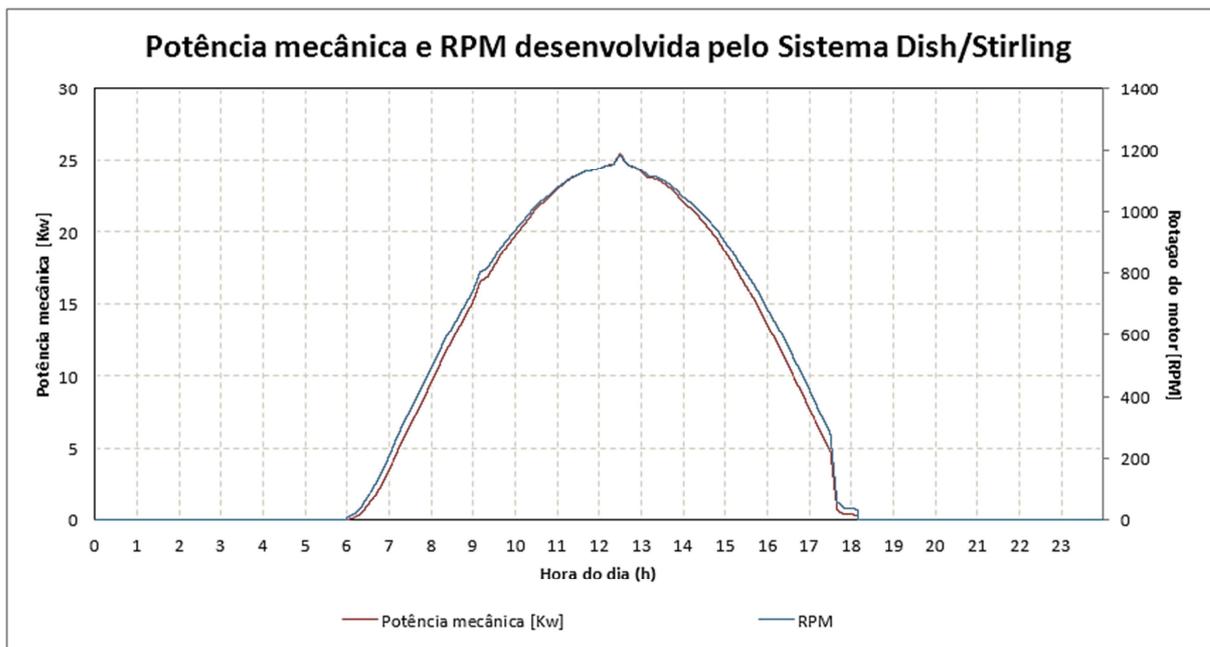
- A potência Mecânica desenvolvida por o modelo do Sistema Dish/Stirling foi calculada tendo em conta a eficiência do receptor. Em Mendoza (2012) encontrassem 3 metodologias diferentes para o calculo desta eficiência ( Stine & Diver (1994), Banha & Somchai (2005), e CIEMAT (2009) ), os cálculos neste Modelo foram feitos só com a Metodologia Stine & Diver (1994).
- O Diâmetro do Coletor do sistema Dish/Stirling utilizado foi 10,57 m.
- Os parâmetros do Sistema Motor Otto/Gaseificador utilizados foram:
  - *Pressão Inicial: 100000 Pa.*
  - *Relação Equivalente combustível-ar: 0,9434.*
  - *Eficiência Mecânica do Motor: 80%*
  - *Biomassa: Eucalipto.*
- Os rendimentos volumétricos ( $\eta_{vol-m}$ ,  $\eta_{vol-b}$ ) e rendimentos mecânicos ( $\eta_{me-b}$ ,  $\eta_{me-m}$ ) das bombas e do motor hidráulico assume-se constantes e iguais a 0,9 então os rendimentos geral ( $\eta_{t-b}$ ,  $\eta_{t-m}$ ) é 0,8
- A eficiência do gerador elétrico foi assumida em 0,95
- A demanda a simular é uma carga constante de 4 kWe dado que é a potencia elétrica desenvolvida pelo motor MCI/Gaseificador com a potência mecânica máxima no sistema.
- A rotação do gerador elétrico e motor hidráulico tomaram-se constante e igual a 1800 rpm

- A hora de partida da simulação é 6:00 horas.

As características das variações da irradiação solar de um dia ótimo se mostram na Figura 4.2 e na figura 4.3 a potência mecânica desenvolvida.

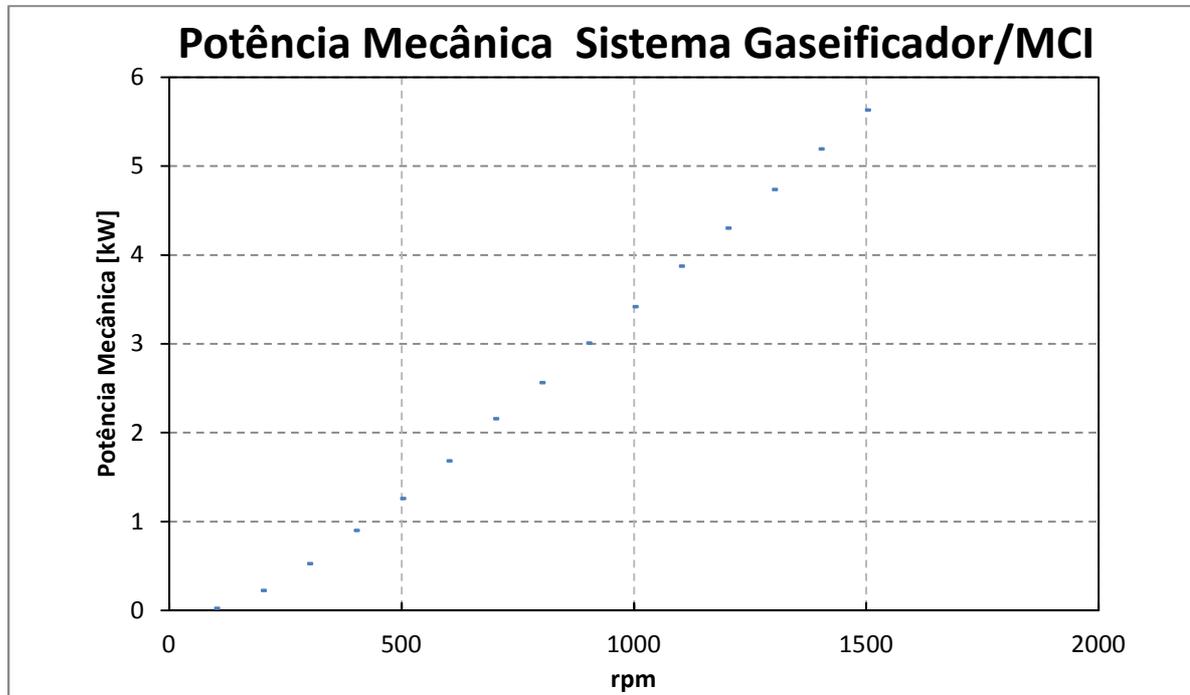


**Figura 4. 2.** Variação da irradiação solar na cidade de Itajubá (15/10/2010)



**Figura 4. 3.** Potência mecânica e RPM desenvolvida pelo Sistema Dish/Stirling.

Na figura 4.4 se mostram a potência mecânica desenvolvida pelo sistema Gaseificador/MCI com relação à rotação do motor.



**Figura 4. 4. Potência mecânica Vs. rpm desenvolvida pelo Gaseificador/MCI.**

A continuação mostram-se os resultados das simulações. Na figura 4.5, 4.6, 4.7 apresentasse a demanda e a energia geradas por cada sistema, como também o fluxo da energia gerada e armazenada na carga e descarga do acumulador. Os resultados mostrados foram obtidos com um sistema de armazenamento conformado por 15 acumuladores de 50 l cada um e trabalhando á uma pressão máxima de 35000 kPa.

Quando a potência elétrica gerada pelo sistema Dish/Stirling (figura 4.5) é a maior que a demanda os acumuladores são carregados ao mesmo tempo que a demanda é suprida. Isto pode ser conferido na figura 4.6, onde se mostra a potência elétrica da bateria, quando energia é negativa (entre as 8 e 9 horas) indica que os acumuladores estão sendo carregados pelo sistema Dish/Stirling é positivo (entre as 16:43 e 17:09 horas) quando os acumuladores estão

forneendo a demanda. Entre as 6 e 6:02 horas a bateria também fornece a demanda já que os acumuladores estão pré-carregados e o sistema Dish/Stirling não esta em funcionamento.

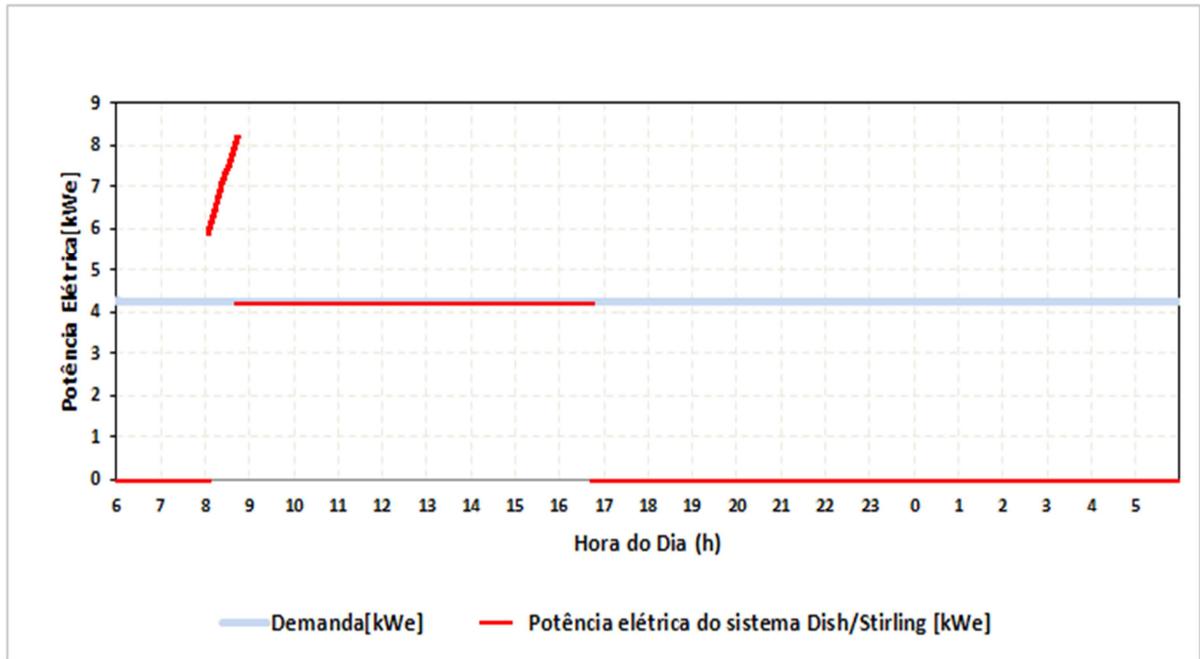


Figura 4. 5. Potência elétrica desenvolvida pelo sistema Dish/Stirling Vs. Demanda.

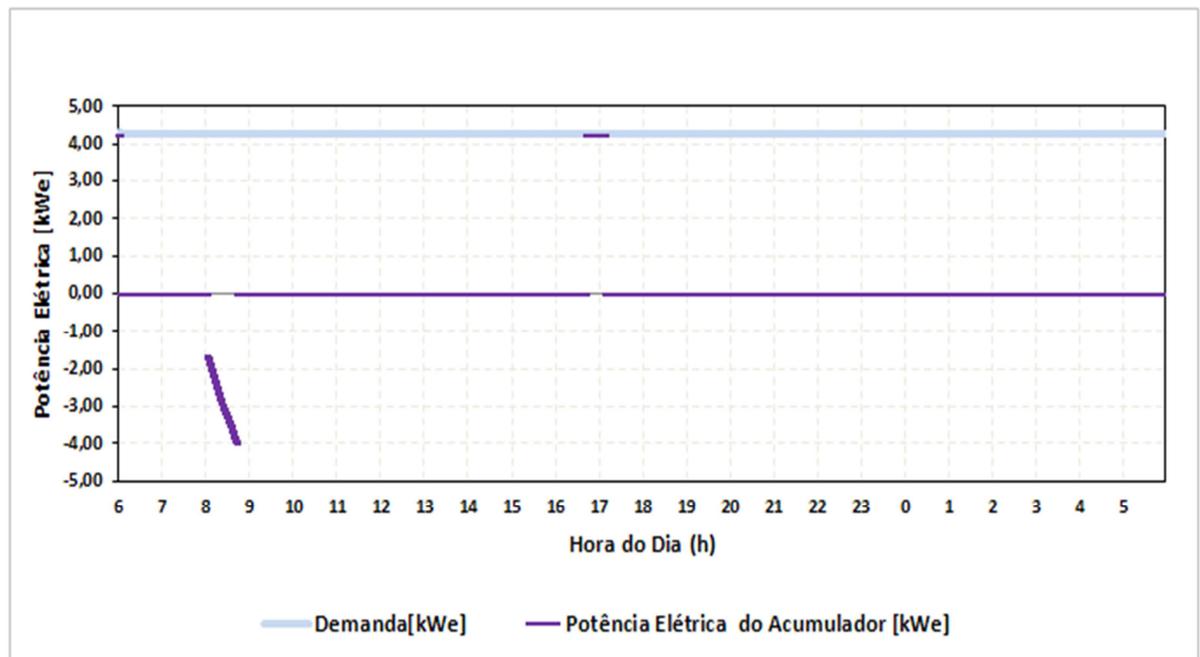
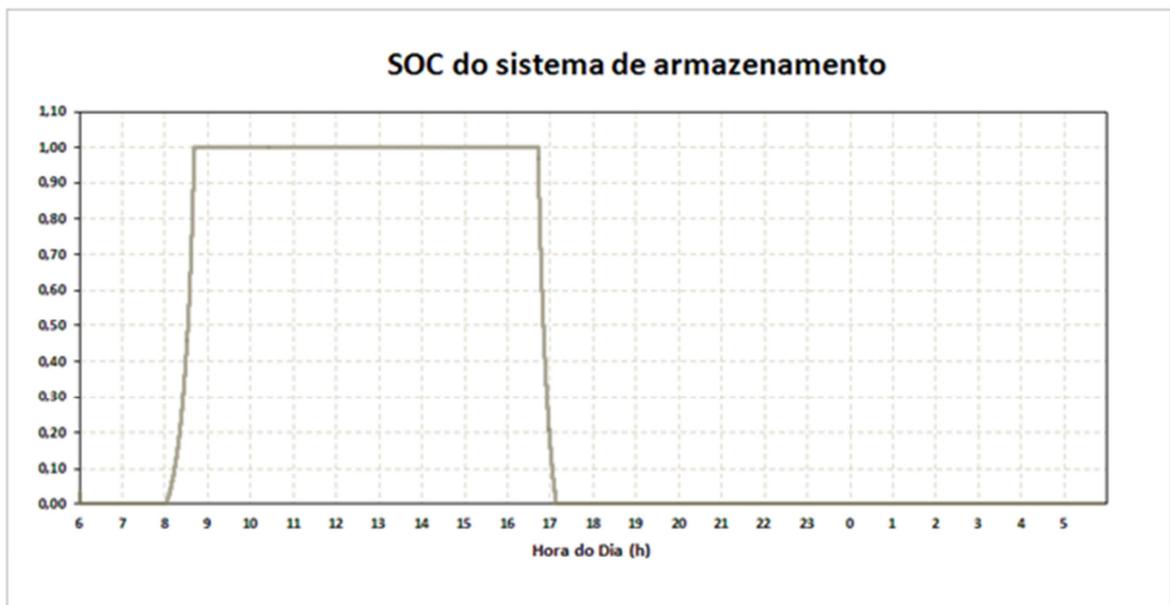


Figura 4. 6. Potência elétrica desenvolvida pelo sistema de Armazenamento Vs. Demanda.

O SOC do sistema de armazenamento é mostrado na figura 4.7, os acumuladores só permitem carga quando o SOC é menor que 1. O processo de carga da bateria ocorre entre as 8:01 e 8:42 horas, quando o sistema Dish/Stirling gera uma vazão maior da necessária para gerar a potência elétrica da demanda. O processo de carga neste caso não ocorre a uma vazão constante, pois, a vazão do sistema Dish/Stirling varia e só o excesso é direcionado a bateria de acumuladores. Os processos de descarga (entre as 6 e 6:02 horas e entre as 16:43 e 17:09 horas) por sua parte se ocorrem a uma potencia elétrica constante porque nestes casos o sistema foi descarregado para suprir a demanda completamente. Entre as 16:43 e 17:09 horas (26 minutos ) a bateria foi descarregada completamente desde seu capacidade máxima, SOC= 1 que ocorre quando é alcançada a pressão máxima (P2) nos acumuladores, até sua capacidade mínima, SOC=0 que ocorre quando é alcançada a pressão mínima (P1), gerando uma potência elétrica constante de 4 kWe para fornecer a demanda.



**Figura 4. 7. Variação do SOC do Sistema de armazenamento.**

Quando a carga não pode ser fornecida pelo sistema Dish/Stirling (ausência de sol), e tampouco pelo sistema de armazenamento (SOC=0) o sistema gasificado/MCI entra em funcionamento. Como pode é mostrado na figura 4.8.

Na figura 4.9 mostrasse como a carga é fornecida constantemente durante o tempo

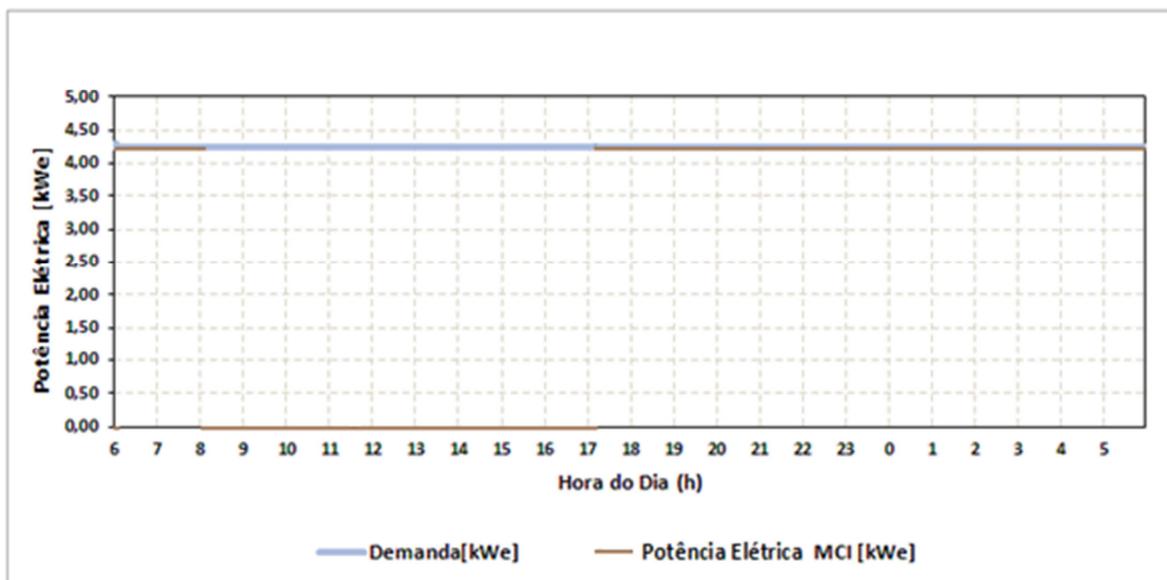


Figura 4. 8.. Potência elétrica a gerada pelo sistema Gaseificador/MCI Vs. Demanda.

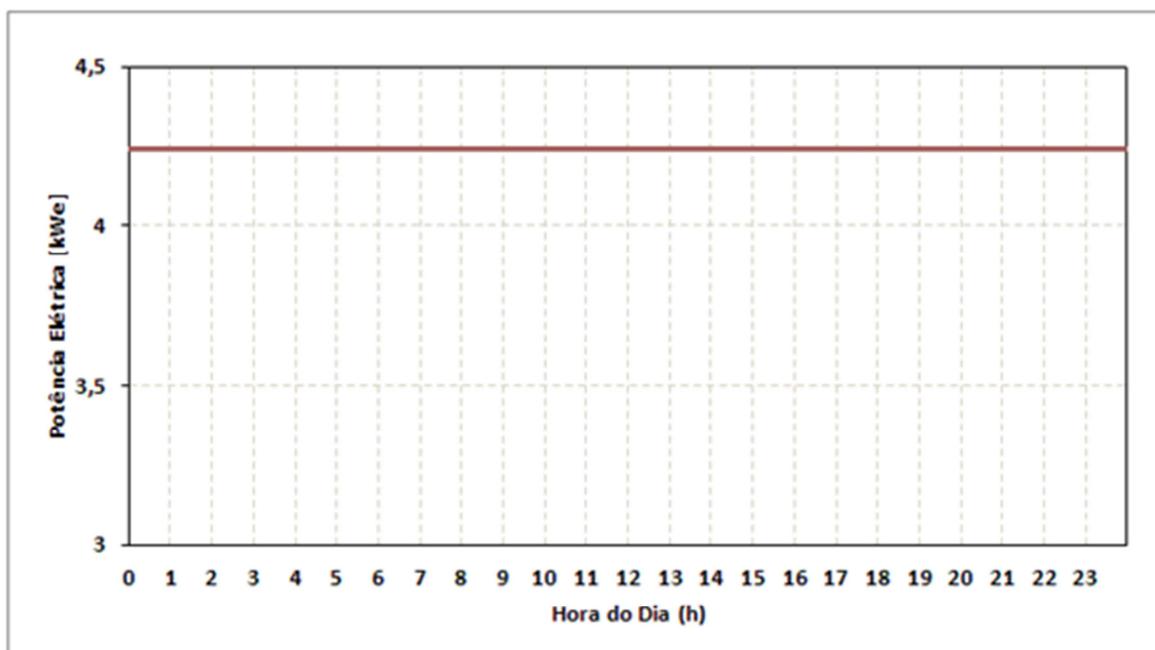


Figura 4. 9. Potência elétrica a gerada pelo Sistema SHE.

Pode-se maximizar o uso da energia armazenada trocando a estratégia de carga e descarga dos acumuladores. O modelo feito distribui o Vazão que chega do sistema Dish/Stirling em partes iguais a cada acumulador (sistema em paralelo) já que todos se encontram á mesma pressão. Como resultado tem se fluxos de carga e descarga pequenos, o que aumenta as perdas por transferência de calor dos acumuladores com os arredores. Também pode se utilizar acumuladores de maior capacidade com o fim de diminuir o números de acumuladores e aumentar o fluxo em cada um, nas simulações foram utilizados acumuladores de 50 l, na indústria encontrasse acumuladores de até 200 l trabalhando com uma pressão máxima de 3300 kPa (HYDAC, 2013).

Finalmente na tabela 4.1 se mostras o resumo geral do sistema, e as horas de funcionamento de cada um dos sistemas.

**Tabela 4. 1- Dados do funcionamento do sistema SHE.**

<b>Atividade</b>	<b>Tempo [Horas]</b>
Funcionamento do Sistema Dish/Stirling	08 : 41 : 38
Funcionamento do Sistema de Armazenamento	01 : 07 : 19
Funcionamento do Sistema Gaseificador/MCI	14 : 50 : 45
Tempo de carregamento dos acumuladores	00 : 39 : 42
Tempo de descarregamento dos acumuladores	00 : 27 : 37

O sistema de armazenamento constituído por 15 acumuladores, trabalhando a uma pressão máxima 350 bar trabalha em modo de descarrega durante 27 : 37 minutos.

## Capítulo 5.

# **ESTUDO DE CASO – COMUNIDADE SANTO ANTÔNIO**

Como estudo de caso, neste trabalho é analisada uma comunidade localizada no arquipélago do Marajó, estado Pará. A energia desta comunidade isolada chamada de Santo Antônio era fornecida exclusivamente com geradores diesel. Em Pinheiro (2011) um projeto de pesquisa e desenvolvimento das Centrais Elétricas do Pará (CELPA) com a parceria da Universidade Federal do Pará (UFPA) o Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), e o Laboratório de Energia, Biomassa e Meio Ambiente (EBMA), o sistema de geração elétrica foi parcialmente substituído por uma usina composta por uma caldeira e um gerador de vapor (ciclo Rankine) de 50kW alimentado pelos resíduos da indústria madeireira existentes na própria comunidade, substituindo assim, parte dos geradores diesel existentes. O objetivo principal deste projeto foi a implantação de sistemas de eletrificação baseados no uso de biomassa residual, com um modelo de gestão que fosse sustentável e adequado às condições das comunidades ribeirinhas da Amazônia, localizadas

em regiões remotas, considerando o fato da disponibilidade de biomassa nessas regiões de acordo com a legislação do setor elétrico vigente no Brasil.

Nesta dissertação será avaliada uma solução alternativa para a eletrificação desta comunidade através de um SHSB composto por motor de combustão interna ciclo Otto com utilização de gás de biomassa obtido a partir um gaseificador co-corrente, um sistema Dish/Stirling e um sistema de armazenamento de energia com Acumuladores Hidráulicos.

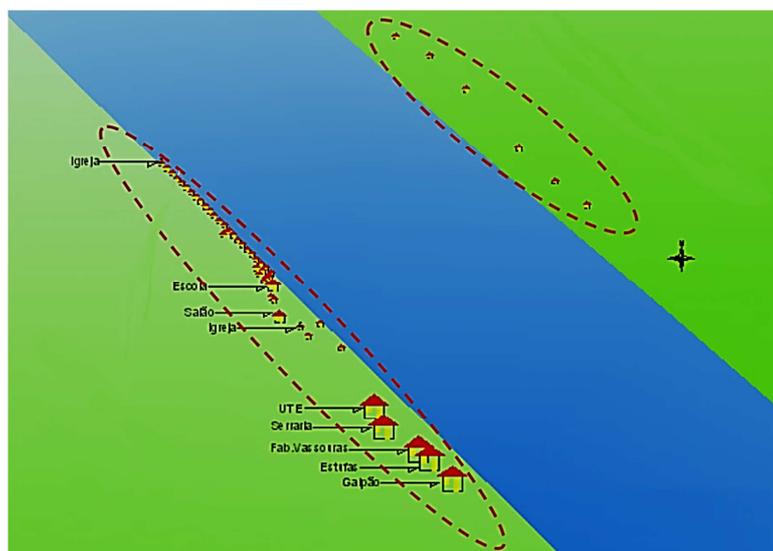
## 5.1. A COMUNIDADE.

Santo Antônio está localizada nas coordenadas  $00^{\circ} 55'18''$  Sul e  $50^{\circ} 49'25''$  Oeste. O acesso deve ser realizado a partir do município de Breves, podendo-se efetuar através de lancha fretada (aproximadamente três horas de viagem), ou barco de linha (aproximadamente oito horas de viagem), não há nenhuma estrada para chegar á comunidade (Pinheiro, et all., 2012) . A Figura 5.1 mostra uma vista da comunidade.



**Figura 5. 1.** Vista geral de Santo Antônio e suas residências (Pinheiro, 2011).

A comunidade possui trinta e seis residências agrupadas, cinco residências dispersas, uma escola de ensino fundamental, duas igrejas, um pequeno comércio, uma serraria, uma fábrica de vassouras, um local de guarda e secagem da madeira. A Figura 5.2 mostra a distribuição das residências e demais prédios na região



**Figura 5. 2.** Distribuição dos prédios na comunidade de Santo Antônio (Pinheiro, 2011).

### 5.1.1. Recurso Solar e Disponibilidade de Biomassa na Comunidade.

A comunidade de Santo Antônio, como já foi mencionado, conta com uma serraria e uma fábrica de vassouras, considerando este fato, os resíduos florestais provenientes desta atividade são considerados como uma importante fonte de biomassa de resíduos na própria comunidade para a geração de eletricidade.

Na tabela 5.1 são apresentados os resultados finais da caracterização energética das amostras dos resíduos do setor madeireiro feito por Pinheiro (2011).

**Tabela 5. 1** - Características típicas da biomassa em Santo Antônio.

Biomassa	PCI (MJ/kg)	PCS (MJ/kg)	Análise Química Imediata			
			Umidade (%)	Teor de Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Carbono Fixo (%)
Resíduos Florestais	13	18,50-20,5	30	80	1	19

(Pinheiro, 2011)

Conhecer os valores exatos do recurso solar numa localização específica do Brasil é praticamente impossível devido ao grande território e escasso número de estações solarimétricas, mas podem ser utilizados os valores das estações mais próximas à comunidade como uma boa aproximação. A CEPEL por meio do site na internet da CRESESB oferece o programa SunData o qual destina-se ao cálculo da radiação solar diária média mensal em qualquer ponto do território nacional. Desta forma, introduzindo as coordenadas geográficas da comunidade no site é possível observar que a estação solarimétrica mais próxima é a localizada no município de Breves, a 92,9 km da comunidade de Santo Antônio.

Na figura 5.3 e 5.4 mostram-se os dados do recurso solar na localidade de Breves que serão utilizadas para o estudo na comunidade de Santo Antônio por ser a mais próxima.

**Coordenada Geográfica**

---

Latitude  °  '  "  Longitude  °  '  " Oeste

Formato Numérico:  
 graus decimais (00.00°)  
 graus, minutos e segundos (00°00'00")

I. Os valores válidos de latitude devem estar na faixa de 12° Norte e 40° Sul e de longitude na faixa de 30° Oeste e 80° Oeste. Em caso de dúvida entre em contato conosco.

**Localidades próximas**

---

**Latitude:** ,921667° Sul  
**Longitude:** 50,823611° Oeste

#	Município	UF	Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]
<input checked="" type="checkbox"/>	Breves	PA	1,682222°S	50,480277°O	92,9
<input checked="" type="checkbox"/>	Porto de Móz	PA	1,748333°S	52,238333°O	182,4
<input checked="" type="checkbox"/>	Cametá	PA	2,244444°S	49,495833°O	208,6

**Figura 5. 3.** Estações solarimétricas mais próximas à Santo Antônio (CRESESB, 2013).

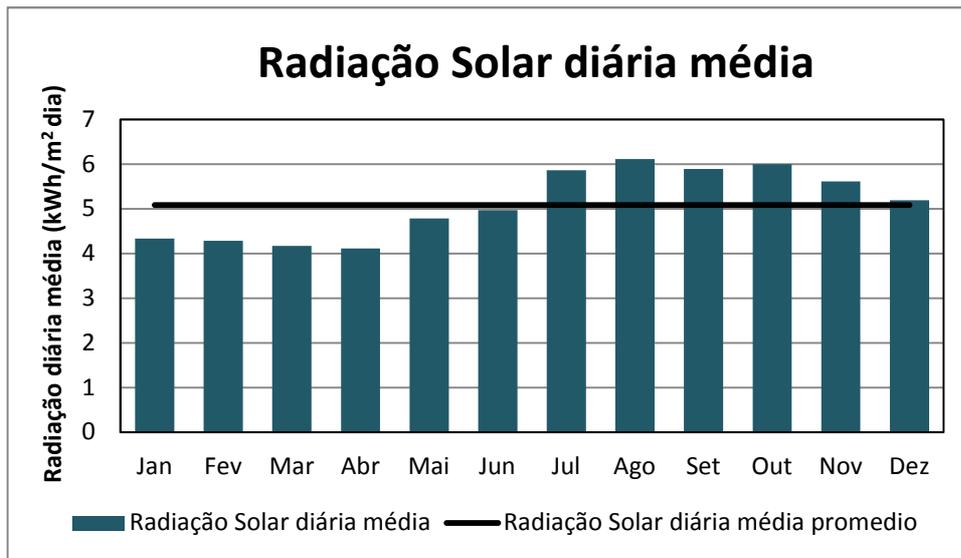


Figura 5. 4. Radiação Solar diária media de Santo Antônio (CRESESB, 2013).

## 5.2. DEMANDA DE ENERGIA DA COMUNIDADE.

Os detalhes e as considerações do levantamento da demanda da energia da comunidade de Santo Antônio se encontram em Pinheiro (2011). As figuras 5.5 a 5.6 representam as curvas de demanda um dia típico, mais representativo do ano. E na figura 5.7 a curva de carga da comunidade.

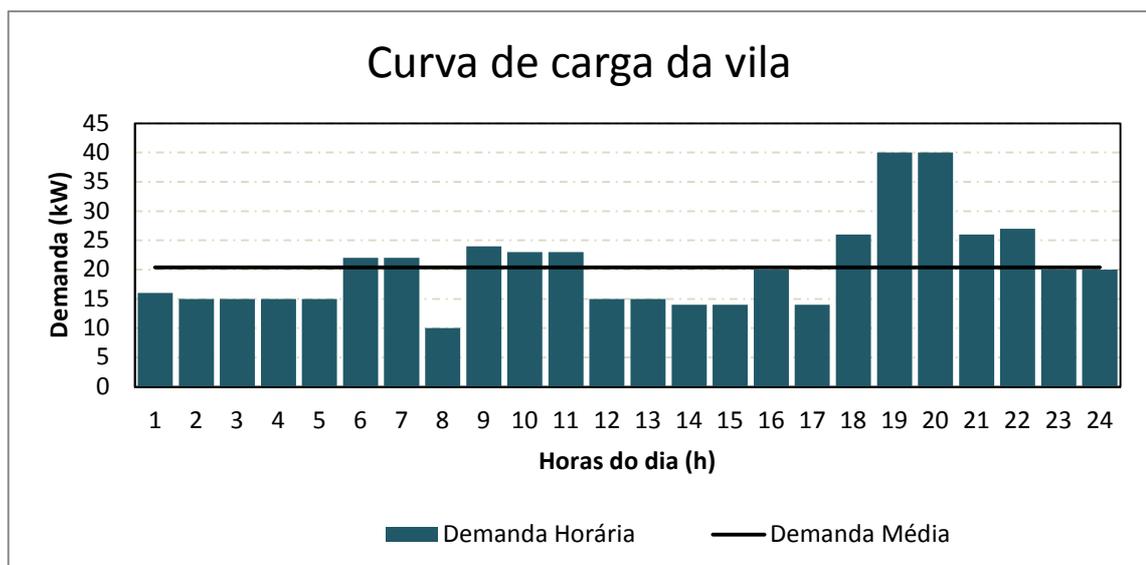
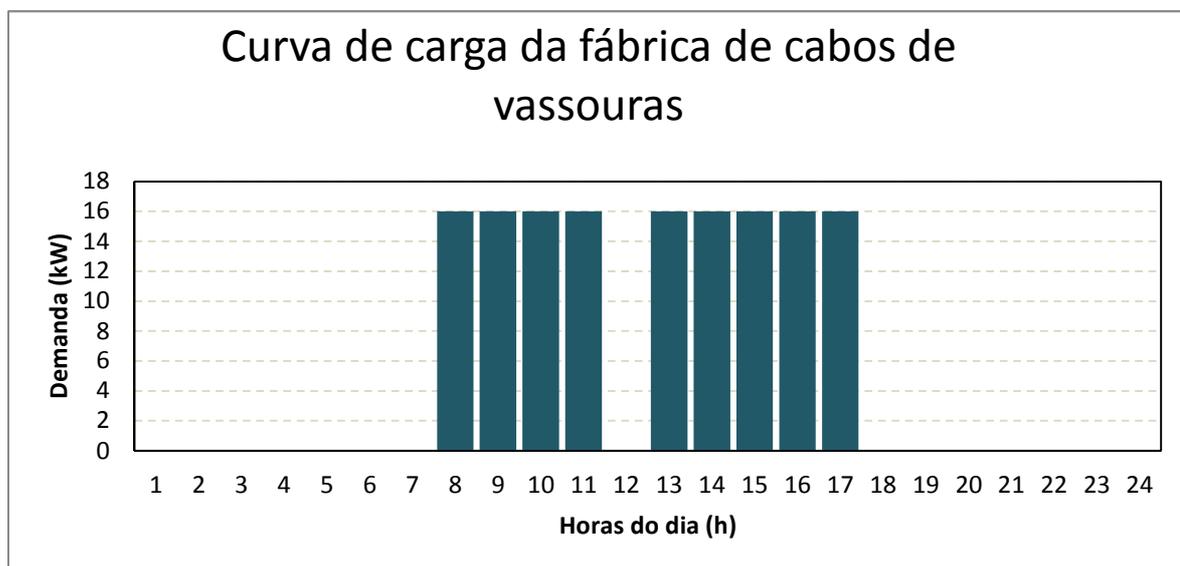
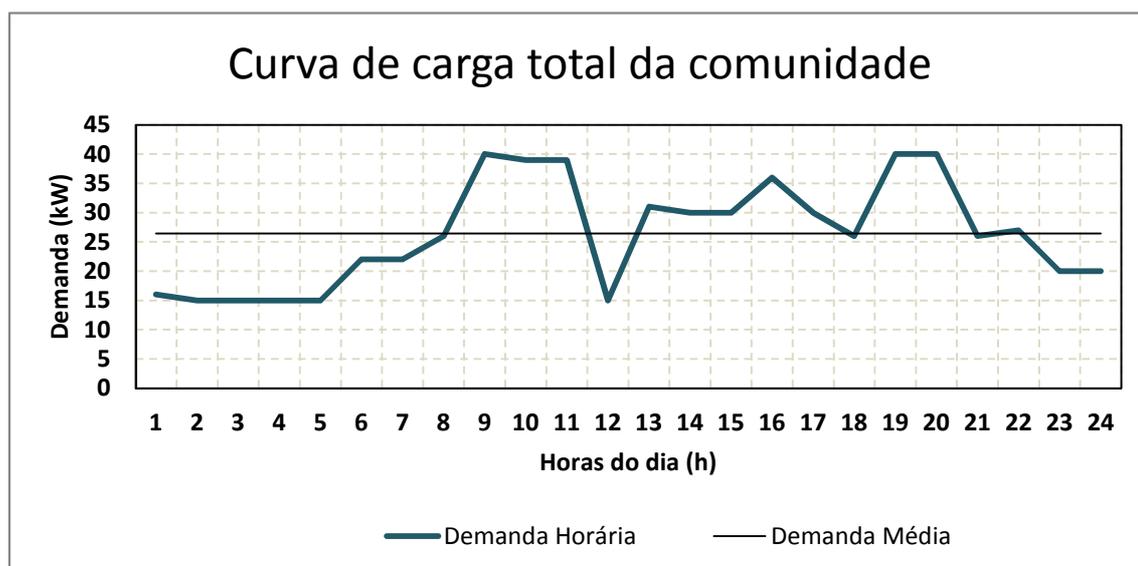


Figura 5. 5. Carga estimada da vila da comunidade. (Pinheiro, 2011)



**Figura 5. 6.** Carga estimada para a fábrica de cabos de vassouras. (Pinheiro, 2011)



**Figura 5. 7.** Curva de carga estimada da vila na comunidade. (Pinheiro, 2011)

### 5.3. SISTEMA PROPOSTO.

Analisando a curva de carga da comunidade tem-se que o máximo valor demandado é próximo aos 40 kWe. Também se pode observar que a comunidade tem uma alta demanda de energia nas horas da tarde e noite, por encima da demanda média, entre as 14 e 22 horas, quando a radiação solar é muito baixa quase nula na maior parte do país porque o sol está se ocultando. Para este caso o sistema Gaseificador/ MCI tem que ser dimensionado para suprir a demanda totalmente, já que dimensionar um sistema de armazenamento capaz de suprir a energia da comunidade por 10 horas seria inviável.

A potência obtida com um MCI operando com gás de biomassa é ao redor de 59 e 65 % da obtida operando o motor com gasolina (Centeno F. , 2010) e 53% da obtida operando o motor com gás natural (Martinez, 2009). Na literatura técnica procurou-se um motor de combustão interna a gás natural com uma potência 50% maior da demanda solicitada com o fim de obter a potência necessária na hora de trabalhar com o gás de biomassa característica da comunidade de Santo Antônio

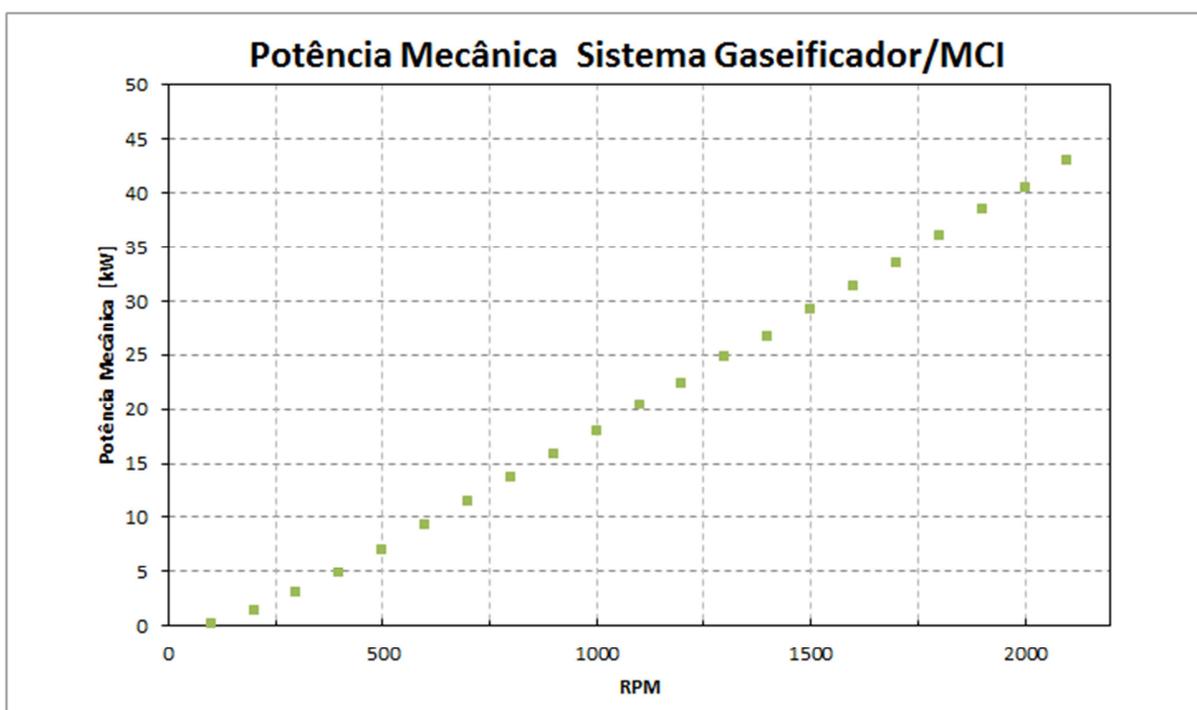
O motor 6BT da CUMMINS® tem uma potência nominal de 80 kW trabalhado a 1500 rpm, os parâmetros do motor podem ser encontrados na tabela 5.2.

**Tabela 5. 2-** Parâmetros do motor.

Descrição	Valor
Diâmetro do cilindro [m]	0,102
Curso do pistão [m]	0,120
Relação de compressão	10.5:1
Número de cilindros	6
Relação Equivalente	0,943
Potência Mecânica (1500 RPM) [kW]	80
A temperatura da mistura inicial [K]	350

(EMAC, 2008)

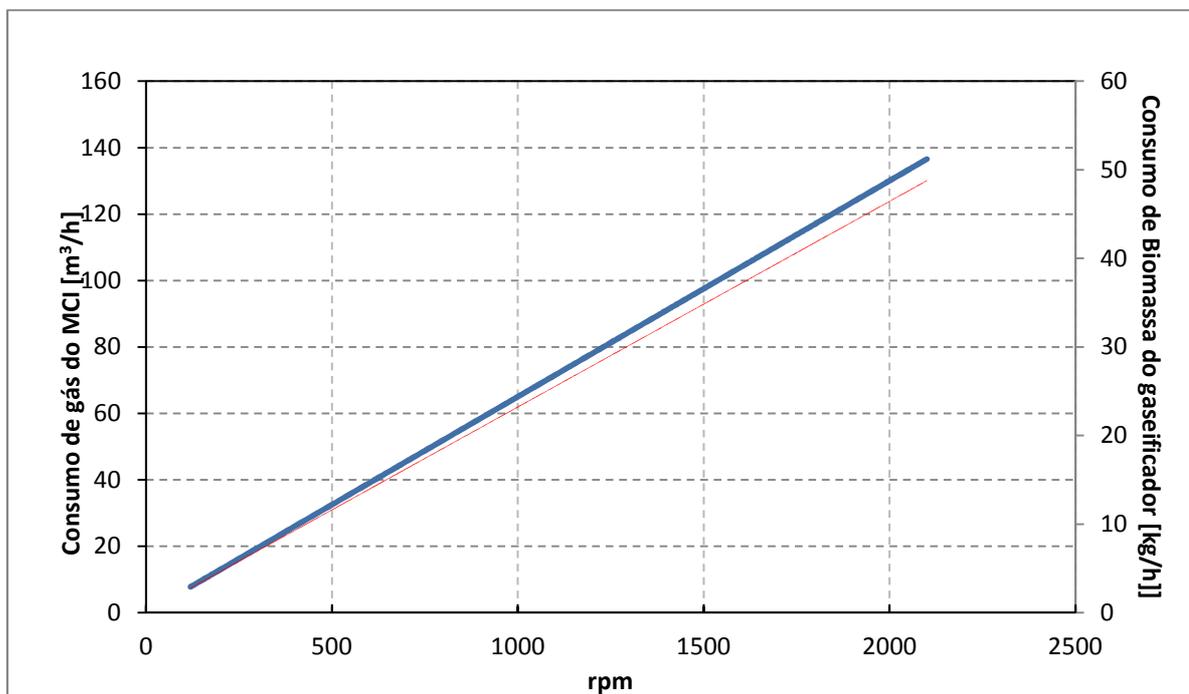
No modelo do gaseificador desenvolvido por Centeno (2010) foram introduzidas as características da biomassa da comunidade de Santo Antônio (Tabela 5.1) e no modelo do MCI, desenvolvido pelo mesmo autor, os parâmetros do motor 6BT da CUMMINS®. Logo o modelo completo Gaseificador/Motor foi executado variando as rpm com finalidade de verificar se o sistema é capaz de fornecer a demanda. A potência mecânica desenvolvida pelo sistema é mostrada na figura 5.8.



**Figura 5. 8.** Potência mecânica Vs. rpm desenvolvida pelo Gaseificador/MCI.

A potência mecânica máxima desenvolvida pelo motor, que ocorre às 2100 rpm, trabalhando com a biomassa do lugar é reduzida quase a metade da nominal como é mostrada na figura 5.8. mais consegue-se suprir a demanda totalmente para qualquer caso possível.

Com o fim de determinar o consumo da biomassa do gaseificador foi determinado o consumo de gás do motor de combustão interna a diferentes RPM. As características do gaseificador modelado por Centeno (2010) são encontradas em Martinez (2009). Martinez (2009) encontrou mediante testes experimentais que este gaseificador apresenta um  $yield^3$  com um comportamento praticamente constante na faixa de 2,5 a 2,7  $Nm^3/kg$ , com este dado foi calculado o consumo de biomassa do gaseificador a diferentes RPM. Na figura 5.9 se mostra os dados de consumos de gás de biomassa pelo MCI e o consumo de biomassa do gaseificador Vs as rpm.

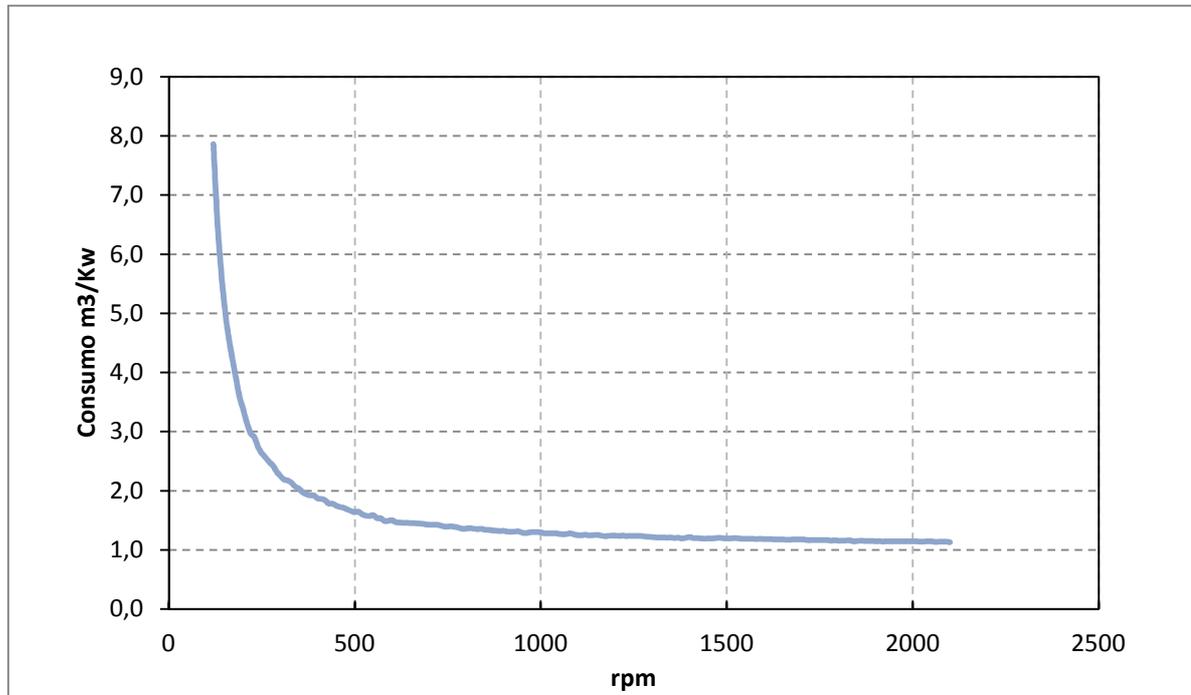


**Figura 5. 9.** Consumos de gás de biomassa pelo MCI e consumo de biomassa do gaseificador Vs as rpm/MCI.

Se o MCI trabalhar a 1800 rpm o tempo todo o consumo de biomassa (rejeitos) fora de 42.02  $kg/h$ .

<sup>3</sup> Yield: é a capacidade de produção de gás por biomassa alimentada no gaseificador e se expressa em  $Nm^3/kg$

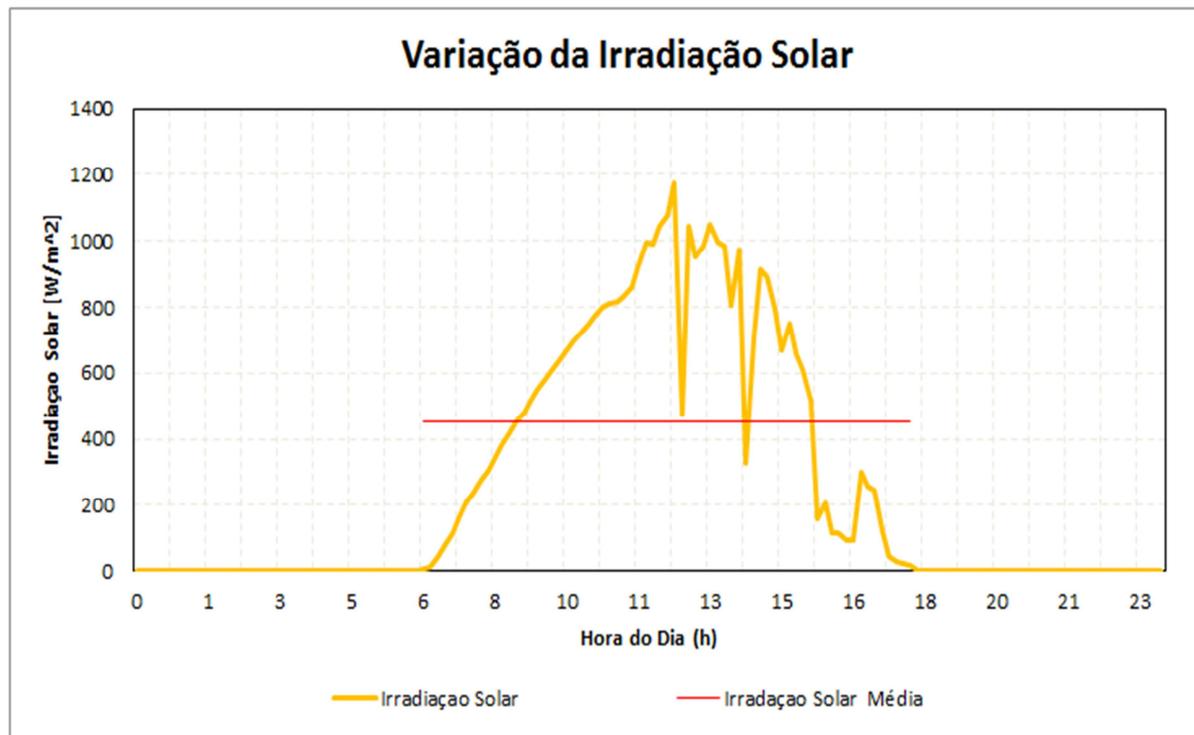
Finalmente na gráfica 5.10 é apresentado o consumo do motor em  $\text{m}^3/\text{kW}$  por hora para diferentes rpm.



**Figura 5. 10.** Consumos Vs RPM do MCI

O consumo ( $\text{m}^3/\text{kW}$ ) por hora é muito maior quando o motor trabalha a umas rpm inferior a 500, depois deste ponto o consumo diminui até chegar a um valor quase constante ( $1,1 \text{ m}^3/\text{kW}$  por hora) a partir das 1500 rpm. O ideal seria que o motor trabalhe nesta faixa entre 1500 e 2100 rpm que corresponde com o ponto de operação nominal e máxima do motor quando é operado com gás natural.

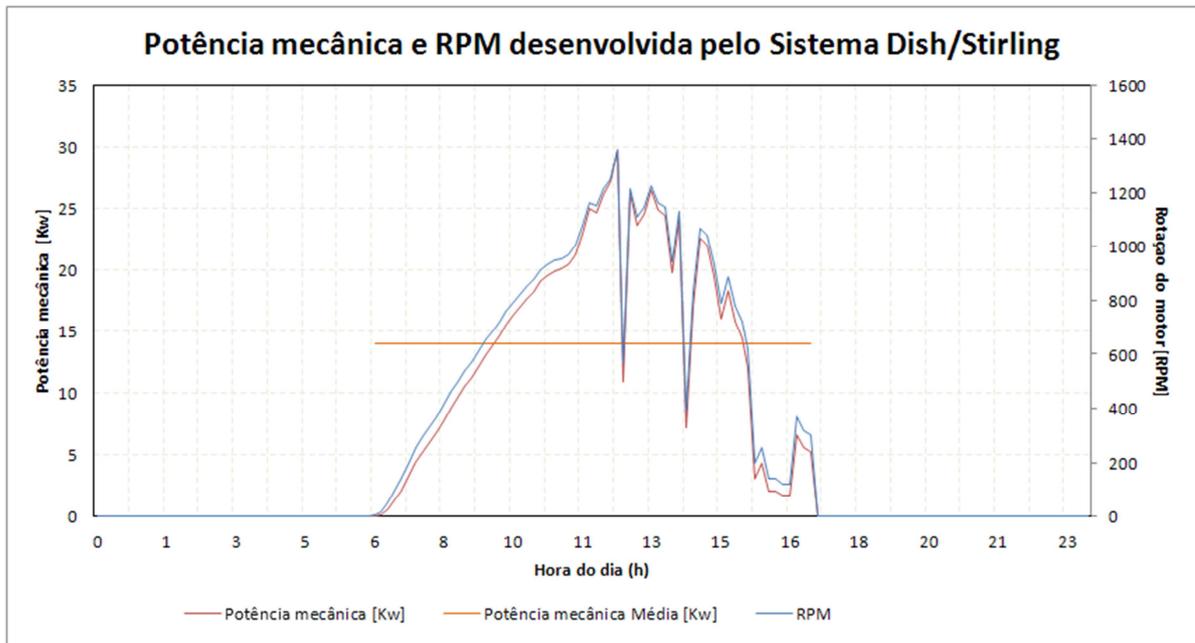
Com o modelo desenvolvido por Mendoza (2012) e tendo em conta a radiação média da comunidades de Santo Antônio foi desenvolvida uma curva da variação da irradiação solar para um dia qualquer do ano. As características das variações da irradiação solar no dia se mostra na figura 5.11. O diâmetro do coletor simulado no modelo do sistema Dish/Stirling utilizado foi 10,57 m.



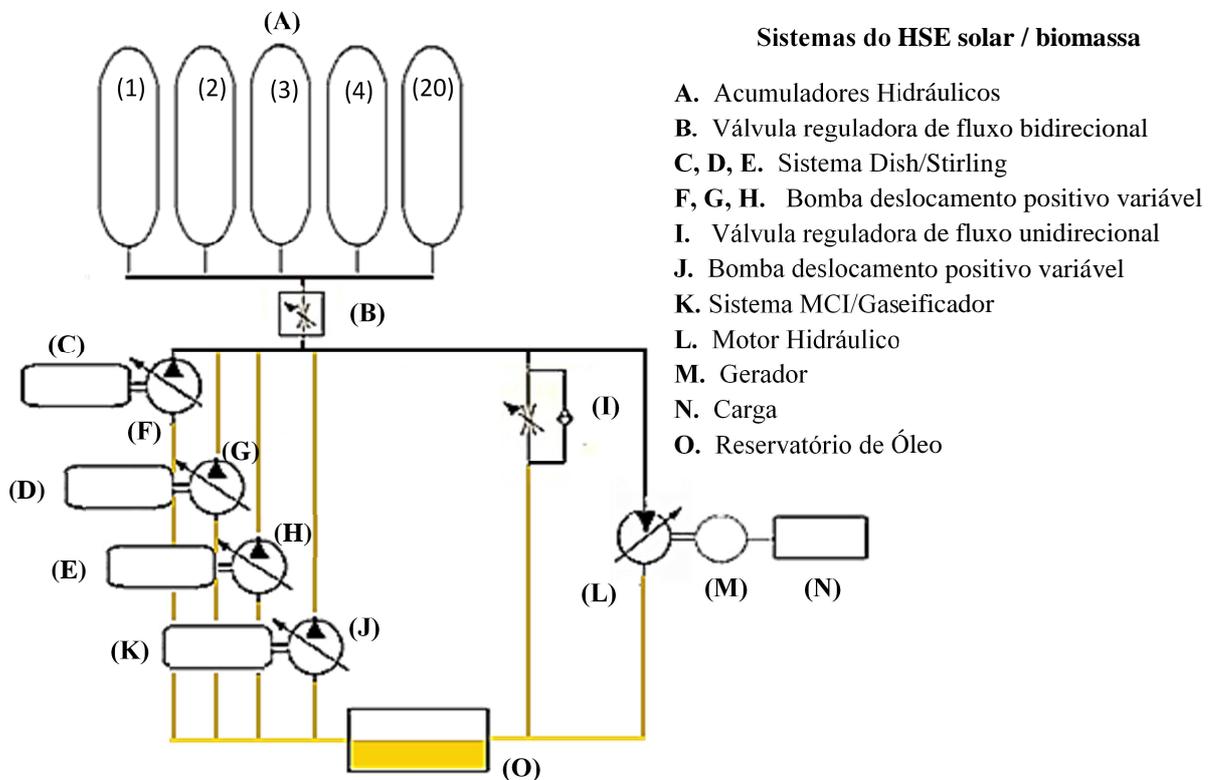
**Figura 5. 11.** Variação da irradiação solar na comunidade

A potência mecânica desenvolvida pelo sistema Dish/Stirling é mostrada na gráfica 5.12. Observe-se que o sistema Dish/Stirling só estará ativo nas horas de disponibilidade de radiação solar, trabalhando a uma potência mecânica média de 13,9 kW. . Com a finalidade de minimizar o uso da Biomassa no sistema é proposta a utilização de 3 sistemas Dish/Stirling das mesmas características, de uma capacidade máxima de 30 kW, conectados a três bombas hidráulicas ligadas em série ao sistema.

O esquema da integração dos sistemas no SHE solar/Biomassa é mostrado na figura 5.13. e a operação é completamente similar á descrita no capítulo 4 seção 4.1.



**Figura 5. 12.** Potência mecânica e RPM desenvolvida pelo Sistema Dish/Stirling.



**Figura 5. 13.** Esquema funcional do SHE solar / biomassa

O sistema apresentado na figura 5.13 consta de 20 acumuladores hidráulicos de 200 l, trabalhando a uma pressão máxima de 330 bar. A estrutura geral do sistema híbrido solar/biomassa na comunidade de Santo Antônio é similar a estrutura anteriormente descrita no capítulo 4. As saídas mecânicas dos motores de cada um dos sistemas, Dish/ Stirling e o Gaseificador/ MCI, são conectados á bombas volumétricas de deslocamento variável. As bombas e o sistema de armazenamento estão conectados em paralelo e suas descargas vão diretamente a linha de sucção de um motor hidráulico que se encontra ligado a um gerador elétrico. A linha de sucção das bombas e descarga do motor hidráulico se encontram conectadas á um reservatório com a quantidade de óleo requerida para suprir as necessidades do sistema. Além disso, a descarga da bomba do sistema Dish/Stirling esta conectada também aos acumuladores e ao reservatório.

## 5.4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.

A continuação mostram-se os resultados das simulações. Na figura 5.14, 5.15, 5.16 é apresentado a demanda e as energias geradas por cada um dos sistemas.

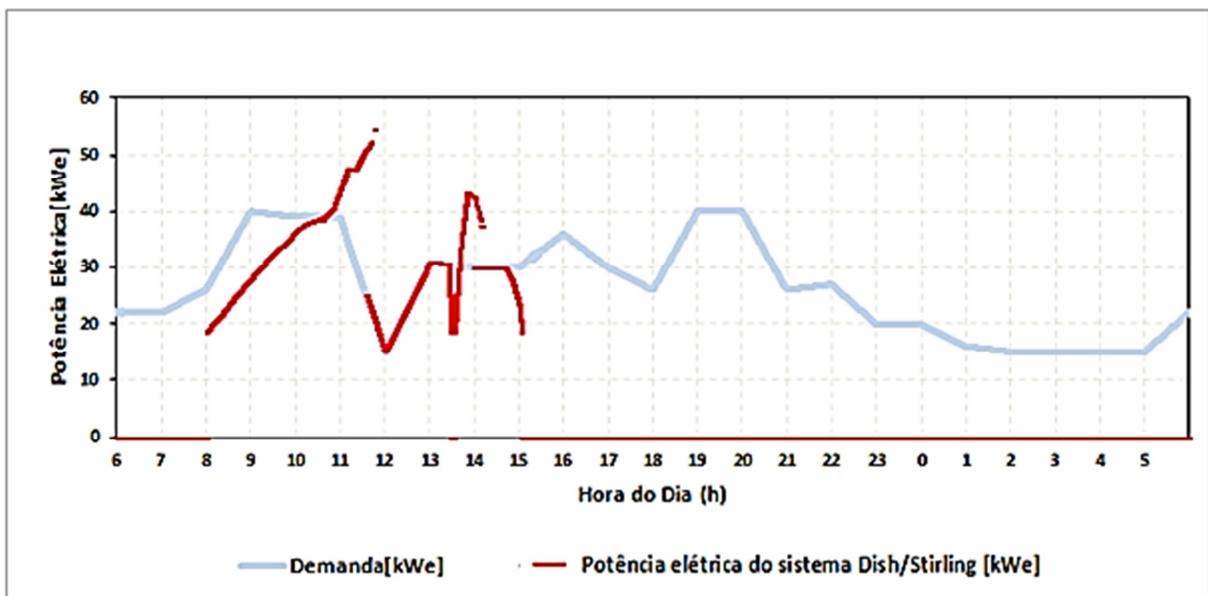
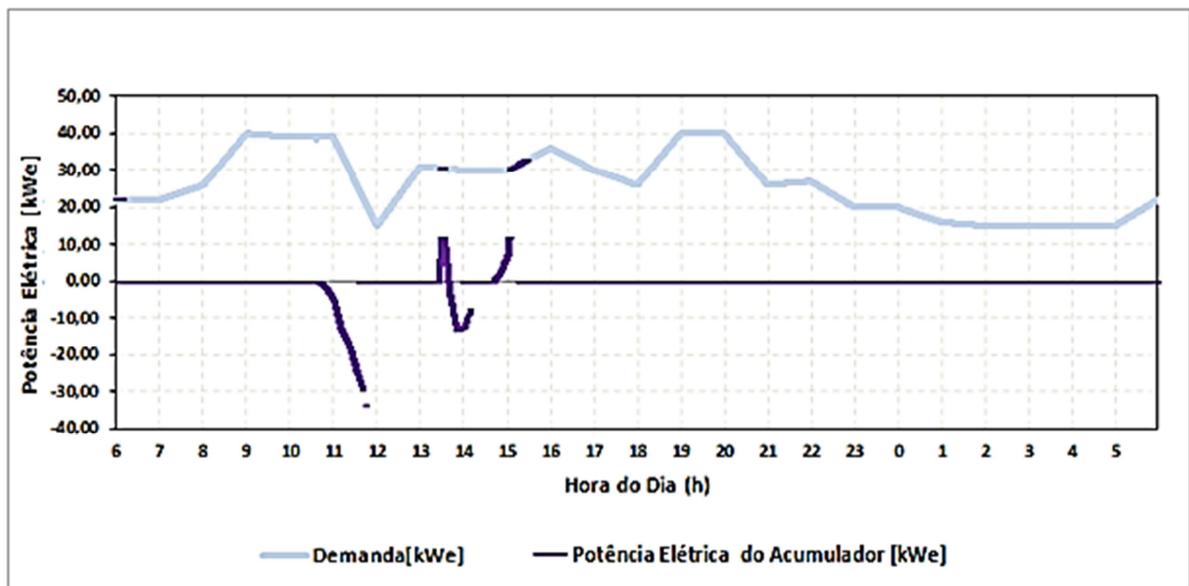


Figura 5. 14. Potência elétrica desenvolvida pelo sistema Dish/Stirling Vs. Demanda.

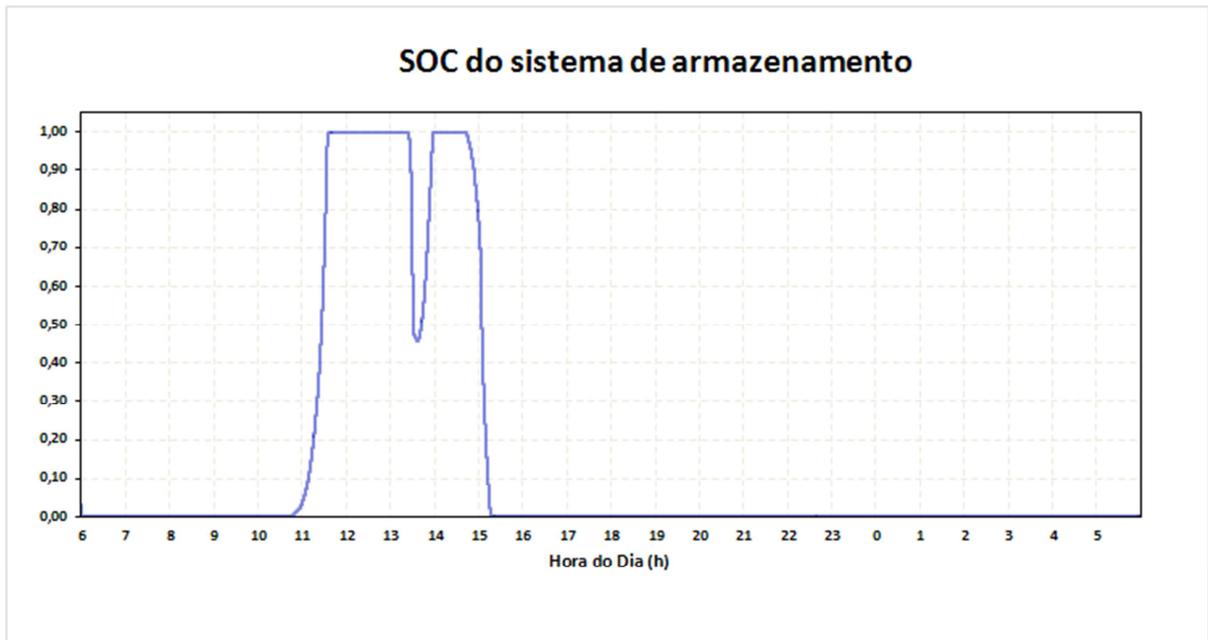
Na figura 5.14 se encontra a potência elétrica desenvolvida pelo sistema Dish/Stirling quando a potência elétrica gerada por este sistema é a maior que a demanda (entre as 10:37 e 11:45 horas, e logo entre as 13:38 e 14:09) os acumuladores são carregados (figura 5.15 entre as 10:37 e 11:45 horas, e logo entre as 13:38 e 14:09) a o mesmo tempo que a demanda é suprida. Quando a radiação solar cai bruscamente (figura 5.11 entre as 13:25 e 13:37 horas) e a potência elétrica gerada por este sistema Dish/Stirling não é suficiente para suprir a demanda (figura 5.14 entre 13:25 e 13:37 horas) o sistema de armazenamento gera a potência elétrica faltante.



**Figura 5. 15. Potência elétrica desenvolvida pelo sistema de armazenamento Vs. Demanda.**

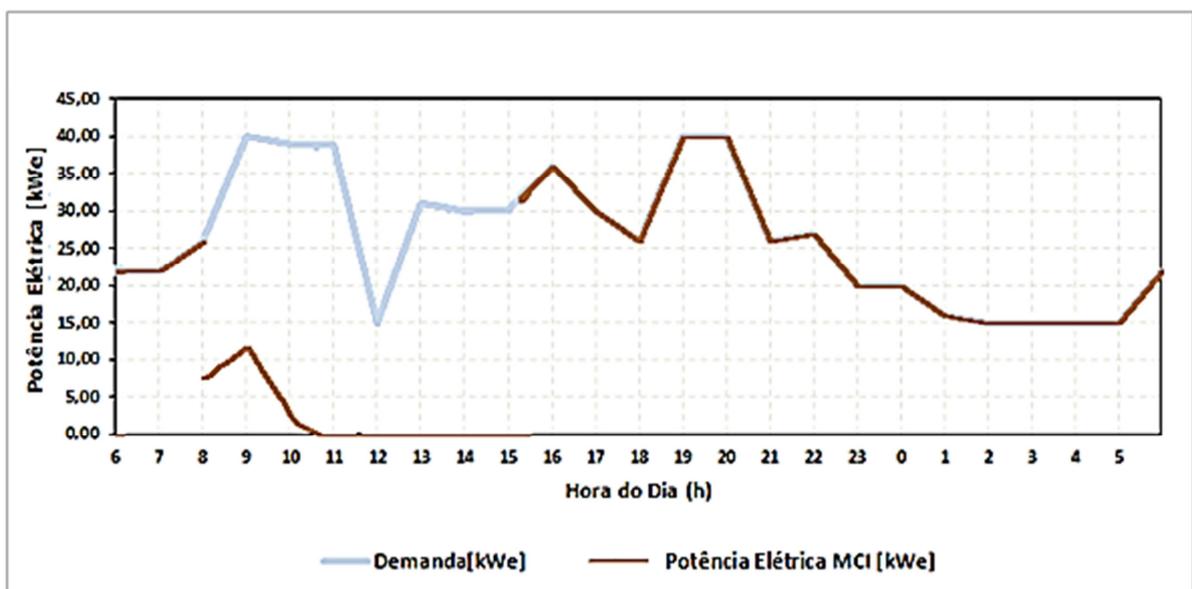
Na figura 5.15 se mostra a potência elétrica desenvolvida pela bateria de acumuladores, quando energia é negativa indica os acumuladores estão sendo carregados pelo sistema Dish/Stirling é positivo quando os acumuladores estão fornecendo parcial o totalmente a demanda.

Quando tem ausência parcial de sol e o sistema de armazenamento encontrasse carregado (SOC>0), os acumuladores entram em funcionamento em modo de descarga para fornecer a demanda de energia (figura 5.16 entre as 13:25 e 13:37 horas) .



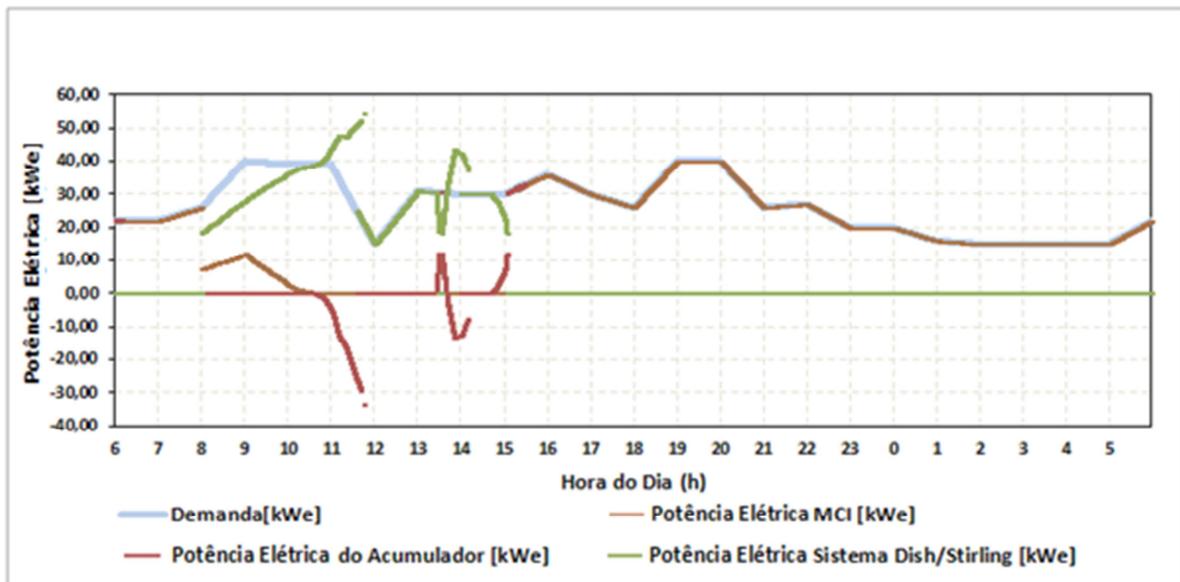
**Figura 5. 16. Variação do SOC do Sistema de armazenamento.**

Se não é possível fornecer totalmente a carga com o sistema Dish/Stirling e nem pelo sistema de armazenamento o sistema gasificado/MCI entra em funcionamento. Como pode é mostrado na figura 5.17.



**Figura 5. 17. Potência elétrica desenvolvida pelo Gaseificador/MCI Vs. Demanda.**

Na figura 5.18 é apresentado conjuntamente todos as potências elétricas desenvolvidas pelos sistemas que compõem o sistema híbrido solar biomassa proposto na comunidade de Santo Antônio. Pôde-se observa que o sistema Gaseificador/MCI nunca trabalha conjuntamente com o sistema de armazenamento. O carregamento do sistema de armazenamento só ocorre no momento quando existe uma irradiação solar alta (gráfica 5.11) e ademais o SOC é inferior a 1 (gráfica 5.16). O sistema de armazenamento é totalmente capaz de fornecer a demanda sozinho (entre as 15 e 16 horas) e/ou conjuntamente com o sistema Dish/Stirling quando a irradiação solar cai e o SOC é maior que 0 (entre as 13 e 14 horas, e entre as 15 e 16 horas). Entre as 8 e 10 horas o sistema Dish/Stirling não é capaz de suprir a demanda totalmente, e o sistema de armazenamento encontrasse descarregado (figura 5.16), é por isso que o sistema Gaseificador/MCI é ligado ao sistema para suprir a demanda conjuntamente com o sistema Dish/Stirling.



**Figura 5. 18. Potência elétrica desenvolvida pelo Sistema híbrido solar/biomassa da comunidade Santo Antônio.**

Finalmente na tabela 5.3 mostra-se o resumo geral do sistema, e as horas de funcionamento de cada um dos sistemas.

**Tabela 5. 3- Dados do funcionamento do sistema SHSB na comunidade de Santo Antônio.**

<b>Atividade</b>	<b>Tempo [Horas]</b>
Funcionamento do Sistema Dish/Stirling	7:00
Funcionamento do Sistema de Armazenamento	2:22
Funcionamento do Sistema Gaseificador/MCI	14:38
Tempo de carga dos acumuladores	1:33
Tempo de descarrega dos acumuladores	0:49

O sistema de armazenamento constituído por 20 acumuladores trabalhado a 330 bar da ao sistema uma independência total de 49 minutos

## Capítulo 6.

# CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

## 6.1. CONCLUSÕES

- A energia que pode ser armazenada nos acumuladores hidráulicos tem muita dependência da Pressão máxima admissível ( $P_2$ ), e de sua capacidade nominal ( $V_0$ ). Entre maior seja cada uma de elas, mais energia pode ser armazenada em forma de pressão no interior do acumulador. Atualmente encontram-se comercialmente acumuladores de até 200 l trabalhando a uma pressão máxima de até 350 bar.
- A taxa de carga e descarga tem uma influencia muito alta na energia que pode ser armazenada e recuperada nos acumuladores. Entre maiores sejam estes fluxos mais energia pode ser armazenada e logo recuperada dos acumuladores. Recomenda-se trabalhar com vazões de descarga superiores a 15 l/min, inferiores a este valor a densidade de energia é inferior a 5 kJ/l.

- Embora os acumuladores hidráulicos não tenham problemas de auto descarga como outros sistemas de armazenamento, eles apresentam perdas por transferência de calor por convecção com o ambiente que diminuem significativamente a quantidade de energia que pode ser recuperada logo de armazenada.
- Nas configurações de sistema híbrido com armazenamento hidráulico, este último funciona como um acumulador e como uma fonte de energia de emergência (back-up), graças a sua rápida resposta, quando a fonte renovável intermitente falhe, brindando segurança ao sistema.
- A implementação de um SHSB na comunidade de Santo Antônio poderia reduzir o consumo da biomassa em um 25% em comparação em um sistema baseado só em um sistema Gaseificador/MCI.
- O estudo da comunidade de Santo Antônio comprova que os HSE baseados só em fontes renováveis podem ser, em princípio, uma solução para o problema de fornecimento de energia das regiões isoladas, já que as fontes complementam para superar suas desvantagens individuais.

## 6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Devido ao grande número de variáveis envolvidas tanto no sistema híbrido quanto nos sistemas que o compõem, seria recomendável a utilização de técnicas avançadas de otimização numérica na análise e projeto dos mesmos para obter a configuração ótima .
- Acompanhar as predições do modelo do acumulador hidráulico com experimentos. Inevitavelmente nestes experimentos deveria contar-se com um banco de testes que possa medir todas as avariáveis relacionadas: Pressão, temperatura, volumem, fluxos, constante de tempo térmica, etc. Além disso avaliar as perdas por transferência de calor.
- É recomendável para melhora do modelo do sistema híbrido solar/biomassa com um sistema de armazenamento hidráulico trocar a estratégia de carga e descarga dos acumuladores, não carregando e descarregando todos ao mesmo tempo ( distribuição igual da vazão) porque isto leva a fluxos pequenos. Uma estratégia poder ser carregar ou descarregar um acumulador de cada vez até atingir todos os acumuladores.
- Uma melhora para o modelo do sistema híbrido solar/biomassa com armazenamento hidráulico é desenvolver um modelo dinâmico da bomba hidráulica de deslocamento positivo variável para obter sua eficiência para cada caso específico (deslocamento, pressão, rpm).
- Finalmente como trabalho futuro pode-se calcular o custo do sistema híbrido e o custo do kW/h gerado pelo sistema com o fim de fazer uma comparação com outros sistemas de geração de energia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, E., Ameli, H., Strunz, K., & Duc, N. (2012). IEEE PES International Conference and Exhibition on Optimized operation, planning, and frequency control of hybrid generation-storage systems in isolated networks., (pp. 1,8, 14-17).
- Abdel-Salam, M., Ahmed, A., Ziedan, H., Sayed, K., Amery, M., & Swify, M. (2011). A solar-wind hybrid power system for irrigation in Toshka area. *IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*, (pp. 1-6).
- Altoé, L., Oliveira Filho, D., & Carlo, J. C. (2012). Análise energética de sistemas solares térmicos para diferentes demandas de água em uma residência unifamiliar. *Ambiente Construído*, 12(3).
- Andrade, R. (2007). *Geração de calor e potência a partir da gaseificação de biomassa: uma abordagem teórica e experimental*. Tese de doutorado.
- ANEEL. (2008). Atlas de Energia Elétrica do Brasil. In: A. N. ELÉTRICA. Brasília.
- Ashari, M., & Nayar, C. V. (1999). An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)–diesel–battery hybrid power system. *Solar Energy*, 66, 1-9.

- Bancha, K., & Somchai, W. (2005). Optimum absorber temperature of a once-reflecting full conical concentrator of a low temperature differential Stirling engine. *Renewable Energy*, 30, 1671–1687.
- Bernal-Agustín, J. L., & Dufo-López, R. (2009). Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2111–2118.
- Bernal-Agustín, J. L., & Dufo-López, R. (2009). Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2111-2118.
- Bhikabhai, Y. (2005). *Hybrid Power Systems And Their Potential In The Pacific Islands*. Fiji: SOPAC, Secretariat of the Pacific Community.
- Bolund, B., Bernhoff, H., & Leijon, M. (2007). Flywheel Energy and Power Storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 235-258.
- Borges Neto, M. R., Carvalho, P. C., Carioca, J. O., & Canafístula, F. (2010). Biogas/photovoltaic hybrid power system for decentralized energy supply of rural areas. *Energy Policy*, 38, 4497-4506.
- Bosch Rexroth. (2009). *Bladder-type accumulator RE 50170/01.09*. Acesso em 10 de Maio de 2013, disponível em [http://www.airlinehyd.com/Images/Hydraulic/RexrothBosch/PDF/Industrial\\_Hydraulics\\_0910/IndustrialProducts/Accumulators/re50170\\_2009-01.pdf](http://www.airlinehyd.com/Images/Hydraulic/RexrothBosch/PDF/Industrial_Hydraulics_0910/IndustrialProducts/Accumulators/re50170_2009-01.pdf)
- Bradbury, K. (2010). *Energy Storage Technology Review*. Duke University.
- Castellano, R. N. (2012). *Alternative Energy Technologies*. Archives contemporaines.
- Çengel, Y. ..., & Boles, M. (2006). *Termodinâmica* (5 ed.). McGraw-Hill.
- Centeno, F. (2010). *Avaliação do desempenho de um sistema integrado motor ciclo/gaseificador co-corrente utilizando modelagem matemática*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

- Centeno, F. O., Mahkamov, K., Silva, E. E., Andrade, R. V., & Jaen, R. L. (December de 2013). Prediction by mathematical modeling of the behavior of an internal combustion engine to be fed ,with gas from biomass, in comparison to the same engine fueled with gasoline or methane. *Renewable Energy*, 60, 427-432.
- Centeno, F., Mahkamov, K., Silva Lora, E. E., & Andrade, R. V. (2012). Theoretical and experimental investigations of a downdraft biomass gasifier-spark ignition engine power system. *Renewable Energy*, 37, 97-108.
- Change, C. (2001). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Tenico, Cambridge University Press.
- Chen, C. K., & Vu, T. V. (2011). Regenerative braking study for a hydraulic hybrid vehicle. *9th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)* (pp. 413-418). IEEE.
- Chen, H., Ngoc Cong, T., Yang, W., & Tan, C. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19, 291–312.
- Chen, H., Zhang, X., Liu, J., & Tan, C. (2013). Compressed Air Energy Storage. In: D. A. (Ed.), *Energy Storage - Technologies and Applications* (pp. 101-112). InTech, Disponivel em <http://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/compressed-air-energy-storage>.
- Chu, S., & Majumdar, A. (2012). Opportunities and challenges for a sustainable energy future. 488, 294-303.
- CIEMAT. (2009). Plataforma Solar de Almería. Centro de investigaciones Energeticas, Medioambientales y Tecnologicas . Almería: Ministerio de Ciencia e Innovación Gobierno de España.
- Çinar, C., Aksoy, F., & Erol, D. (2012). The effect of displacer material on the performance of a low temperature differential Stirling engine. *International Journal of Energy Research*, 36, 911–917.

- Connolly, D. (2009). A Review of Energy Storage Technologies. 6-13. Limerick: University of Limerick.
- Coppez, G., Chowdhury, S., & Chowdhury, S. (2010). Review of battery storage optimisation in Distributed Generation. *010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India*, (pp. 1-6).
- CRESESB. (2013). *SunData*. Acesso em 10 de 5 de 2013, disponível em CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito: <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>.
- da Silva Barros, R. (2002). *Implantação, Operação e Instrumentação de Sistema Híbrido Eólico/Diesel / no Território de Fernando de Noronha*. Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- da Silva, N. F., Rosa, L. P., & Araújo, M. R. (2005). The utilization of wind energy in the Brazilian electric sector's expansion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9, 289-309.
- de S. Ribeiro, L., Saavedra, O., Lima, S., & de Matos, J. (Jan de 2011). Isolated Micro-Grids with Renewable Hybrid Generation: The Case of Lençóis Island. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 2, 1-11.
- Deshmukha, M., & Deshmukh, S. (2008). Modeling of hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 235–249.
- Divya, K., & Østergaard, J. (2011). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Iectric Power Systems Research*, 79, 511-520.
- Ekren, O., Ekren, B. Y., & Ozerdem, B. (2009). Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage—a case study. *Applied Energy*(86), 1043-1054.
- EMAC. (2008). *EMAC*. (EMAC INTERNATIONAL) Acesso em 7 de Julho de 2013, disponível em <http://www.sino-cummins.com/product/cummins-scg-80-gas-engine-for-generator-set.htm>

- Energy Information Administration. (2008). *International Energy Outlook*.
- EPE. (2011). *Balanço energético brasileiro*. Fonte: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2011.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf)
- Erdinc, O., & Uzunoglu, M. (2012). Optimum design of hybrid renewable energy systems: overview of different approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*.
- Erkkilä, M., Bauer, F., Feld, D., & Oy, H. (2013). Universal Energy Storage and Recovery System—A Novel Approach for Hydraulic Hybrid. *SICFP2013 The 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Linköping.
- ESA, E. S. (25 de Abril de 2013).
- Fagundes Barreto, E., Tavares Pinho, J., Lúcio Thiago, G., Rndeiro, G., Nogueira, M., & de Araujo Gonzalez, W. (2008). *Tecnologias de energias renováveis : sistemas híbridos, pequenos aproveitamentos hidroelétricos, combustão e gasificação de biomassa sólida, biodiesel e óleo vegetal in natura*. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- Farret, F. A., & Godoy, M. (2006). *Integration of Alternative Sources of Energy*. John Wiley & Sons.
- Filipi, Z., & Kim, Y. J. (2010). Hydraulic hybrid propulsion for heavy vehicles: Combining the simulation and engine-in-the-loop techniques to maximize the fuel economy and emission benefits. *Oil & Gas Science and Technology—Revue de l'Institut Français du Pétrole, 65*, 155-178.
- Gheith, R., Aloui, F., & Ben Nasrallah, S. (2012). Optimization of Stirling engine performance based on an experimental design approach. *International Journal of Energy Research*.
- Greenmotorsblog. (2010). *Hydrostatischer Hybrid – Eigentlich ein alter Hut*. Acesso em 10 de Maio de 2013, disponível em Greenmotorsblog.
- Gupta, A., Saini, R. P., & Sharma, M. (2007). Design of an Optimal Hybrid Energy System Model for Remote Rural Area Power Generation. *International Conference on Electrical Engineering*, (pp. 1,6, 11-12 ).

- Gupta, A., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2010). Steady-state modelling of hybrid energy system for off grid electrification of cluster of villages. *Renewable Energy*, 35, 520-535.
- Gupta, A., Saini, R. P., & Sharma, M. P. (2011). Modelling of hybrid energy system—Part II: Combined dispatch strategies and solution algorithm. *Renewable Energy*, 36, 466-473.
- Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1513-1522.
- Hatami, H. (2013). *Hydraulic Formulary*. Rexroth.
- Ho, T. H., & Ahn, K. K. (2012). Design and control of a closed-loop hydraulic energy-regenerative system. *Automation in Construction*, 22, 444-458.
- Ho, T. H., & Ahn, K. K. (2012). Design and control of a closed-loop hydraulic energy-regenerative system. *Automation in Construction*, 22, 444-458.
- Hui, S. (2010). Multi-objective optimization for hydraulic hybrid vehicle based on adaptive simulated annealing genetic algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23, 27-33.
- Hui, S., Lifu, Y., & Junqing, J. (2010). Hydraulic/electric synergy system (HESS) design for heavy hybrid vehicles. *Energy*, 32, 5328-5335.
- HYDAC. (2013). *HYDAC* . (HYDAC) Acesso em 15 de Junho de 2013, disponível em Bladder accumulators: <http://www.hydac.com/de-en/products/hydraulic-accumulators/bladder-accumulators/standardhigh-pressure-bladder-acc/show/Overview/index.html>
- Ibrahim, H., Dimitrova, M., Dutil, Y., Rouse, D., Ilinca, A., & Perron, J. (2012). Wind-Diesel hybrid system: energy storage system selection method. *InnoStock 2012: The 12th International Conference on Energy Storage*, (pp. 1-10).

- Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2007). Comparison and Analysis of Different Energy Storage Techniques Based on their Performance Index. *Electrical Power Conference*, (pp. 393-398.). Canada.
- Ibrahim, H., Ilinca, A., & Perron, J. (2008). Energy storage systems: Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1221–1250.
- IEA. (2012). *Economia verde*. Acesso em julho de 2012, disponível em International Energy Agency: <http://www.iea.org/topics/bioenergy/>
- IEA. (13 de Junho de 2013). *International Energy Agency*. Fonte: <http://www.worldenergyoutlook.org/resources/energydevelopment/>
- Infield, D. G., & al., e. (1990). Wind Diesel System Modeling and Design. *Proceedings of European Community Wind Energy Conference*.
- IRENA, International Renewable Energy Agency. (2013). *Thermal Energy Storage - Technology Brief*.
- Jackey, R., & Smith, P. (2005). Physical system model of a hydraulic energy storage device for hybrid powertrain applications. *SAE 2005 World Congress & Exhibition*. Michigan.
- Juhala, J., & Pietola, M. (2011). Hydraulic Accumulator as Energy Storage. *ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 6, pp. 369-377.
- Kim, Y. J. (2008). *Integrated modeling and hardware-in-the-loop study for systematic evaluation of hydraulic hybrid propulsion options*. The University of Michigan.
- Koumoutsos, N., & Lygerou, B. (1991). *Heat Transfer Fundamentals*. NTU Athens Press.
- Li, P. Y., Van de Ven, J. D., & Sancken, C. (2007). Open accumulator concept for compact fluid power energy storage. *Proceedings of the ASME international mechanical engineering congress*, (p. 42580). Seattle.
- Lund, H. (2009). *Renewable energy systems: the choice and modeling of 100% renewable solutions*. Academic Press.

- Manwell, J. (2004). Hybrid Energy Systems. *Encyclopedia of Energy*, 215-229.
- Manwell, J. F., Rogers, A., Hayman, G., Avelar, C. T., McGowan, J. G., Abdulwahid, U., et al. (2006). HYBRID2-A hybrid system simulation model, Theory manual. National Renewable Energy Laboratory.
- Martinez, J. D. (2009). *Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Co-corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão Interna*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Engenharia Mecânica.
- Mendoza, L. (2012). *Modelagem de Sistemas de Geração de Eletricidade a partir de energia solar utilizando pratos parabólicos e motores Stirling (Dish/Stirling)*. Itajuba.
- Merkle, D., Schrader, B., & Thomes, M. (2003). *Hydraulics Basic Level: Textbook TP 501* (11 ed.). Denkendorf, Germany: Festo Didactic GmbH & Co.
- Midgley, W., & Cebon, D. (2011). Specifying a hydraulic regenerative braking system for an articulated urban delivery vehicle. *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (pp. 1-6). IEEE.
- Minav, T. A., Virtanen, A., Laurila, L., & Pyrhönen, J. (2012). Storage of energy recovered from an industrial forklift. 506-515.
- Ming, Z., Kun, Z., & Daoxin, L. (2013). Overall review of pumped-hydro energy storage in China: Status quo, operation mechanism and policy barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35–43.
- Molina, G. (2010). Dynamic Modelling and Control Design of Advanced Energy Storage for Power System Applications. In: A. V. Brito, *Dynamic Modelling* (pp. 49-93). InTech.
- Mufron, B., de Bretagne, E., & ENS, C.-A. d. (2003). Stocker l'électricité: Oui, c'est indispensable, et c'est possible! pourquoi, où, comment.
- Nacfaire, H. (2004). *Wind-diesel and wind autonomous energy systems* (Vol. 11931). Taylor & Francis.

- Naish, C., McCubbin, I., Oliver, E., & Harfoot, M. (2008). *Outlook of energy storage technologies*. Brussels: European Parliament's committee on Industry, Research and Energy (ITRE).
- National Renewable Energy Laboratory. (2005). Detailed Evaluation of Renewable Energy Power System Operation: A Summary of the European Union Hybrid Power System Component Benchmarking Project. *Conference Paper NREL/CP-500-38209*.
- Nayar, C. V., Phillips, S. J., James, W. L., Pryor, T. L., & Remmer, D. (1993). Novel wind/diesel/battery hybrid energy system. *Solar energy*, *51*, 65-78.
- Nelson, V. C., Foster, R., Clark, N., & Raubenheimer, D. (2002). Wind hybrid systems technology characterization. *NRE–National Renewable Energy Laboratory*, 1-50.
- Nema, P., Nema, R. K., & Rangnekar, S. (2009). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*, 2096-2103.
- Nema, P., Nema, R., & Rangnekar, S. (2008). A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*, 2096–2103.
- Nixon, J., Dey, P., & Davies, P. (October de 2012). The feasibility of hybrid solar-biomass power plants in India. *Energy*, *46*, 541-554.
- Nixon, J., Dey, P., & Davies, P. (October de 2012). The feasibility of hybrid solar-biomass power plants in India. *Energy*, *46*, 541–554.
- Pavlović, T. M., Radonjić, I. S., Milosavljević, D. D., & Pantić, L. S. (2012). A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(16), 3891-3902.
- Pérez-Navarro, A., Alfonso, D., Álvarez, C., Ibáñez, F., & Segura, I. (2010). Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation. *Renewable Energy*, *35*, 1436-1443.
- Pinheiro, G. (2011). *Estudo da inserção de usinas de geração a biomassa de resíduos no sistema elétrico do estado do Para.* . Universidade Federal do Pará.

- Pinheiro, G., Rendeiro, G., Pinho, J., & Macedo, E. (2012). Sustainable management model for rural electrification: Case study based on biomass solid waste considering the Brazilian regulation policy. *Renewable Energy*, 379-386.
- Pourmovahed, A., & Otis, D. R. (1990). An experimental thermal time-constant correlation for hydraulic accumulators. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 112, pp. 116-121.
- Pourmovahed, A., Beachl, N., & Fronczak, F. (1992 a). Modeling of a hydraulic energy regeneration system. Part I: Analytical treatment. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 114(1), 155-159.
- Prabodh , B., & Vaishalee , D. (June de 2012). Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2926-2939.
- Puddu, P., & Paderi, M. (2013). Hydro-pneumatic accumulators for vehicles kinetic energy storage: Influence of gas compressibility and thermal losses on storage capability. *Energy*, 1-10.
- Qian, K., Olanki, P., Mallela, V., Allan, M., & Chengke , Z. (2009). A hybrid power system using wind and diesel generator: A case study at Masirah Island in Oman. *International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*.
- Rabie, M. G. (2009). *Fluid power engineering*. New York: McGraw-Hill.
- Rei, P., Fonseca, J., Duic, N., & Carvalho, M. (2002). Integration of renewable energy sources and hydrogen storage in the Azores Archipelago. *Proceedings of the International Conference on New and Renewable Technologies for Sustainable Development, Ponta Delgada, Azores*, (p. 24).
- REN21. (2011). Acesso em Fevereiro de 2012, disponível em Renewable Energy Police Networks: [http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21\\_GSR2011.pdf](http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf)

- Setiawan, A. A., Zhao, Y., & Nayar, C. V. (2009). Design, economic analysis and environmental considerations of mini-grid hybrid power system with reverse osmosis desalination plant for remote areas. *Renewable Energy*, 34, 374-383.
- Slack, G., & Musgrove, P. (1986). A wind-diesel system with hydraulic accumulator energy buffer. *Proc. European Wind Energy Conference (EWEC)*. Roma.
- Slack, G., & Musgrove, P. (1986). Long term performance modelling of a wind/diesel system with hydraulic accumulator storage. *Proc. Eighth BWEA Wind Energy Conference*.
- SOCOMECH, I. P. (2 de Fevereiro de 2013). FLYWHEEL.
- Stine, W. B., & Diver, R. B. (1994). *A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology*. California: Sandia National Laboratories.
- Stroganov, A., & Sheshin, L. (2011). Improvement of Heat-Regenerative Hydraulic accumulators. *Ventil*, 17, 322-332.
- Swierczynski, M., Teodorescu, R., Rasmussen, C. N., Rodriguez, P., & Vikelgaard, H. (2010). Overview of the energy storage systems for wind power integration enhancement. *2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 3749-3756.
- Tavares Pinho, J., & Fagundes Barreto, E. (2008). *Sistemas Híbridos. Soluções Energéticas para a Amazônia*. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- Tavares, F. T. (2011). *Thermally Boosted Concept for Improved Energy Storage Capacity of a Hydro-Pneumatic Accumulator*. Doctoral dissertation, University of Michigan.
- Tiago F, T. (2008). *Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos*. Ministério de Minas e Energia.
- Vick, B., & Byron, N. (2012). "Analysis of off grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems.". *Solar Energy*, 86, 1197-1207.

- Vick, B., Clark, R., Ling, J., & Ling, S. (2003). Remote Solar, Wind, and Hybrid Solar/Wind Energy Systems for Purifying Water. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125, 107-111.
- Vickers. (2000). *Manual de Hidráulica Industrial*. Sperry Rand.
- Voropoulos, K., Mathioulakis, E., & Belessiotis, V. (2004). A hybrid solar desalination and water heating system. *Desalination*, 164(2), 189-195.
- Wichert, B. (1997). PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation—A review of current practice and future developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1, 209-228.
- Xiao, L., Wu, S. Y., & Li, Y. R. (2012). Thermal-Electric Conversion Efficiency of the Dish/AMTEC Solar Thermal Power System in Wind Condition. *Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, (pp. 972-974).
- Zhang, C., Liu, X., Xie, F., & Shi, Q. (2011). Control system modeling and simulation of parallel hydraulic hybrid heavy vehicle. *International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)* (pp. pp. 743-746). IEEE.