

# Modelagem e Controle de um Sistema de Dessalinização por Osmose Inversa Utilizando Redes de Petri

Félix Rodrigues Neto

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Antonio Marcus Nogueira Lima, Dr.

Orientador

Kepler Borges França, Ph.D.

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Félix Rodrigues Neto, Dezembro de 2005

# Modelagem e Controle de um Sistema de Dessalinização por Osmose Inversa Utilizando Redes de Petri

Félix Rodrigues Neto

*Dissertação de Mestrado apresentada em Dezembro de 2005*

Antonio Marcus Nogueira Lima, Dr.

Orientador

Kepler Borges França, Ph.D.

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil, Dezembro de 2005

UFCC 181818181818

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R696m Rodrigues Neto, Félix  
2005 Modelagem e controle de um sistema de dessalinização por osmose inversa utilizando redes de Petri/ Félix Rodrigues Neto. – Campina Grande, 2005. 102f. il.

Referências.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Orientadores: Antonio Marcus Nogueira Lima e Kepler Borges França.


1— Automação - supervisão 2— Dessalinização-osmose inversa 3— Rede de Petri 4— Modelagem I— Título


CDU 681.518.52:628.165

**MODELAGEM E CONTROLE DE UM SISTEMA DE DESSALINIZAÇÃO POR  
OSMOSE INVERSA UTILIZANDO REDES DE PETRI**

**FÉLIX RODRIGUES NETO**

Dissertação Aprovada em 15.12.2005

  
**ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG**  
Orientador

  
**KEPLER BORGES FRANÇA, Ph.D., UFCG**  
Componente da Banca

  
**MARIA DE FÁTIMA QUEIROZ VIEIRA TURNELL, Ph.D., UFCG**  
Componente da Banca

  
**MAURÍCIO BELTRÃO DE ROSSITER CORREA, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
DEZEMBRO - 2005

## Dedicatória

Este trabalho é dedicado especialmente a meus pais Sebastião Rodrigues dos Santos e Martha Nóbrega Rodrigues, a minha esposa Roseclê Pereira Rodrigues e aos meus filhos Diego Pereira Rodrigues e Larissa Pereira Rodrigues.

# Agradecimentos

- À Deus primeiramente, a Verdadeira Força que nos faz e nos dá tudo que temos e somos;
- Aos meus pais Sebastião Rodrigues dos Santos e Martha Nóbrega Rodrigues, que sempre fizeram todo sacrifício pelos meus estudos, além de me guiarem pelos caminhos do amor, simplicidade, otimismo, perseverança e honestidade;
- À minha esposa Roseclê Pereira Rodrigues, minha eterna incentivadora e o grande amor da minha vida;
- Aos meus filhos Diego Pereira Rodrigues e Larissa Pereira Rodrigues, a principal razão da minha luta diária por dias melhores;
- À minha irmã Fátima Rodrigues Correia e seu esposo Isaías Dias Correia, a quem devo a minha graduação em Engenharia Elétrica;
- A todos da minha família, que me motivaram a transpor as dificuldades;
- À minha avó Irene e às minhas tias Lucia e Ruth, responsáveis pelo meu ingresso na Universidade;
- Aos meus amigos Alfranque, Pedro e Yaskara, José Alves, Renato, Paulo, Reginaldo, Jaidilson, Cicília, Ademar, Montie, Arleide, Raniere, Fernando Almeida, Esivaldo, Juliana, Suelene, Sr. José Pereira e Dona Raimunda, José Roberto, Aracy, Israel, Izenilda e tantos outros, pelo apoio, incentivo e sobretudo por estarem sempre presentes diante da menor solicitação de suas presenças;
- Aos meus orientadores: Prof. Antônio Marcus Nogueira Lima e Prof. Kepler Borges França pela paciência e pelas valiosas contribuições dadas, sem as quais este trabalho não seria realizado;
- Aos professores da banca, pelas contribuições, sugestões e por se disporem a participar da avaliação desta dissertação;
- Aos companheiros do LIEC, LEIAM e LABDES pela alegria e convivência fraterna;
- Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica que de uma certa forma contribuíram para o andamento do meu trabalho;
- Ao CAPES, pelo apoio financeiro.
- Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente me ajudaram para a realização deste trabalho;

## Resumo

Este trabalho trata da modelagem e controle de um sistema de dessalinização via osmose inversa, alimentado por um sistema híbrido de geração de energia elétrica, baseado em fontes de energias renováveis, utilizando redes de Petri coloridas como ferramenta de análise e projeto.

A abordagem proposta utiliza a teoria de redes de Petri. Para elaboração deste trabalho foram utilizados algoritmos para enumeração do espaço de estados do modelo e para obtenção das funções de habilitação das transições da rede que representa a automatização do sistema de dessalinização juntamente com o sistema híbrido de energia.

Foi desenvolvida uma rede de Petri colorida que abordasse o funcionamento completo do sistema de dessalinização, incluindo o sistema híbrido de energia. Foram realizadas simulações desta rede através da ferramenta computacional *Design/CPN*, obtendo-se os resultados esperados. Com base nestes resultados foram realizadas algumas análises com o objetivo de mostrar que a automatização proposta para este processo está correta, pois todas as propriedades inerentes a redes de Petri foram verificadas, ou seja, o sistema não apresenta nenhum problema, tais como, bloqueio, inalcançabilidade, e irreversibilidade.

A metodologia aplicada neste trabalho demonstra a aplicabilidade de redes de Petri no desenvolvimento de automatização de um processo de dessalinização por osmose inversa.

# Abstract

This work shows the modeling and control of a system of desalination through reverse osmosis, fed by a hybrid system of electric power generation, based on sources of renewable energies, using colored Petri nets as a tool for analysis and projecting.

The proposed approach uses the theory of Petri nets. For elaboration of this work was used algorithms for enumeration of the states space model and for obtaining the enabling functions of the net transitions that represents the automation of the desalination system along with the hybrid energy system.

It was developed a colored Petri net that approached the complete operation of the desalination system, including the energy hybrid system. Simulations of this net were accomplished through the computer tool *Design/CPN*, and the expected results were obtained. Based on these results, some analysis were performed with the objective of showing that the automation propose for this process is correct, because all the inherent properties to Petri nets were verified. In other words, the system does not present any problem, such as, dead lock, unreachability, and non reversibility.

The applied methodology in this work demonstrates the usefulness of Petri nets in the development of automation in a reverse osmosis desalination process.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Revisão Bibliográfica . . . . .	2
1.2	Objetivos do Trabalho . . . . .	5
1.3	Organização do Trabalho . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Rede de Petri</b>	<b>6</b>
2.1	Introdução . . . . .	6
2.2	Rede de Petri - Definições e Propriedades . . . . .	7
2.2.1	Redes de Petri Coloridas . . . . .	10
2.2.2	Propriedades das Redes de Petri . . . . .	12
2.2.3	Método de análise comportamental . . . . .	17
2.2.4	Modelagem com redes de Petri . . . . .	19
2.3	Conclusões . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Dessalinização</b>	<b>24</b>
3.1	Introdução . . . . .	24
3.2	Processos Térmicos . . . . .	24
3.2.1	Destilação flash . . . . .	24
3.2.2	Destilação múltiplo efeito . . . . .	25
3.2.3	Destilação por compressão de vapor . . . . .	25
3.3	Processos de Membrana . . . . .	26
3.4	Osmose . . . . .	27
3.5	Fluxo de Permeado e de Solute . . . . .	28
3.6	Balanco de Energia no Sistema de Osmose Inversa . . . . .	29
3.7	Consumo de Energia . . . . .	30
3.8	Dessalinizador via Osmose Inversa (OI) . . . . .	31
3.9	Conclusões . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Sistema Híbrido de Geração de Energia</b>	<b>33</b>
4.1	Introdução . . . . .	33

4.2	Painéis Fotovoltaicos . . . . .	33
4.2.1	Painéis utilizados para realizar experimentos . . . . .	33
4.2.2	Dimensionamento dos painéis . . . . .	35
4.3	Turbina Eólica . . . . .	37
4.3.1	Dimensionamento da turbina eólica . . . . .	38
4.4	Banco de Baterias . . . . .	41
4.4.1	Dimensionamento do banco de baterias . . . . .	41
4.5	Grupo Gerador . . . . .	42
4.5.1	Dimensionamento do grupo gerador . . . . .	43
4.6	Sistema Híbrido de Geração de Energia . . . . .	43
4.6.1	Funcionamento do Sistema Híbrido . . . . .	43
4.6.2	Sistema de condicionamento de potência . . . . .	44
4.6.3	Controladores de carga . . . . .	44
4.7	Conclusões . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Dimensionamento do Sistema</b>	<b>48</b>
5.1	Introdução . . . . .	48
5.2	Modelagem Matemática . . . . .	49
5.3	Cargas do Sistema . . . . .	49
5.4	Geração Fotovoltaica . . . . .	51
5.5	Geração Eólica . . . . .	52
5.6	Geração a Diesel . . . . .	53
5.7	Armazenamento . . . . .	53
5.8	Condicionamento de Potência . . . . .	55
5.9	Conclusões . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Automação do Sistema de Dessalinização</b>	<b>57</b>
6.1	Introdução . . . . .	57
6.2	Planta de Dessalinização . . . . .	57
6.2.1	Componentes da Planta de Dessalinização . . . . .	57
6.2.2	Funcionamento da Planta . . . . .	61
6.3	Modelagem em Redes de Petri . . . . .	64
6.4	Análises dos Resultados . . . . .	68
6.4.1	Sistema híbrido de energia e captação de água . . . . .	68
6.4.2	Sistema de dessalinização e limpeza química . . . . .	71
6.5	Dimensionamento das Cargas . . . . .	75
6.6	Automação . . . . .	75
6.7	Conclusões . . . . .	78

<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>79</b>
7.1	Resultados Obtidos . . . . .	79
7.2	Contribuições . . . . .	80
7.3	Perspectivas . . . . .	80
<b>A</b>	<b>Painéis Fotovoltaicos</b>	<b>81</b>
A.1	Modelagem dos Painéis Solares . . . . .	81
A.2	Influência da Radiação Solar Incidente e da Temperatura . . . . .	83
A.3	Maximum Power Point Tracking - MPPT . . . . .	85
<b>B</b>	<b>Turbina Eólica</b>	<b>87</b>
B.1	História e Realidade Brasileira . . . . .	87
B.2	Mapeamento dos Ventos no Brasil . . . . .	88
B.3	Turbina Eólica . . . . .	89
B.4	Avaliação do Potencial Energético do Vento . . . . .	91
B.5	Distribuição de Weibull . . . . .	92
B.6	Regulação de Potência . . . . .	94
B.7	Sistema de Controle . . . . .	94
<b>C</b>	<b>Banco de Baterias</b>	<b>95</b>
C.1	Tipos de Bateria e suas Aplicações . . . . .	95
C.2	Processo de Carga-Descarga . . . . .	96
C.3	Como Calcular as Baterias . . . . .	97
C.4	Tensão de Saída das Baterias . . . . .	97
C.5	Estado de Carga das Baterias . . . . .	98
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>100</b>

# Glossário

$\Delta\pi$	gradiente de pressão osmótica	$[kgf/cm^2]$
$\Delta C$	gradiente de concentração	$[mg/L]$
$\Delta E$	Varição de energia interna	$[J/kg]$
$\Delta P$	gradiente de pressão aplicada	$[kgf/cm^2]$
$\eta_{bat}$	eficiência de carregamento da bateria	$[\%]$
$\eta_b$	eficiência da bomba	$[\%]$
$\eta_{eo}$	Eficiência global do aerogerador	$[\%]$
$\eta_{gi}$	Eficiência do aerogerador para a velocidade considerada	$[\%]$
$\eta_g$	Eficiência total do aerogerador	$[\%]$
$\eta_{inv}$	Eficiência do inversor	$[\%]$
$\eta_{mo}$	eficiência do módulo	$[\%]$
$\eta_m$	eficiência do motor	$[\%]$
$\nu_i$	número de íons	
$\overline{P}_v$	Potência média do vento	$[W/m^2]$
$\overline{V}_v$	Velocidade média do vento	$[m/s]$
$\pi$	pressão osmótica	$[kgf/cm^2]$
$\pi_a$	pressão osmótica da alimentação	$[kgf/cm^2]$
$\pi_c$	pressão osmótica do concentrado	$[kgf/cm^2]$
$\pi_p$	pressão osmótica do permeado	$[kgf/cm^2]$
$\rho_{ar}$	Massa específica do ar	$[kg/m^3]$
$\rho_a$	peso específico da água de alimentação	$[kg/m^3]$
$\sum F$	somatório das perdas de energia por atrito	$[J/kg]$
$\varepsilon$	Barreira de junção do silício	$[1,12 \text{ eV}]$
$\varepsilon_c$	Fator de correção de energia cinética	

$A$	área de membrana	$[cm^2]$
$A_{cel}$	Área da célula	$[cm^2]$
$A_{mo}$	área do módulo ou do arranjo	$[m_2]$
$A_{pa}$	Área de abrangência das pás	$[m^2]$
$A_p$	Área do painel	$[m^2]$
$ANEEL$	Agência Nacional de Energia Elétrica	
$C_a$	concentração da alimentação	$[mg/L]$
$C_{BB}$	Capacidade do sistema de armazenamento	$[kWh]$
$C_B$	Capacidade de descarga da bateria	$[Ah]$
$C_{cont}$	Capacidade mínima do controlador de carga	$[A]$
$C_{COR}$	Consumo corrigido diário	$[kWh]$
$C_c$	concentração do concentrado	$[mg/L]$
$C_{ef}$	Consumo diário efetivo	$[kWh]$
$C_E$	Capacidade energética total da bateria	$[kWh]$
$c_i$	concentração molar	$[mol/L]$
$C_P$	Coefficiente de potência da turbina eólica	$[\%]$
$C_p$	concentração do permeado	$[mg/L]$
$CA$	Corrente alternada	
$CA/CC$	De corrente alternada para corrente contínua	
$CBEE$	Centro Brasileiro de Energia Eólica	
$CC$	Corrente contínua	
$CC/CA$	De corrente contínua para corrente alternada	
$CLP$	Controlador Lógico Programável	
$CPN$	Rede de Petri Colorida	
$CSD$	Ciclo de serviço diário	$[h]$
$CSS$	Ciclo de serviço semanal	$[dia]$
$DBT$	Desconexão por baixa tensão	
$E$	Energia	$[kWh]$
$E_a$	Função das expressões nos arcos de Rede de Petri	
$E_a$	energia elétrica fornecida pelo aerogerador	$[Wh]$

$E_{FV}$	Energia entregue pelo sistema FV	[kWh]
$E_G$	Energia gerada pelo sistema	[kWh]
$E_{terico}$	Consumo de energia teórico na osmose inversa	[kWh/m <sup>3</sup> ]
$EAGA$	Energia anual gerada p/área do rotor do aerogerador	[Wh/m <sup>2</sup> ]
$F$	Consumo de combustível	[L/h]
$f(V_{vi})$	probabilidade de ocorrência da velocidade	
$F_c$	Função de cores de rede de Petri	
$F_g$	Função de guarda de rede de Petri	
$F_n$	Função de nós de rede de Petri	
$f_P$	fator de preenchimento do módulo	
$G$	Radiação solar incidente	[W/m <sup>2</sup> ]
$G^r$	Radiação solar incidente de referência	[W/m <sup>2</sup> ]
$g_c$	Constante gravitacional	[kg.m/(s <sup>2</sup> .N)]
$g_g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$HSP$	número de horas de sol pleno	[h]
$I$	corrente elétrica	[A]
$I - V$	Corrente-Tensão	
$I_{cc}$	Corrente de curto-circuito	[A]
$I_{cc}^r$	Corrente de curto-circuito de referência	[A]
$I_d$	Corrente no diodo	[A]
$I_{max}$	Corrente máxima	[A]
$I_N$	Corrente nominal	[A]
$I_{or}$	Corrente reversa de referência do diodo	[A]
$I_o$	Corrente reversa máxima de saturação do diodo	[A]
$I_{pico}$	Corrente de pico	[A]
$I_{SCarranjo}$	Corrente de curto-circuito total do arranjo	[A]
$I_{sh}$	Corrente que passa pela resistência paralela	[A]
$I_s$	corrente elétrica gerada pela célula solar	[A]
$I_s^r$	corrente de referência da célula solar	[A]
$J_i$	fluxo máximo do soluto	[g/(cm <sup>2</sup> .min)]

$J_w$	taxa de fluxo de permeado	$[cm^3/(cm^2.min)]$
$k$	Constante de Boltzmann	$[1,38e^{-23}J/K]$
$k_{ac}$	Fator de perda no sistemas de armazenamento e controle	
$k_c$	Fator de perda na fiação	
$k_e$	Fator padrão de energia	
$k_{FV}$	Fator de perda na geração fotovoltaica	
$k_f$	Fator de forma de Weibull	
$k_G$	fator de perdas globais do sistema	
$k_i$	coeficiente de transferência de massa do soluto	$[cm/min]$
$k_r$	Fator de perda na transmissão/distribuição	
$k_v$	Constante de von Karman's	
$k_w$	coeficiente de transferência de massa do solvente	$[cm^3/(kgf.min)]$
$m'$	Fator de idealidade equivalente	
$MCT$	Ministério de Ciência e Tecnologia	
$MED$	Destilação múltiplo efeito	
$MSF$	Destilação flash com múltiplo estágio	
$N$	Total de amostras	
$N_{sn}$	Número de células ligadas em série	
$OI$	Osmose Inversa	
$P$	Potência elétrica	$[W]$
$P_{a1}, P_{a2}$	Pressão nos pontos 1,2 respectivamente	$[kgf/cm^2]$
$P_{auto}$	Período de autonomia do sistema	$[dias]$
$P_a$	pressão da alimentação	$[kgf/cm^2]$
$P_{ci}$	Potência efetivamente demandada pela carga	$[kW]$
$P_c$	pressão do concentrado	$[kgf/cm^2]$
$P_{eo}$	Potência eólica gerada	$[W]$
$P_{FV}$	Potência efetivamente instalada do sistema FV	$[kW_P]$
$P_{GMG}$	Potência nominal do gerador	$[kW_e]$
$P_n$	Potência nominal	$[W]$
$P_{pico}$	potência máxima gerada	$[W]$

$P_{PROJ}$	Potência mínima do sistema fotovoltaico	[W]
$P_p$	pressão do permeado	[kgf/cm <sup>2</sup> ]
$P_v$	Potência do vento	[W]
$PD$	Profundidade de descarga da bateria	[%]
$q$	Carga do elétron	[1, 6e <sup>-19</sup> Coulomb]
$Q_a$	vazão da água de alimentação	[cm <sup>3</sup> /min]
$q_n$	número de equipamentos	
$Q_p$	vazão de permeado	[cm <sup>3</sup> /min]
$Q_s$	calor trocado entre o fluido e o ambiente	[J/kg]
$R$	constante universal dos gases perfeitos	[(kgf.L/(cm <sup>2</sup> .mol.K))]
$r$	recuperação	[%]
$R_{sh}$	resistência parasita paralela	[Ω]
$R_s$	resistência parasita série	[Ω]
$RBT$	Reconexão por baixa tensão	
$RP$	Rede de Petri	
$RPC$	Rede de Petri Colorida	
$RRT$	Reconexão por regulação de tensão	
$RT$	Regulação de tensão	
$T$	Temperatura	[°C]
$T^r$	Temperatura de referência da célula	[298, 16° K]
$T_a$	Período analisado	[h]
$T_{cel}$	Temperatura absoluta da célula fotovoltaica	[K]
$u(z)$	Velocidade do vento a uma altura z	[m/s]
$u_*$	Velocidade de remoinho	[m/s]
$V$	Tensão	[V]
$V_1, V_2$	volume específico nos pontos 1,2 respectivamente	[m <sup>3</sup> /kg]
$V_{ca}$	Tensão de circuito aberto	[V]
$v_c$	Velocidade de corte da turbina	[m/s]
$V_d$	Tensão nos terminais do diodo	[V]
$v_f$	Velocidade de escoamento do fluido	[m/s]



$V_{max}$	Tensão máxima	[V]
$V_N$	Tensão nominal	[V]
$v_n$	Velocidade nominal da turbina	[m/s]
$v_p$	Velocidade de partida da turbina	[m/s]
$V_t$	Potencial térmico	[V]
$V_{vi}$	Amostra de velocidade	[m/s]
$V_v$	Velocidade do vento	[m/s]
$VC$	Destilação por compressão de vapor	
$w$	vazão mássica	[kg/s]
$W_f$	trabalho de eixo produzido	[J/kg]
$W_p$	Potência de pico	[W]
$WANE B$	Wind Atlas for the Northeast of Brazil	
$Z$	Altura manométrica do fluido	[m]
$z$	Altura do ponto de medição da velocidade do vento	[m]
$z_0$	fator de rugosidade da superfície	
$z_{alt}$	Altitude do local	[m]

# Lista de Tabelas

3.1	Consumo de Energia para destilação e Osmose Inversa para dessalinização, para água do mar . . . . .	27
4.1	Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos . . . . .	36
4.2	Frequência da ocorrência de ventos à 20m de altura . . . . .	40
4.3	Cálculo do Banco de Baterias . . . . .	42
6.1	Relação das cargas da planta . . . . .	75

# Lista de Figuras

2.1	Rede de Petri. (a) Estrutura da rede de Petri. (b) Rede de Petri marcada (SILVA, 2005). . . . .	8
2.2	Ilustração da regra de disparo de uma transição. . . . .	10
2.3	Rede de Petri com marcação inicial. . . . .	13
2.4	Exemplo de uma rede de Petri com suas marcações alcançáveis. . . . .	14
2.5	(a) Rede limitada. (b) Rede ilimitada. . . . .	15
2.6	(a) Rede reversível. (b) Rede não reversível. . . . .	17
2.7	(a) Uma rede de Petri. (b) A árvore de cobertura. . . . .	18
2.8	Operações fundamentais. (a) execução seqüencial; (b) concorrência e sincronização; (c) conflito; (d) cíclica; (e) exclusão mútua; (f) confusão. . . . .	20
2.9	Modelos de depósitos. . . . .	22
3.1	Destilação Flash Múltiplo Estágio (MSF). . . . .	25
3.2	Destilação Múltiplo Efeito (MED). . . . .	25
3.3	Destilação por Compressão de Vapor (VC). . . . .	26
3.4	Processo de Osmose Natural e Inversa. . . . .	28
3.5	Sistema Experimental de Osmose Inversa. . . . .	29
3.6	Diagrama de um Sistema de Dessalinização. . . . .	32
4.1	Influência da Radiação Solar na Potência Gerada. . . . .	34
4.2	Detalhes da Figura 4.1 numa escala maior. . . . .	35
4.3	Radiação Solar medida no Campus da UFCG. . . . .	37
4.4	Rendimento da Turbina Whisper 175. . . . .	38
4.5	Velocidade do Vento ao longo do mês, à 20m de altura (m/s), no Campus da UFCG. . . . .	39
4.6	Ocorrência de ventos com duração de 10 minutos. . . . .	39
4.7	Diagrama de Blocos do Sistema Híbrido de Geração de Energia. . . . .	43
4.8	Curvas de carga e descarga de uma bateria controlada pelo método liga/desliga. . . . .	45
4.9	Fluxograma do Sistema Híbrido. . . . .	46

5.1	Sistema típico de geração e consumo. . . . .	49
5.2	Fontes de perdas típicas em sistemas renováveis. . . . .	50
5.3	Curva de consumo de um grupo gerador de kWe. . . . .	54
6.1	Diagrama de um Sistema de Dessalinização com instrumentação. . . . .	58
6.2	Fluxograma 1 (Início). . . . .	62
6.3	Fluxograma 2 (Complementação). . . . .	63
6.4	Diagrama de Blocos da Rede de Petri do Sistema de Dessalinização Completo. . . . .	65
6.5	Rede de Petri (Parte 1) - Sistema Híbrido de Energia. . . . .	65
6.6	Sistema Híbrido - Grafo de ocorrência. . . . .	66
6.7	Rede de Petri (Parte 2) - Captação de Água Bruta. . . . .	67
6.8	Captação de Água Bruta - Grafo de ocorrência. . . . .	67
6.9	Rede de Petri (Parte 3) - Processo de Dessalinização. . . . .	67
6.10	Processo de Dessalinização - Grafo de ocorrência. . . . .	68
6.11	Rede de Petri (Parte 4) - Processo de Limpeza. . . . .	69
6.12	Processo de Limpeza - Grafo de ocorrência. . . . .	70
6.13	Sistema Híbrido de energia e captação de água bruta - Relatório extraído através de funções do Design/CPN. . . . .	70
6.14	Sistema Híbrido de energia e captação de água bruta - Grafo de ocorrência. . . . .	72
6.15	Sistema de dessalinização e limpeza química - Relatório extraído através de funções do Design/CPN. . . . .	73
6.16	Sistema de dessalinização e limpeza química - Grafo de ocorrência. . . . .	74
6.17	Sistema Completo - Dessalinização e sistema híbrido de energia . . . . .	77
A.1	Circuito Elétrico Equivalente. . . . .	82
A.2	Curva Característica Típica de uma célula de silício cristalino. . . . .	83
A.3	Influência da Temperatura no comportamento da célula. . . . .	84
A.4	Influência da Radiação Solar. . . . .	85
B.1	Mapa de Ventos do Brasil. . . . .	89
B.2	Componentes principais de uma turbina eólica de eixo horizontal. . . . .	90
B.3	Seção de uma turbina eólica típica. . . . .	91
B.4	Distribuição de probabilidade de ocorrência de velocidades: real e estimada. . . . .	93
C.1	Evolução da tensão durante um processo de carga a corrente constante, em função do tempo e do regime de carga, para uma temperatura de $25^{\circ}C$ . . . . .	98
C.2	Evolução da tensão durante um processo de descarga a corrente constante. . . . .	99
C.3	Capacidade da bateria em relação ao tempo de descarga. . . . .	99

# Capítulo 1

## Introdução

O Brasil é um país rico em água doce. Porém, esta água é distribuída de forma desigual, existindo regiões onde é abundante e outras onde sua ausência é sinônimo de pobreza e desequilíbrio sócio-econômico.

A região Nordeste é caracterizada por condições semi-áridas, apresentando em sua formação litológica uma predominância de rochas sedimentares e cristalinas. Esse tipo de caracterização pode afetar a forma da distribuição dos recursos hídricos, uma vez que esses tipos de solos oferecem diferentes índices de porosidade e de permeabilidade, como é o caso das rochas cristalinas, que normalmente apresentam uma baixa permeabilidade e condiciona uma circulação lenta dos fluidos e conseqüentemente maior tempo de retenção das águas percoladas nos aquíferos que contribui para a salinização dos mananciais (OLIVEIRA, 2002).

Verifica-se que as águas subterrâneas desta região, devido ao seu alto grau de salubridade, tornam impróprias para o consumo humano, animal e uso de irrigação, se agravando mais no período de longa estiagem.

O nível de salinidade das águas no Nordeste brasileiro vem se revelando como um fenômeno tão preocupante quanto a baixa precipitação. Para se ter uma idéia da dimensão do problema, cumpre registrar que por meio do censo realizado em 1997/2000 pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), núcleo Fortaleza, constatou-se que, no Ceará, das 13.970 fontes de água subterrâneas cadastradas e caracterizadas, 3.256 possuem teor de sal acima de 1000 mg/litro de sólidos totais dissolvidos, com a estimativa de que esses poços são fonte de abastecimento de água para consumo de cerca de 200.000 famílias (CPRM- 2000) (SCIELO BRASIL, 2003). A Organização Mundial de Saúde recomenda no máximo 250 mg/l de cloreto nas águas para o abastecimento das populações.

Para diminuir o índice de concentração de sais e tornar a água potável, existem várias técnicas de dessalinização, sendo a osmose inversa (OI) a mais utilizada.

Com o desenvolvimento da técnica OI de dessalinização proporcionando redução de custos, tanto do ponto de vista de consumo de energia como de implantação, tornou-se viável a insta-

lação destes equipamentos em muitas localidades cuja água existente para o consumo humano é imprópria.

A maioria dos sistemas de dessalinização está instalada em locais remotos, longe dos grandes centros, de difícil acesso à rede elétrica convencional, além da escassa mão de obra especializada que possa operar a planta diariamente dentro dos procedimentos exigidos pela mesma.

A usina de dessalinização, que é objeto de estudo, encontra-se localizada em uma região remota, de difícil acesso, no Cariri paraibano, onde inexistente sistema de distribuição de energia elétrica e mão de obra qualificada. Diante deste cenário é latente a necessidade de dispor de uma planta (sistema de geração e usina de dessalinização) suficientemente bem projetada e automatizada, a qual se possa atribuir elevado nível de confiabilidade, eficiência e ao mesmo tempo baixo custo.

Neste caso, em virtude da geração de energia ser realizada através de um sistema de geração distribuída, baseado em fontes renováveis (fotovoltaica e eólica) e um gerador diesel (como backup), o controle automático das fontes de energia é muito importante para que se obtenha um maior aproveitamento da energia gerada pelas fontes, armazenando-a em um banco de baterias.

## 1.1 Revisão Bibliográfica

A análise e o projeto da usina de dessalinização, de modo geral, tem tratado exclusivamente da parte referente a engenharia química, como o dimensionamento de membranas, a dosagem química de anti-incrustante entre outros, que são apresentados em alguns trabalhos citados a seguir.

Kahdim et al.(KAHDIM; ISMAIL; JASSIMB, 2003) estudou a modelagem de sistemas de osmose inversa e desenvolveu um modelo teórico para prever a performance de sistemas a osmose inversa e comparar os resultados teóricos com os valores experimentais obtidos da planta piloto. Os três objetivos principais do trabalho de Kahdim et al. foram: (1) desenvolver um programa computacional como um modelo geral para qualquer tipo de sistema a osmose inversa, (2) prevê a performance da planta em função do tempo, e (3) formar um estudo comparativo sobre a performance de dois tipos de membranas especificadas. Neste trabalho um modelo matemático baseado na análise de Kimura-Sourirajan foi usado para descrever o fluxo de água e sal através da membrana. Este modelo depende do valor do coeficiente da própria difusão para diferentes íons. A modelagem matemática de Kahdim et al foi feita em cima de equações matemáticas que tratam de íons, anions e cátions das concentrações de águas salgadas.

Avlonitis et al.(AVLONITIS et al., 2004) apresentou um trabalho sobre estrutura de um sistema SCADA flexível e de baixo custo. Um computador normal com interface e software apropriado opera o sistema. O sistema foi instalado numa planta de dessalinização usada,

em paralelo com o sistema de automação antigo existente. O sistema de automação permite controle remoto e supervisão da planta a um custo razoável. Por outro lado, o sistema pode ser usado para medições adicionais seguras na planta de osmose inversa. A análise dos dados coletados poderiam ser usados para prevê possíveis paradas da planta. O projeto e instalação do sistema de automação inclui o software e o hardware o qual é simples e fácil de acessar. O hardware utilizado foi o Adam 4000 e o software foi o VisiDaq 3.1. A operação do sistema é simples e pode ser alterado com pouco conhecimento de programação.

Al-Sum et al (A1-SUM; SATTER; AZIZ, 1993) apresentou técnicas de automação convencional para um duplo propósito para melhoria na qualidade e produção pelo uso de automação avançada. A necessidade para melhorar automação em planta de dessalinização tem sido estudado por Darwish e Gobaisi (DARWISH; AI-GOBAISI, 1994). Um estudo muito detalhado sobre especificação de um sistema de automação avançado para planta de dessalinização e de energia foi conduzido por Darwish et al. (DARWISH et al., 1993). Tentando sempre baixar os custos operacionais da água, diferentes métodos e técnicas têm sido usados. Redes neurais e lógica Fuzzy foram sugeridas por Akbazadeh e Kumble (AKBARZADEH; KUMBLE, 1996), e Jafer et al. (JAFAR et al., 1998), para otimizar as condições operacionais e a dosagem química, alcançando assim um baixo custo operacional.

Zilouchian e Jafar (ZILOUCHIAN; JAFAR, 2001) apresentam métodos computacionais utilizando lógica fuzzy, redes neurais e algoritmos genéricos com uma metodologia de computação voltada para o tratamento da água do mar no processo de dessalinização para reduzir os custos de produção.

O problema da modelagem da automação do processo de sistemas de dessalinização não tem sido abordado em trabalhos divulgados na literatura. Especificamente no caso da usina que está sendo instalada em local remoto, com restrições de energia e mão-de-obra qualificada, surgindo assim, a necessidade de uma automação do processo, que neste caso torna-se um requisito muito importante (BADREDDIN; GAMBIER; ABOUL-FOTOUH, 2004).

No caso deste trabalho, têm-se dois sistemas: a) Dessalinizador que compreende os subsistemas: captação de água bruta, dessalinização, dosagem química de anti-incrustante e limpeza química das membranas; b) Sistema de Energia que abrange os sub-sistemas: painéis fotovoltaicos, turbina eólica, banco de baterias e grupo gerador.

O desenvolvimento de modelos para cada um destes subsistemas é um passo essencial na direção de viabilizar o projeto do sistema de controle automático da usina de dessalinização. Essa modelagem pode focalizar primeiramente o comportamento lógico dos subsistemas sem considerar a dinâmica contínua. A partir dos modelos que descrevem o comportamento lógico dos subsistemas pode-se compor o modelo global da usina para estudar problemas de intertravamento, seqüenciamento e bloqueio. Na literatura são encontrados poucos trabalhos relacionados com a aplicação descrita nesta dissertação. Neste trabalho optou-se pela utilização de redes de

Petri para modelar a dinâmica discreta dos subsistemas e da usina de dessalinização.

É importante que a utilização de uma ferramenta de modelagem tal como rede de Petri viabilize a verificação da corretude da "automatização" que é importante no contexto do problema, ou seja, evitar problemas na operação do sistema que será instalado numa localidade remota.

Neste trabalho foi feita uma modelagem da planta, baseada na teoria de sistemas a eventos discretos. Como ferramenta de projeto foi utilizada a abordagem de Rede de Petri Colorida - CPN. As principais vantagens de se usar Redes de Petri Colorida são:

1. O modelo CPN correspondente a uma descrição do sistema modelado, pode ser usado como uma especificação de um sistema que se quer construir.
2. Analisando a corretude formal de um novo sistema antes de construí-lo, permite estudar as propriedades do sistema através das propriedades da rede, tais como, bloqueio, alcançabilidade e reversibilidade.
3. O formalismo pertinente a um modelo CPN permite avaliar se o sistema possui estados inatingíveis ou bloqueios.
4. Pode-se escolher uma determinada transição e expandi-la, ou seja, detalhar melhor e transforma-la num sub-sistema. Na prática significa dizer que um simples "ligar um determinado equipamento", pode ser transformado na operação completa desse equipamento, observando os pré-requisitos para poder funcionar, seus intertravamentos, seqüenciamento próprio, condições de parada e de falhas, reinício de operação, bem como seus resultados.

Para melhor descrever o problema, bem como a solução proposta, é apresentada uma descrição sucinta da planta a ser modelada e controlada de forma a permitir a sua representação segundo uma rede de petri colorida com o objetivo de conferir uma operação automática do dessalinizador bem como a administração eficiente do uso das fontes de energias renováveis.

A utilização de métodos de modelagens no projeto de sistemas traz algumas vantagens tais como a detecção e eliminação de inconsistências e erros de especificação de projeto, evitando o retrabalho tanto na fase de projeto e desenvolvimento quanto na fase de construção e até mesmo na fase de produção. É nisto que reside a maior redução de custo pois, se evita desperdício com retrabalhos, perda de equipamentos e de tempo, além de parada de produção.



## 1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho consiste na utilização de métodos formais para automatizar um processo de dessalinização alimentado por fontes de energias renováveis, um conjunto de baterias para servir de banco de energia e um grupo gerador como *back-up*.

Este objetivo é dividido em quatro partes: 1) Automatizar o sistema de dessalinização; 2) Automatizar o sistema híbrido de energia; 3) Administrar a utilização da energia disponível para obter a maior produção de água permeada possível; 4) utilizar a teoria de sistemas a eventos discretos para modelagem do sistema de automação, com a utilização de uma ferramenta formal, no caso, redes de Petri.

## 1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos:

No capítulo 1 é apresentada uma breve introdução do trabalho. No capítulo 2 é apresentado um estudo sucinto sobre rede de Petri, seu formalismo, suas propriedades, métodos de modelagem, e um exemplo de rede de Petri modelando um processo.

O processo de osmose inversa é explicado no capítulo 3, bem como o sistema de dessalinização via osmose inversa com o respectivo *layout* da planta apresentando os seus equipamentos. O balanço de energia do sistema de dessalinização também é apresentado neste capítulo.

No capítulo 4 são apresentadas as fontes de energias renováveis com um breve estudo sobre painéis fotovoltaicos, uma turbina eólica, um banco de baterias e o grupo gerador como *back-up* de energia. Estes equipamentos formarão o sistema híbrido de geração de energia.

O dimensionamento do sistema, modelagem matemática, carga a ser atendida, energias geradas pelas fontes renováveis, armazenamento de energia e condicionamento de potência, são apresentados no capítulo 5.

No capítulo 6 é apresentado o processo de automatizar o sistema de dessalinização, com o desenvolvimento das redes de Petri coloridas, seus resultados e suas análises.

Finalmente são apresentadas no capítulo 7, as conclusões finais, resultados preliminares, contribuições deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Rede de Petri

### 2.1 Introdução

Um sistema de produção por batelada geralmente consiste de várias unidades de processos (reação, destilação, secagem, filtragem, etc.) as quais prevêm seqüências de operações técnicas e são ligadas por fluxos de massa ou energia e recursos partilhados. Muitas das ações de controle são de natureza discreta tais como abrir/fechar válvulas, ligar/desligar bombas ou agitadores, etc. Portanto, modelos discretos podem ser aplicados para sistemas de processo por batelada.

Embora a aplicação de rede de Petri para modelar processos por batelada não seja muito utilizada, ela tem sido proposta para várias aplicações as quais são sumarizadas em (HANISCH, 1992) que rede de Petri é uma excelente ferramenta para modelar e analisar as interações entre as unidades de processo numa planta e descreve o modo desejado de operação da planta. Modelos do comportamento desejado requerem que a estratégia de controle, isto é, a resolução dos conflitos, seja pré-determinado. Em alguns casos, porém, nenhum conhecimento preliminar sobre uma possível estratégia de controle está disponível. Apenas uma meta (maximização de processamento, minimização dos tempos de partida e parada) é dada para ser alcançada pelo controle (HANISCH, 1993).

A teoria de rede de Petri pode servir como uma base formal e intuitiva para desenvolvimento de modelagem que eficientemente suporta a especificação rigorosa, projeto, validação e análise de sistemas complexos. Ambientes de modelagens e ferramentas baseadas na teoria de rede podem ser úteis nos estágios iniciais de um projeto de processo, quando a mais importante hipótese e decisão sobre a estrutura e função do sistema deve ser realizado e verificado por protótipos rápidos (CHERKASOVA; KOTOV; ROKICKI, 1993). Durante a última década aumentou o interesse em construir ferramentas de rede de Petri e sistemas de modelagem baseado em rede.

Um ambiente de modelagem ideal deve incluir as seguintes capacidades básicas: - Meios para detalhar adequadamente as especificações do sistema, - Meios para análise formal das propriedades do sistema, e - Veículos de simulação para avaliação de performance. Foi utilizado

o *Design/CPN* [Jensen87, Pinci-Shapiro91] para modelar o problema. Baseado em rede de Petri colorida hierárquica, a ferramenta *Design/CPN* forneceu todas as capacidades mencionadas em (CHERKASOVA; KOTOV; ROKICKI, 1993).

## 2.2 Rede de Petri - Definições e Propriedades

Uma rede de Petri é um tipo particular de grafo direcionado, ponderado e bipartido, composto por três tipos de objetos e com um estado inicial,  $M_0$ . Estes objetos são lugares, representados por círculos, transições representados por barras ou retângulos e, arcos direcionados, aos quais são atribuídos pesos (inteiros positivos), onde um arco  $w$ -ponderado deve ser entendido como um conjunto de  $w$  arcos paralelos ligando um lugar a uma transição ou vice-versa.

Para o estudo do comportamento dinâmico de uma rede, em termos de seus estados e suas mudanças, cada lugar pode conter um número inteiro positivo ou nulo de fichas (*tokens*), representadas por pontos. A marcação da rede,  $M$ , é um vetor coluna de  $m$ -elementos, onde  $m$  é o número total de lugares. Os elementos de  $M$ , representados por  $M(p)$ , são os números de fichas no correspondente lugar  $p$ .

Os lugares podem comportar um número finito ou infinito de fichas. As redes de Petri em cujos lugares podem ser colocados um número ilimitado de fichas denomina-se *rede de Petri com capacidade infinita*. De outra forma, uma rede em cujos lugares podem ser colocados um número limitado de fichas, denomina-se *rede de Petri com capacidade finita*.

**Definição 1** *Uma rede de Petri marcada é definida como um conjunto (JENSEN, 1997),*

$RP = (P, T, I, O, K, M_0)$ , no qual

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  é um conjunto finito de  $m$  lugares,
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  é um conjunto finito de  $n$  transições, com  $P \cup T \neq \emptyset$  e  $P \cap T = \emptyset$
- $I : P \times T \rightarrow N$  é uma função que especifica os arcos que ligam lugares a transições,
- $O : T \times P \rightarrow N$  é uma função que especifica os arcos que ligam transições a lugares,
- $K : P \rightarrow N \cup \{\infty\}$  é uma função de capacidade,
- $M_0 : P \rightarrow N$  é a marcação inicial,

**Definição 2** *Uma estrutura de rede de Petri, sem nenhuma marcação inicial, é denotada por  $N = (P, T, I, O)$ . Assim, uma rede de Petri com uma dada marcação inicial é denotada por  $RP = (N, K, M_0)$ . Se a capacidade da rede é não limitada, então a mesma é denotada por  $RP = (N, M_0)$ .*

A Figura 2.1 representa uma estrutura de rede de Petri com sete lugares, seis transições e quinze arcos direcionados. O conjunto de lugares é  $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7\}$  e o de transições é  $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6\}$ . Acrescentando uma marcação a esta estrutura, obtém-se a rede de Petri marcada da Figura 2.1. Nesta, a marcação inicial é  $M_0 = [1, 0, 1, 0, 0, 2, 0]^T$ .

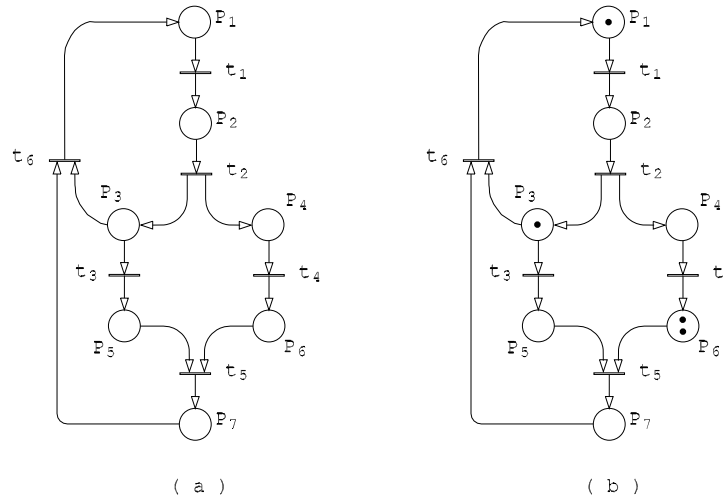


Figura 2.1: Rede de Petri. (a) Estrutura da rede de Petri. (b) Rede de Petri marcada (SILVA, 2005).

**Definição 3** *Uma rede de Petri ordinária, é uma rede na qual todos os seus arcos tem peso igual a um.*

Por esta definição, uma rede ordinária possui o mapeamento de seus arcos da seguinte forma:

$$I : P \times T \rightarrow \{0, 1\} \text{ e} \quad O : T \times P \rightarrow \{0, 1\}.$$

Tanto lugares quanto transições possuem conjuntos de entrada (pré-condições) e saída (pós-condições), definidas como:

- $\bullet p = \{t \in T | (t, p) \in O\}$ , é o conjunto de transições de entrada do lugar  $p$ .
- $p^\bullet = \{t \in T | (p, t) \in I\}$ , é o conjunto de transições de saída do lugar  $p$ .
- $\bullet t = \{p \in P | (p, t) \in I\}$ , é o conjunto de lugares de entrada da transição  $t$ .
- $t^\bullet = \{p \in P | (t, p) \in O\}$ , é o conjunto de lugares de saída da transição  $t$ .

Na Figura 2.1,  $p_1$  é lugar de entrada para  $t_1$  assim como  $p_6$  é para  $t_5$ . O lugar  $p_5$  é lugar de saída para  $t_3$  e  $p_1$  é para  $t_6$ . A transição  $t_6$  é transição de entrada de  $p_1$  assim como  $t_3$  é para  $p_5$ . A transição  $t_5$  é transição de saída de  $p_5$  e  $p_6$ .

O par formado por uma transição  $t$  e um lugar  $p$ , onde  $p$  é tanto lugar de entrada como de saída de  $t$ , é chamado *auto-laço*.

**Definição 4** Uma rede de Petri é dita ser pura se ela não possui auto-laços.

Uma transição sem nenhum lugar de entrada é denominado de *transição fonte* (source), que está sempre habilitada (ver regra de habilitação a seguir). Uma transição que não possui lugares de saída é chamada *transição sorvedouro* (sink), que consome fichas mas não produz nenhuma.

O comportamento de muitos sistemas pode ser descrito em termos de mudança de seus estados. Para simular o comportamento dinâmico de um sistema, representado por uma rede de Petri, um estado ou marcação é mudada de acordo com as regras de habilitação e disparo das transições, dadas a seguir:

*Regra de habilitação:* uma transição  $t \in T$  está habilitada se

$$\begin{aligned} \forall p \in \bullet t : M(p) &\geq I(p, t) \text{ e} \\ \forall p \in t \bullet : M(p) &\leq K(p) - O(t, p). \end{aligned}$$

Isto é, uma transição está habilitada se cada um de seus lugares de entrada contém um número de fichas maior ou igual ao peso do arco que os liga e se a capacidade de cada um de seus lugares de saída não for excedida pelo acréscimo das fichas decorrentes do disparo.

*Regra de Disparo:* uma transição habilitada pode ou não disparar (dependendo da ocorrência ou não do evento atual). Uma vez disparada, a transição retira de cada lugar de entrada  $I(p, t)$  fichas e acrescenta  $O(t, p)$  fichas a cada lugar de saída. A ocorrência do disparo de  $t$ , que modifica a marcação  $M$  para uma nova marcação  $M'$ , é denotada por  $M[t > M'$ , ou (em analogia à função de transição de estado  $\delta$  dos autômatos)  $M' = \delta(M, t)$ . A marcação  $M'$  resultante do disparo de  $t$  na marcação  $M$  é:

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) - I(p, t), & \text{se } p \in \bullet t \\ M(p) + O(t, p), & \text{se } p \in t \bullet \\ M(p), & \text{se } p \notin \bullet t \wedge p \notin t \bullet. \end{cases} \quad (2.1)$$

A aplicação das regras de disparo são ilustradas na Figura 2.2. Essas redes possuem capacidade finita. As transições na Figura 2.2(a, b e c) antes do disparo estão habilitadas pois em cada caso os lugares  $p_1$  e  $p_2$  contêm um número de fichas igual ou superior ao peso dos arcos. Mas este não é o caso para o exemplo da Figura 2.2(d), no qual a transição  $t_1$  não está habilitada devido a quantidade de fichas em  $p_2$  ser inferior ao peso do arco. Duas seqüências resultam da execução de uma rede de Petri: a seqüência de marcações  $(M_0, M_1, M_2, \dots)$  e a seqüência de transições  $(t_{j_0}, t_{j_1}, t_{j_2}, \dots)$ . Estas duas seqüências são relacionadas pela relação  $M_{k+1} = \delta(M_k, t_{j_k})$ , para  $k = 0, 1, 2, \dots$ . Assim, dada uma seqüência de transições e  $M_0$ , pode-se facilmente encontrar a seqüência de marcações pela execução de uma rede de Petri.

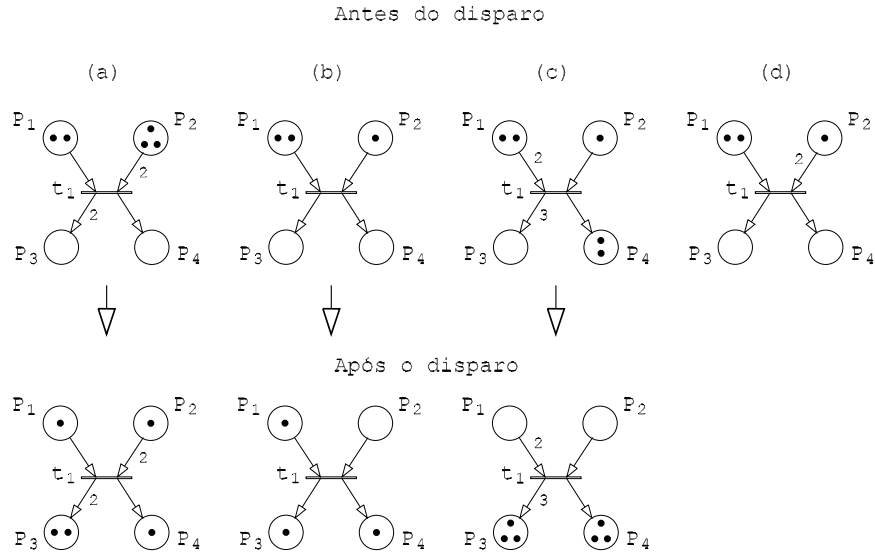


Figura 2.2: Ilustração da regra de disparo de uma transição.

Em analogia à função de transição de estados dos autômatos, é conveniente se estender a função de próximo estado para mapear uma marcação e uma seqüência de transições em uma nova marcação. Para uma seqüência de transições  $t_{j_0}, t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_k}$  e uma marcação  $M$ , a marcação

$$M' = \delta(M, t_{j_0}, t_{j_1}, \dots, t_{j_k})$$

é o resultado do disparo primeiro de  $t_{j_0}$ , depois de  $t_{j_1}$  e assim por diante até o disparo de  $t_{j_k}$ . Finalmente:

**Definição 5** A função estendida de próximo estado é definida para uma marcação  $M$  e uma seqüência de transições  $s \in T^*$  por

$$\delta(M, t_j, s) = \delta(\delta(M, t_j), s)$$

em que  $T^*$  representa o conjunto de todas as seqüências de transições possíveis para uma dada rede de Petri.

### 2.2.1 Redes de Petri Coloridas

A utilização de redes de Petri para descrever sistemas reais mais complexos, torna clara a necessidade de tipos de redes mais poderosas para descrever tais sistemas, facilitando a visualização do modelo e, conseqüentemente o seu entendimento. O desenvolvimento das *Redes de Petri de Alto Nível* (JENSEN, 1997), mais especificamente as redes de Petri coloridas, constitui um avanço nessa direção e possuem o mesmo poder de descrição e análise das redes de Petri. Assim, todos os sistemas modelados por redes de Petri podem ser modelados por redes de Petri

coloridas, mas de forma muito mais compacta, onde as similaridades e diferenças das sub-redes podem ser observadas com maior facilidade (BARROSO, 1996).

As principais características das redes de Petri coloridas (RPC) são (BARROSO, 1996):

- Combinação de texto e gráfico;
- Declarações e inscrições por meio de uma linguagem formal de programação: tipos, funções, operações, variáveis e expressões são definidas;
- A estrutura da rede consiste de lugares, transições e arcos;
- RPCs possuem o mesmo poder de modelagem e análise das redes de Petri.

Numa RPC, cada lugar possui as seguintes inscrições:

- Nome ou identificação;
- Conjunto de cores associado especificando o tipo das fichas que podem residir no lugar;
- Marcação inicial (multiconjunto de fichas coloridas).

Cada transição possui as seguintes inscrições:

- Nome ou identificação;
- Guarda ou expressão lógica contendo variáveis.

Cada arco possui a seguinte inscrição:

- Expressão associada contendo variáveis que quando avaliadas, produzem um multiconjunto de cores para fichas.

Formalmente, define-se uma rede de Petri colorida da seguinte forma:

**Definição 6** *Uma rede de Petri colorida é uma tupla (BARROSO, 1996)*

$RPC = (C, P, T, A, F_n, F_c, F_g, E_a, I)$ , onde

- $C$  é um conjunto finito de tipos não vazios, denominado conjunto de cores;
- $P$  é um conjunto finito de lugares;
- $T$  é um conjunto finito de transições;
- $A$  é um conjunto finito de arcos tal que:

$$P \cap T = P \cap A = T \cap A = \phi$$

- $F_n : A \rightarrow (P \times T) \cup (T \times P)$  é uma função de nós;
- $F_c : P \rightarrow C$  é a função de cores;
- $F_g$  : é a função de guarda e é definida de  $T$  em expressões tais como:  

$$\forall t \in T : [Tipo(F_g(t)) = \mathbf{B} \wedge Tipo(Var(F_g(t))) \subseteq C]$$
onde  $\mathbf{B}$  denota o tipo lógico (contém os elementos {falso, verdadeiro});
- $E_a$  é a função das expressões nos arcos e é definida de  $A$  em expressões tais como:  

$$\forall a \in A : [Tipo(E_a(a)) = C(p(a))_{MS} \wedge Tipo(Var(E_a(a))) \subseteq C]$$
onde  $p(a)$  é o lugar de  $F_n(a)$  e  $C(p(a))_{MS}$  é o multiconjunto ou bolsa de cores do conjunto de cores associado a  $p$ ;
- $I$  é a função de inicialização, definida de  $P$  em expressões fechadas tais como:  

$$\forall p \in P : [Tipo(I(p)) = C(p)_{MS}].$$

O sistema de dessalinização e de geração de energia, que são os processos de produção estudados neste trabalho, serão modelados através de rede de Petri colorida. Portanto, serão mostradas e analisadas as redes de Petri coloridas destes sistemas, no Capítulo 6.

## 2.2.2 Propriedades das Redes de Petri

Considerando que o modelo em rede de Petri reflita exatamente os requisitos especificados para o sistema, o estudo de suas propriedades pode revelar características e problemas desse sistema. Dois tipos de propriedades podem ser estudadas por meio do modelo de rede de Petri: as comportamentais e as estruturais. As propriedades comportamentais são aquelas que dependem da marcação inicial enquanto as estruturais não apresentam esta dependência. Um bom tratamento das propriedades estruturais é feito por Murata (MURATA, 1989). Nesta seção são tratadas as propriedades comportamentais de alcançabilidade, vivacidade, limitabilidade, segurança, reversibilidade e estado de repouso (SILVA, 2005).

### Alcançabilidade

Alcançabilidade é uma base fundamental para o estudo das propriedades dinâmicas de um sistema. Através dela pode-se saber se o sistema alcançará um estado específico, ou exibe um comportamento particular. Em geral, a preocupação é se o sistema modelado em rede de Petri exibe todas as propriedades desejadas, como determinado nos requisitos da especificação, e nenhuma indesejada.



Para determinar se o sistema modelado pode alcançar um estado específico, contido num comportamento desejado, é necessário encontrar pelo menos uma seqüência de disparo de transições que transforme a marcação  $M_0$  em  $M_n$ , em que  $M_n$  representa o estado específico. Deve-se atentar para o fato de que um sistema real deve alcançar um determinado estado que é especificado pelo comportamento desejado. Num modelo de rede de Petri, isto precisa ser refletido na existência de uma seqüência específica de disparo de transições, representando o comportamento desejado, que transformaria  $M_0$  no requerido  $M_n$ .

Como ilustrado na Figura 2.3, para uma marcação inicial  $M_0 = [0, 0, 0, 0, 1]^T$ , há uma transição habilitada,  $t_1$ . O disparo de  $t_1$  a partir de  $M_0$  resulta na marcação  $M_1 = [1, 1, 0, 0, 0]^T$ . Isto é escrito como  $M_0[t_1 > M_1]$ .

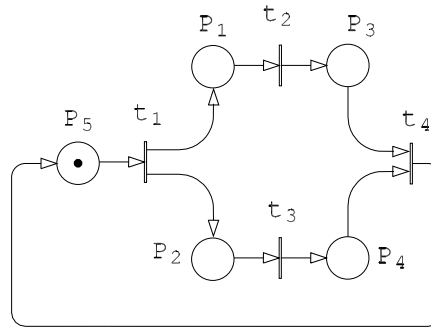


Figura 2.3: Rede de Petri com marcação inicial.

Na marcação  $M_1$ , há duas transições habilitadas,  $t_2$  e  $t_3$ . As marcações decorrentes do disparo das transições são  $M_2$  e  $M_3$ , respectivamente, apresentadas na Figura 2.4, tem-se:

$$M_1[t_2 > M_2 = [0, 1, 1, 0, 0]^T$$

$$M_1[t_3 > M_3 = [1, 0, 0, 1, 0]^T.$$

Na marcação  $M_2$ , somente a transição  $t_3$  está habilitada. Seu disparo resulta na marcação  $M_4$ :

$$M_2[t_3 > M_4 = [0, 0, 1, 1, 0]^T.$$

Na marcação  $M_3$ , somente a transição  $t_2$  está habilitada. Seu disparo também resulta na marcação  $M_4$ . Para a marcação  $M_4$  somente a transição  $t_4$  está habilitada e seu disparo leva à marcação inicial  $M_0$ .

Uma seqüência de disparo de transições resultará em uma seqüência de marcações. Diz-se que a marcação  $M_n$  é alcançável a partir da marcação  $M_0$  se existe uma seqüência de disparo que transforma  $M_0$  em  $M_n$ . Uma seqüência de disparo é denotada por  $\sigma_d = M_0 t_1 M_1 t_2 M_2 \dots t_n M_n$  ou simplesmente  $\sigma_d = t_1 t_2 \dots t_n$ . Neste caso,  $M_n$  é alcançável a partir de  $M_0$  por  $\sigma$  e se escreve  $M_0[\sigma_d > M_n]$ . Para a rede da Figura 2.3, uma seqüência válida, a partir de  $M_0$ , é  $\sigma_d = t_1 t_2 t_3$  que resulta na marcação  $M_0$ ,  $M_0[\sigma_d > M_4]$ . Observa-se também que  $M_0[\sigma'_d > M_4]$  é válida para  $\sigma'_d = t_1 t_3 t_2$ .

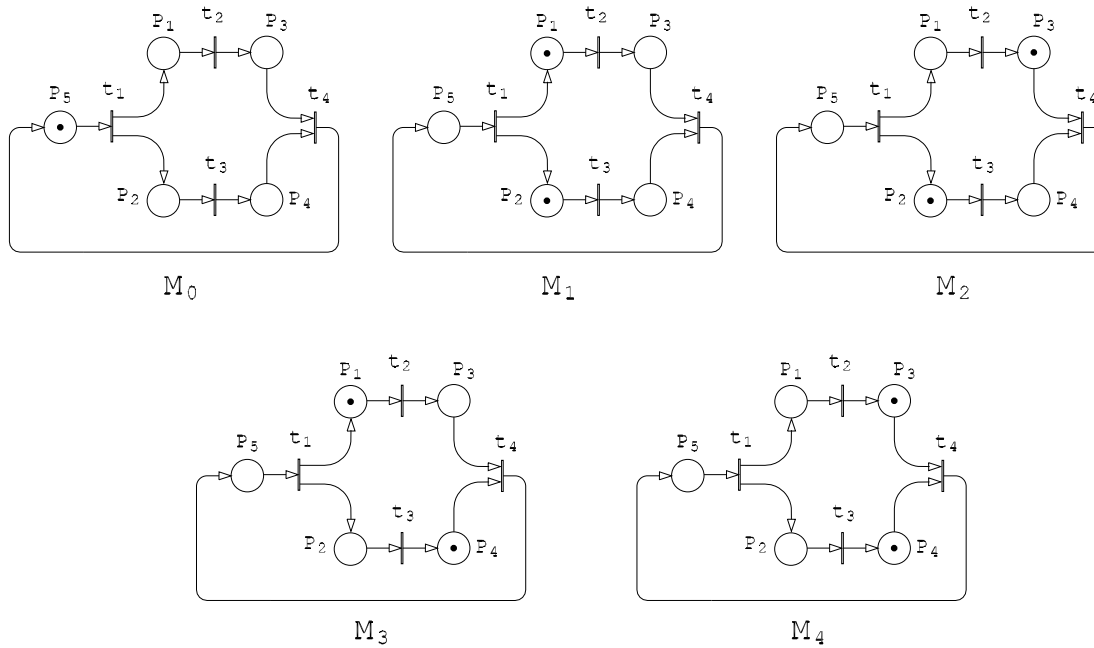


Figura 2.4: Exemplo de uma rede de Petri com suas marcações alcançáveis.

Ao conjunto formado por todos os estados alcançáveis a partir de  $M_0$ , chama-se conjunto de *alcançabilidade*. Este conjunto é representado por  $R(M_0)$ . O conjunto de todas as seqüências de disparo possíveis a partir de  $M_0$  em uma *RP* é denotado por  $L(M_0)$ .

### Limitabilidade e segurança

Uma rede de Petri *RP* é dita ser *k-limitada* ou simplesmente *limitada* se o número de fichas em cada um dos lugares não excede um número finito  $k$  para qualquer marcação alcançável a partir de  $M_0$ , isto é,  $M(p) \leq k$  para todo  $p$  e toda marcação  $M \in R(M_0)$ .

**Definição 7** Uma *RP* é dita ser *segura* (ou *binária*) para uma marcação  $M_0$  se ele é *1-limitada*, isto é, se para todas as marcações alcançáveis a partir de  $M_0$ , cada um dos lugares contém no máximo uma ficha.

Em redes de Petri os lugares podem representar depósitos e registradores para armazenamento intermediário de dados. Pela verificação de que uma rede é *limitada* ou *segura*, garante-se que não haverá estouro da capacidade dos depósitos ou registradores, não importando qual seqüência de disparo é realizada.

A rede da Figura 2.5(a) é *3-limitada*, isto é, para toda marcação alcançável  $M(p) \leq 3 \forall p$ , e a rede da Figura 2.5(b) é *ilimitada*, pois  $M(p_3)$  cresce indefinidamente. A rede da Figura 2.3 é uma rede *segura*.

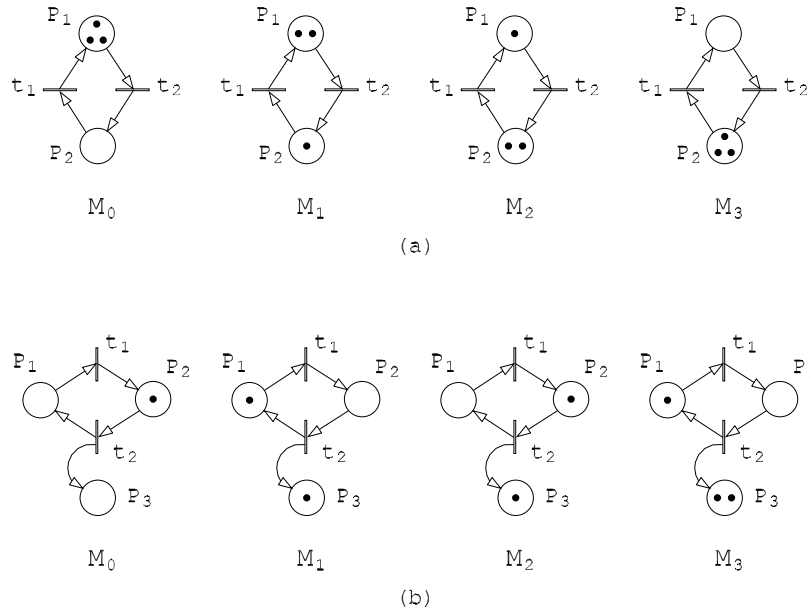


Figura 2.5: (a) Rede limitada. (b) Rede ilimitada.

### Vivacidade

O conceito de *vivacidade* está intimamente relacionado a ausência de *bloqueios* (*deadlocks*) na operação do sistema. Para ilustrar esse conceito, imagina-se um sistema de manufatura simples, composto por duas máquinas diferentes, um robô e um depósito intermediário. Nele, todas as peças do depósito de entrada precisam ser processadas pela máquina 1 e depois pela máquina 2, para fabricar o produto final. O robô é utilizado para carregar e descarregar as máquinas. O depósito intermediário é utilizado para armazenar peças processadas pela máquina 1 e tem capacidade unitária. Se o sistema atingir um estado no qual as máquinas estejam processando peças, o depósito intermediário contenha uma peça e, a máquina 1 terminar o processamento antes da máquina 2, então o processo entrará num estado de *bloqueio*. Isto ocorre porque o robô pegará a peça da máquina 1 para descarregá-la no depósito intermediário e não conseguirá pois o depósito está cheio. Desta forma, o robô não estará mais disponível para a carga e descarga das máquinas e o sistema não irá prosseguir.

A *vivacidade* garante a ausência de *bloqueios* no sistema modelado, não importando a seqüência de disparo escolhida. Para um melhor entendimento algumas definições são apresentadas a seguir.

**Definição 8** *Um deadlock (ou estado de bloqueio) é uma marcação na qual nenhuma transição está habilitada.*

**Definição 9** *Uma transição  $t_j$  é viva para uma marcação inicial  $M_0$  se para toda marcação alcançável  $M_n \in R(M_0)$  existe uma seqüência  $\sigma$  a partir de  $M_n$  tal que  $t_j \in \sigma$ .*

**Definição 10** Uma  $RP$  é viva para uma marcação inicial  $M_0$  se todas as transições são vivas para  $M_0$ .

Isto significa que eventualmente todas as transições da rede são disparáveis por alguma seqüência de disparo. Um exemplo de uma rede viva é a rede da Figura 2.3. Entretanto, de modo geral, a determinação da vivacidade é impraticável. Desse modo vários tipos de vivacidade foram definidos e podem ser mais facilmente analisados (SILVA, 2005). Uma transição  $t$  em uma  $RP$  é dita ser:

- $L0$ -viva (ou *morta*) se a transição nunca puder ser disparada a partir de  $M_0$ .
- $L1$ -viva se a transição for potencialmente disparável, isto é, se  $t$  pode ser disparada pelo menos uma vez em alguma seqüência de disparo em  $L(M_0)$ .
- $L2$ -viva se  $t$  pode ser disparada pelo menos um número inteiro  $k$ , positivo, de vezes em alguma seqüência de disparo em  $L(M_0)$ .
- $L3$ -viva se  $t$  aparece infinitamente, freqüentemente em alguma seqüência de disparo em  $L(M_0)$ .
- $L4$ -viva se  $t$  é  $L1$ -viva para todas as marcações  $M \in R(M_0)$ .

Seguindo esta classificação, uma  $RP$  é chamada  $Lk$  – viva, para marcação  $M_0$ , se toda transição na rede é  $Lk$  – viva.

## Reversibilidade e estado recorrente

Uma importante característica desejável na operação de sistemas reais, tais como sistemas de fabricação, é a capacidade desses sistemas recuperarem-se automaticamente de um erro. Por exemplo, um robô pode deixar cair uma peça, no transporte da mesma de um ponto a outro. Portanto, seria interessante que o robô pudesse recuperar-se desta situação sem nenhuma intervenção humana. Uma solução seria o retorno do estado de falha para o estado inicial. Outra seria o retorno para o estado correto precedente. Estas soluções estão relacionadas às propriedades de *reversibilidade* e *estado recorrente* de uma rede de Petri. Uma rede de Petri é dita ser *reversível* se, para cada marcação  $M \in R(M_0)$ ,  $M_0$  é alcançável a partir de  $M$ . Um estado  $M'$  é dito ser um *estado recorrente*, se para cada marcação  $M \in R(M_0)$ ,  $M'$  é alcançável a partir de  $M$ . Esta é uma propriedade menos restritiva e mais prática. Na Figura 2.6 são apresentadas duas redes, uma *reversível* e outra não.

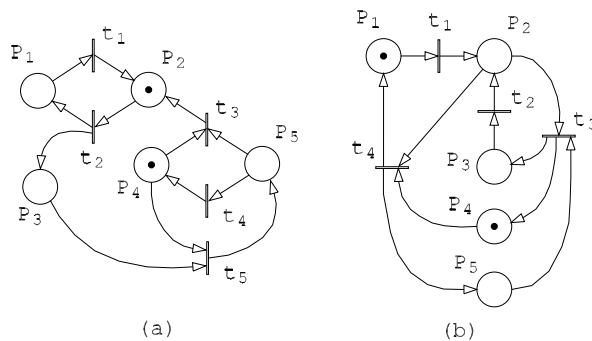


Figura 2.6: (a) Rede reversível. (b) Rede não reversível.

### 2.2.3 Método de análise comportamental

Os métodos de análise para redes de Petri podem ser classificados nos seguintes três grupos: 1) método da árvore de cobertura (*alcançabilidade*), 2) abordagem por equações matriciais (SILVA, 2005), e 3) técnicas de redução ou decomposição (MURATA, 1989). O primeiro método é limitado a pequenas redes devido a complexidade da explosão do espaço de estados. Por outro lado, o segundo e terceiro métodos são poderosos mas em muitos casos são aplicáveis somente a subclasses de redes de Petri ou a situações especiais. Nesta seção será tratado apenas do primeiro método (SILVA, 2005), pois ele será utilizado neste trabalho.

#### A Árvore de Cobertura

Este método baseia-se na enumeração de todas as possíveis marcações alcançadas a partir da marcação inicial. Começando com a marcação inicial  $M_0$ , pode-se construir o conjunto de alcançabilidade pelo disparo de todas as possíveis transições habilitadas em todas as marcações alcançadas a partir da marcação inicial  $M_0$ . Este processo resulta em uma representação em forma de árvore das marcações. Os nós representam marcações geradas a partir de  $M_0$  (a raiz) e seus sucessores, e cada um dos arcos representa o disparo de uma transição, que transforma uma marcação em outra.

Esta representação em árvore crescerá indefinidamente se a rede for ilimitada. Para manter finita a representação da árvore, é introduzido um símbolo especial  $w$ , que pode ser entendido como "infinito". Assim para qualquer inteiro  $n$ ,  $w > n$ ,  $w \pm n = w$  e  $w \geq w$ .

**Definição 11** Uma marcação  $M'$  cobre uma marcação  $M''$  se a marcação de cada lugar  $p_i$  de  $M'$  é maior ou igual a sua marcação em  $M''$ :

$$M' \geq M'' \iff M'(p_i) \geq M''(p_i), \forall(p_i).$$

A árvore de cobertura pode ser construída pelo seguinte algoritmo.

1. Rotule a marcação inicial  $M_0$  como raiz e etiquete-a como *nova*;
2. Enquanto existirem marcações do tipo *nova* faça:
  - (a) Selecione uma marcação etiquetada como *nova*  $M$ ;
  - (b) Se  $M$  é idêntica a uma marcação já existente, etiquete-a como *antiga*;
  - (c) Se nenhuma transição está habilitada em  $M$ , etiquete  $M$  como *bloqueada*;
  - (d) Enquanto existirem transições habilitadas em  $M$ , faça o seguinte para cada transição habilitada em  $M$ :
    - (i) Obtenha a marcação  $M'$  que resulta do disparo de  $t$  em  $M$ ;
    - (ii) Se no caminho da raiz para  $M$ , existir uma marcação  $M''$  tal que  $M'(p) \geq M''(p)$  para cada um dos lugares  $p$ , e  $M' \neq M''$ , isto é,  $M''$  é coberto, então troque  $M'(p)$  por  $w$  para cada  $p$  tal que  $M'(p) > M''(p)$ .
    - (iii) Introduza  $M'$  como um nó da árvore, ligue um arco, com rótulo  $t$ , de  $M$  para  $M'$  e etiquete  $M'$  como *nova*.

Um exemplo para este método está ilustrado na Figura 2.7. Para a marcação inicial  $M_0 = (1\ 0\ 0)^T$ , as duas transições  $t_2$  e  $t_3$  estão habilitadas. Disparando  $t_2$  transforma-se  $M_0$  em  $M_1 = (0\ 0\ 1)^T$ , que é um nó bloqueado, desde que nenhuma transição está habilitada nesta marcação. Agora, disparando  $t_3$  em  $M_0$  obtém-se  $M'_2 = (1\ 1\ 0)^T$ , que cobre  $M_0 = (1\ 0\ 0)^T$ . Por isto, a nova marcação é  $M_2 = (1\ w\ 0)^T$ , onde duas transições estão habilitadas,  $t_2$  e  $t_3$ , novamente. Disparando  $t_2$  transforma-se  $M_2$  em  $M_3 = (0\ w\ 1)^T$ , da qual  $t_4$  pode ser disparada, resultando em um nó antigo  $M_5 = M_2$ . Assim, se constrói a árvore de cobertura da rede da Figura 2.7(a) apresentada na Figura 2.7(b).

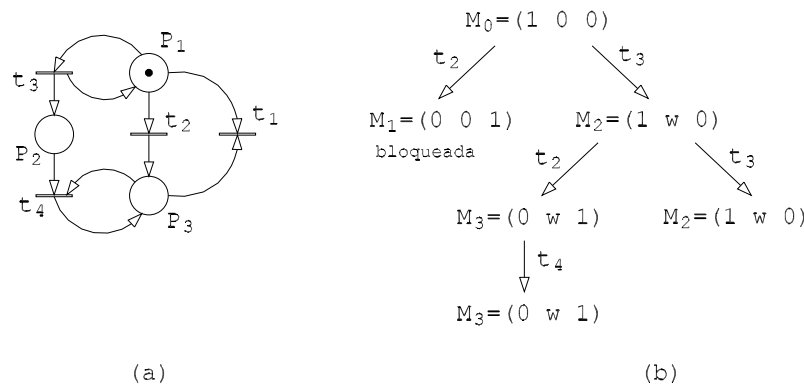


Figura 2.7: (a) Uma rede de Petri. (b) A árvore de cobertura.

Algumas das propriedades que podem ser estudadas utilizando a árvore de cobertura são as seguintes:

- A rede  $RP$  é *limitada* e assim  $R(M_0)$  é finita se e somente se  $w$  não aparece em qualquer nó da árvore. Para este caso a árvore é chamada *árvore de cobertura*.
- A rede  $RP$  é *segura* se e somente se cada nó da árvore contém somente zeros e uns.
- Uma transição é *morta* se e somente se ela não aparece como um rótulo de um arco na árvore.
- Se  $M$  é alcançado a partir de  $M_0$ , então existe um nó rotulado  $M'$  tal que  $M \leq M'$ .
- Se dado quaisquer dois nós na árvore de alcançabilidade, existir um caminho direto no qual todas as transições estão presentes, então a rede é *viva*.
- Se existe um caminho direto de qualquer nó para a marcação inicial na árvore, então a rede é *reversível*.

## 2.2.4 Modelagem com redes de Petri

Em sistemas a variáveis contínuas e a eventos discretos, tanto projetistas quanto analistas de sistemas de controle necessitam ter um modelo matemático das características do sistema e a relação entre elas para desenvolver seus projetos, suas análises e avaliações. Sabe-se da necessidade da obtenção de um modelo correto para o sistema, pois erros no modelo podem acarretar substancialmente o aumento do tempo e custo de desenvolvimento, bem como na ineficiência operacional. Para sistemas a variáveis contínuas existem leis físicas que governam os componentes e suas interconexões que podem ser usadas para construir o modelo, por exemplo, por equações diferenciais.

Em sistemas a eventos discretos, também se faz necessário um modelo matemático pelos mesmos motivos. As redes de Petri, como ferramenta gráfica e matemática, proporcionam um ambiente para modelagem, análise formal e projeto de sistemas a eventos discretos.

Nesta seção são apresentados modelos em rede de Petri de relações básicas entre processos ou operações encontradas em sistemas de manufatura, e também uma sugestão de método de modelagem para estes sistema.

### Modelos básicos de um sistema de manufatura

Um sistema de manufatura consiste de uma variedade de componentes como robôs, máquinas, matéria-prima, sensores, atuadores, computadores e acessórios relacionados a um processo específico. As características típicas exibidas pelas atividades contidas nos processos, tais como concorrência, sincronização e conflito, podem ser modeladas por redes de Petri. Deve-se identificar aqui a construção de redes de Petri para representar as características das atividades dos processos de sistema de manufatura. Na Figura 2.8, são apresentadas essas estruturas.

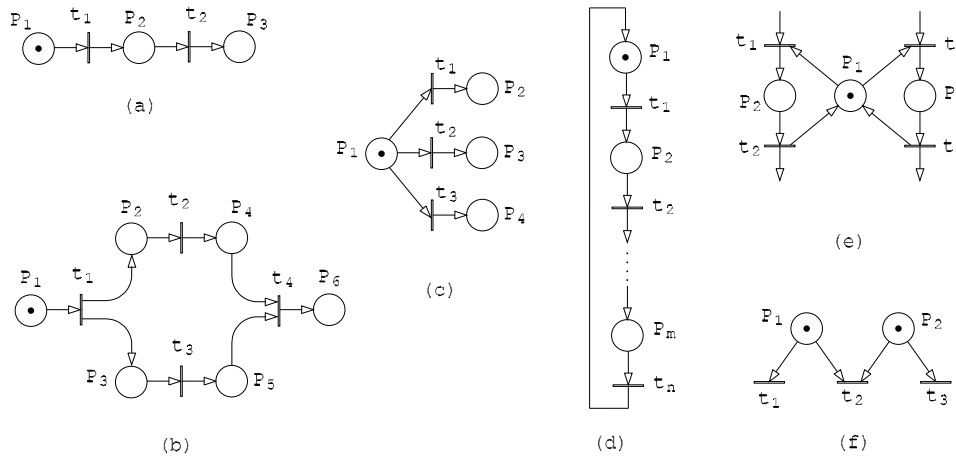


Figura 2.8: Operações fundamentais. (a) execução seqüencial; (b) concorrência e sincronização; (c) conflito; (d) cíclica; (e) exclusão mútua; (f) confusão.

(a) Execução seqüencial: Na Figura 2.8(a), a transição  $t_2$  pode disparar somente após o disparo de  $t_1$ . Isto impõe a restrição de precedência " $t_2$  após  $t_1$ ". Tais restrições de precedência são típicas da execução de peças em um sistema de fabricação. Também, esta estrutura em *RP* modela a relação causal entre estas atividades.

(b) Concorrência e Sincronização: Muitas operações de manufatura ocorrem em paralelo, iniciadas por um evento. Por exemplo, dois tipos diferentes de peças podem ser manufaturadas por duas linhas de manufatura separadas. Quando cada uma é completada, uma outra operação pode ocorrer. Esta situação exibe as características de concorrência e sincronização. Na Figura 2.8(b), as operações concorrentes,  $p_2$  e  $p_3$ , são indicadas pelo disparo da transição  $t_1$ , na ocorrência do evento associado a esta transição. O início da atividade  $p_6$  está sincronizado ao término das operações  $p_2$  e  $p_3$ , indicado por uma ficha em  $p_4$  e  $p_5$ .

(c) Conflito: Se duas ou mais operações podem ser iniciadas como consequência de uma outra, então duas ou mais transições serão as saídas de um mesmo lugar. Esta estrutura é chamada de conflito, escolha ou decisão; elas não podem nunca ser concorrentes. Elas são habilitadas na mesma marcação e a ocorrência de uma delas desabilita as demais. A rede da Figura 2.8(c) representa uma estrutura deste tipo. Nela as transições  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  estão em conflito.

Concorrência e conflito são complementares no seguinte sentido: Se duas transições estão habilitadas no mesmo estado então ou elas estão em concorrência ou em conflito.

(d) Cíclica: Se uma seqüência de operações segue uma após a outra e ao término da última inicia-se a primeira, então uma estrutura cíclica é formada entre essas operações. Na Figura 2.8(d) está ilustrado um exemplo de uma estrutura cíclica.



- (e) Exclusão mútua: Outra situação comum ocorre quando duas ou mais operações precisam compartilhar o mesmo recurso, por exemplo duas máquinas compartilhando o mesmo robô para carga e descarga das mesmas. Esta disputa pelo recurso leva a um conflito. Na Figura 2.8(e) é apresentada uma estrutura de exclusão mútua. Nela o recurso  $p_1$  é compartilhado pelas operações  $p_2$  e  $p_3$ .
- (f) Confusão: Confusão é a situação na qual concorrência e conflito co-existem. Um exemplo é apresentado na Figura 2.8(f). Tanto  $t_1$  como  $t_3$  são concorrentes, enquanto  $t_1$  e  $t_2$  estão em conflito, e  $t_2$  e  $t_3$  também estão em conflito.

### Módulos de depósitos em redes de Petri

Áreas de armazenagem, estoques, ou depósitos são muito comuns em sistemas de manufatura. Nestes sistemas, um depósito é comumente usado e a capacidade apropriada do mesmo pode levar a um bom desempenho do sistema. Um depósito simples ligando dois componentes, por exemplo, duas máquinas, podem ser modeladas em rede de Petri utilizando-se dois lugares como ilustrado na Figura 2.9(a). Tal estrutura é bastante utilizada na literatura. No entanto, devido ao uso de redes de Petri seguras neste trabalho, necessita-se de módulos de depósitos que sejam construídos em rede de Petri seguras.

### Módulos para depósitos em redes de Petri seguras

Alguns módulos para depósitos modelados através de rede de Petri segura são apresentados por (ZHOU; DICESARE, 1993). Por exemplo, no depósito de capacidade  $b$ , apresentado na Figura 2.9(b), os elementos são ordenados e sujeitos à política *FIFO* (*First In First Out*). Nesse caso, cada peça que entra no depósito precisa disparar  $b$  transições para sair do mesmo, isto é,  $t_2$  à  $t_{b+1}$ , e alcançar a operação seguinte.

Para evitar, que uma peça necessite disparar  $b$  transições para sair do depósito, e permitir que ela saia seja qual for sua posição no depósito, outro módulo em rede de Petri de um depósito com capacidade  $b$  é ilustrado na Figura 2.9(c) com marcação inicial  $(1, 0, \dots, 0)^T$  usando  $b + 1$  lugares e  $2(b + 1)$  transições.

Assumindo que  $b > 1$  e para  $i = 1, 2, \dots, b + 1$ , tem-se:

$t_i$  : transição que liga à operação precedente ao depósito;

$r_i$  : transição que liga à operação sucessiva ao depósito;

$p_i$  : lugar, e se ele é marcado, o depósito possui  $i - 1$  peças.

Portanto, se  $p_i$  estiver marcado, então o depósito está vazio. Se  $p_{b+1}$  estiver marcado, então o depósito está cheio.

Considerando que a estação de trabalho que está antes de um depósito possa produzir uma peça de cada vez e que a estação de trabalho que está depois necessita consumir duas

peças por vez; então, os módulos de depósito, modelados por redes de Petri seguras, mostrados anteriormente não são aplicáveis. Uma realização está apresentada na Figura 2.9(d). É fácil verificar na Figura 2.9(d) que quando o depósito contém uma única peça, isto é,  $m(p_2) = 1$ , a operação após o depósito não pode ser realizada. Quando o depósito possuir duas ou mais peças, a operação seguinte pode ser realizada.

Esses módulos de depósitos em redes de Petri seguras oferecem a possibilidade de explorar as operações internas de um depósito.

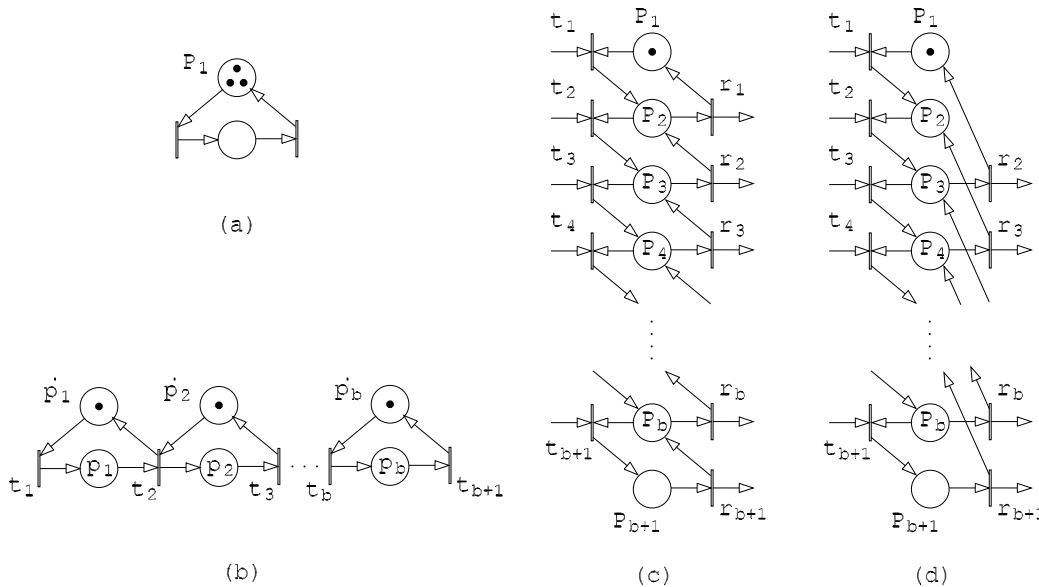


Figura 2.9: Modelos de depósitos.

### Método de modelagem

Dado a especificação de um sistema de produção, modelar o sistema como uma rede de Petri tal que sua estrutura e marcação inicial o torne *seguro*, *reversível*, *operacional sem bloqueio*. Então o resultado do modelo de rede de Petri pode ser transformado para código de controle de um sistema supervisorio para execução do sistema de produção.

Uma metodologia para modelagem é a chave para aplicação prática das redes de Petri. O procedimento de modelagem nesse trabalho é baseado no método proposto por Zhou (ZHOU; DICESARE, 1993). Nesse método o modelo do sistema pode ser obtido através dos seguintes passos:

1. Identificar as atividades e os recursos existentes no sistema de produção.
2. Identificar as relações de seqüência, concorrência, conflito e exclusão mútua das atividades do sistema de produção.

3. Ordenar as atividades que formam uma seqüência pela ordem de precedência. Adicionar a esta seqüência as atividades de conflito, as concorrentes e as que se excluem mutuamente.
4. Para cada atividade: criar e rotular um lugar para representar a situação da atividade; adicionar uma transição (início da atividade) com um arco(s) para o(s) lugar(es); adicionar uma transição (término da atividade) com um arco(s) que parta(m) do(s) lugar(es). Observar que uma transição de início de atividade poderá ter dois ou mais lugares de saída representando o paralelismo das atividades, ou que algumas transições de início terão o mesmo lugar de entrada representando o conflito de atividades. Quando a rede for executada, uma ficha em um lugar de atividade indicará que a atividade está sendo executada. O início e o término de uma atividade é marcado pelos disparos das transições de entrada e saída do lugar que a representa e podem também representar o início da próxima atividade.
5. Para cada atividade: se ainda não houver sido criado, criar e rotular um lugar para cada recurso que precisa estar disponível para o início da atividade. Conecte todos os lugares à transição que representa o início da atividade. Criar arcos de saída para conectar as transições de término de atividade aos lugares que representam recursos que tornam-se disponíveis ao término da atividade.
6. Especificar a marcação inicial.

## 2.3 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as definições e propriedades de redes de Petri e suas aplicações na modelagem de um processo industrial. As propriedades de redes de Petri foram exemplificadas através de figuras, onde foram mostradas suas aplicações e relações com as atividades de um processo industrial. Foram apresentados modelos básicos de um sistema de manufatura e um método de análise comportamental, no caso, a árvore de cobertura.

# Capítulo 3

## Dessalinização

### 3.1 Introdução

A dessalinização é um processo pelo qual se remove os sais da água, tornando-a potável. Diferentes tecnologias de dessalinização são usadas com o propósito de suprir a demanda de água potável. Estas tecnologias podem ser divididas em dois grupos distintos de acordo com as características físicas do processo. Existem os processos térmicos e os processos de membrana.

### 3.2 Processos Térmicos

Os principais processos térmicos, em particular a destilação, são: Destilação flash com múltiplo estágio (MSF); Destilação múltiplo efeito (MED) e Destilação por compressão de vapor (VC).

#### 3.2.1 Destilação flash

Na destilação flash com múltiplo estágio (MSF) - a água é primeiramente aquecida sob pressão, então a pressão é subitamente reduzida. Isto resulta numa evaporação de uma parte da água. Uma configuração típica é mostrada na Figura 3.1. Evaporação flash geralmente acontece em vários estágios, cada estágio envolvendo temperaturas relativamente pequenas e diferentes pressões. Infelizmente, o percentual da água de alimentação que é evaporada em uma destilação flash é relativamente pequena, necessitando de quatro vezes o número de estágios requerido pela destilação múltiplo efeito, para alcançar a mesma eficiência de vapor. Entretanto, um simples vaso pode abrigar vários estágios, reduzindo muito os custos de implantação (AMJAD, 1993).

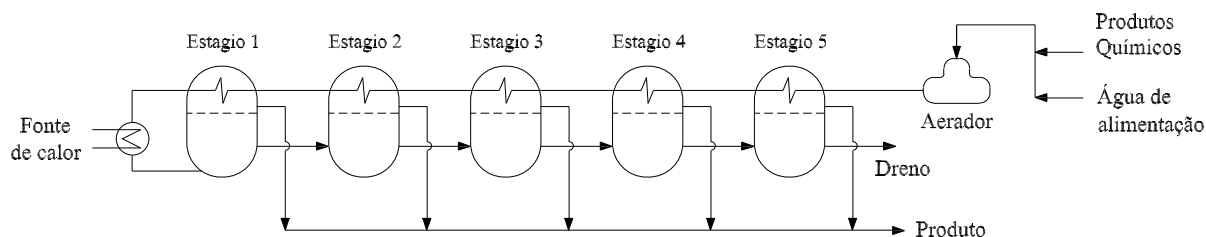


Figura 3.1: Destilação Flash Múltiplo Estágio (MSF).

### 3.2.2 Destilação múltiplo efeito

Na destilação múltiplo efeito (MED) - a água é convertida em vapor e depois condensada. Uma configuração comum é conhecida como evaporação múltiplo-efeito, onde cada "efeito" do sistema é igual a uma unidade de destilação. Uma fonte de calor produz vapor no primeiro estágio com água de alimentação. Este vapor passa pelo segundo estágio, troca calor e condensa produzindo água potável. Este processo se repete até o último estágio (AMJAD, 1993). Este processo é mostrado na Figura 3.2.

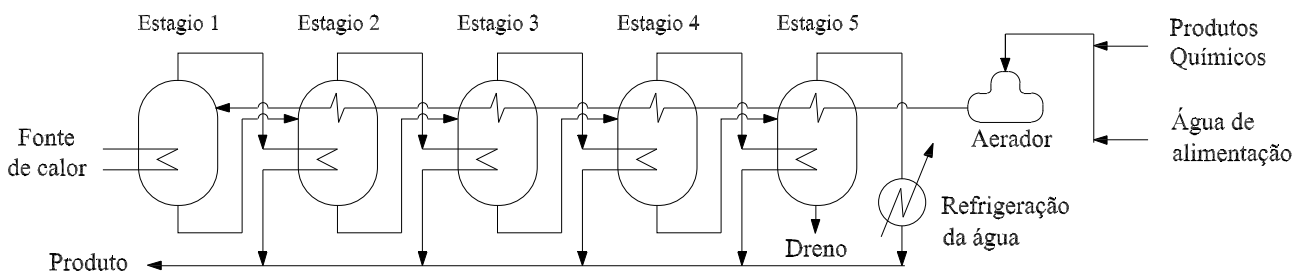


Figura 3.2: Destilação Múltiplo Efeito (MED).

### 3.2.3 Destilação por compressão de vapor

Na destilação por compressão de vapor (VC) - a água é evaporada e então pressurizada, através de compressor, levando-a a condensar a altas temperaturas, portanto fornecendo uma fonte de calor latente para evaporações mais adiante. A diferença de temperatura entre o vapor e o produto é relativamente pequena, reduzindo a compressão requerida mas necessitando de troca de calor relativamente grande com a área superficial. Um diagrama deste sistema é mostrado na Figura 3.3. Este processo é apropriado para produção relativamente pequena (aproximadamente 10% em relação a OI) de água purificada, onde não há energia térmica disponível (AMJAD, 1993).

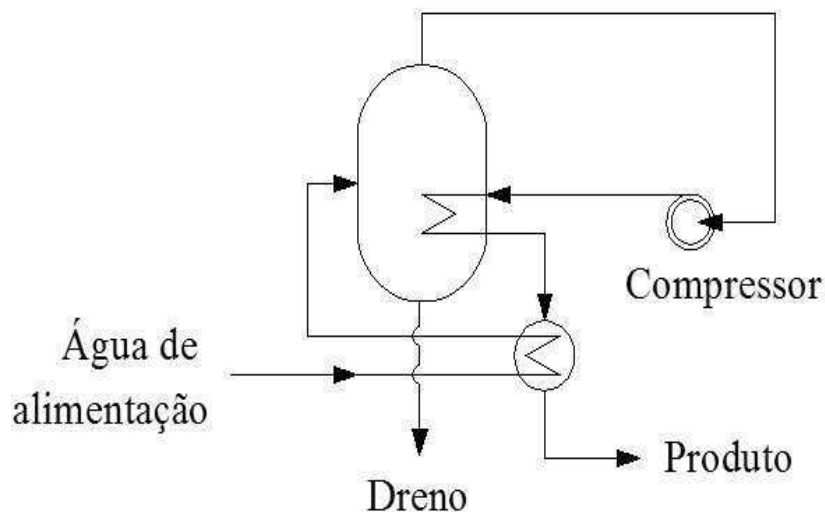


Figura 3.3: Destilação por Compressão de Vapor (VC).

### 3.3 Processos de Membrana

Quanto aos processos de membrana o principal é Osmose Inversa (OI). Este processo passou a ser aplicado na indústria desde a década de 80, utilizando-se membranas semipermeáveis. Isto levou à buscar melhorias contínuas e conseqüentemente redução de custos, tanto pelo desenvolvimento da tecnologia quanto pelo aumento na escala de produção (OLIVEIRA, 2002).

As energias usadas nos processos de dessalinização são principalmente eletricidade e calor. As exigências de energia para plantas de dessalinização dependem da salinidade, temperatura da água de alimentação, qualidade da água produzida e da tecnologia utilizada.

A energia apresenta aproximadamente de 25 a 40% do custo total do processo de dessalinização da água (TSIOURTIS, 2001).

Os avanços tecnológicos em transferências de calor, tecnologia de membrana, recuperação do mecanismo de energia, manufatura do tratamento químico da água e combinação dos métodos ou processos, têm reduzido muito o consumo de energia por metro cúbico (TSIOURTIS, 2001).

A OI é uma técnica de filtração que remove os sais constituintes dissolvidos em solventes. Com tamanhos de poros muito pequenos, mesmo a maioria das espécies iônicas não atravessam as membranas de OI, permitindo a dessalinização de águas salgadas. Para concentrações baixas de sais na solução, o processo pode ser energeticamente eficiente em relação aos métodos comumente usados no tratamento da água como a destilação térmica (OLIVEIRA, 2002), conforme apresentado na tabela 3.1.

Analisando a tabela 3.1 observa-se que o processo de osmose inversa possui o menor valor de energia total consumida, sendo assim utilizado para o dimensionamento do sistema de energia proposto.

Tabela 3.1: Consumo de Energia para destilação e Osmose Inversa para dessalinização, para água do mar

<b>Processos</b>	<b>Energia total consumida</b> ( <i>kWh/m<sup>3</sup> prod.</i> )	<b>Temperatura máxima de operação (°C)</b>
Destilação flash com múltiplo estágio (MSF)	9,52	95
Destilação múltiplo efeito (MED)	6,87	75
Destilação por compressão de vapor (VC)	9,25	100
Osmose Inversa (OI)	4,76	45

### 3.4 Osmose

O fenômeno da osmose é de fundamental importância na natureza já que o transporte seletivo através de membranas é essencial a vida e começou a ser estudado há mais de duzentos anos.

A osmose natural ocorre quando duas soluções de concentrações diferentes encontram-se separadas por uma membrana semipermeável. Neste caso, a água (solvente) da solução menos concentrada tenderá a passar para o lado da solução de maior salinidade. Com isto, esta solução mais concentrada, ao receber mais solvente, se dilui, num processo impulsionado por uma grandeza chamada "pressão osmótica", até que as duas soluções atinjam o equilíbrio osmótico (OLIVEIRA, 2002).

A osmose inversa é um processo induzido que ocorre quando se aplica uma pressão no lado da solução mais salina ou mais concentrada, revertendo-se a tendência natural. Neste caso, a água da solução salina passa para o lado da solução menos concentrada, ficando retidos os íons dos sais nela dissolvidos.

Na Figura 3.4 é apresentado o processo de osmose natural e osmose inversa: a) duas soluções, uma salina e outra sem sal, separadas por uma membrana semipermeável; b) a água pura dilui a salgada até que seja atingido o equilíbrio osmótico; c) a aplicação de uma pressão superior à diferença de pressão hidrostática inverte o processo.

A pressão osmótica  $\pi$  que uma solução iônica exerce depende da concentração do soluto, da temperatura absoluta da solução, e da espécie de íons presentes. É dada pela equação 3.1 (Equação de van't Hoff) (FILHO, 2000).

$$\pi = \sum \nu_i c_i RT \quad (3.1)$$

Onde  $\nu_i$  é o  $n^\circ$  de íons formados na dissociação do soluto,  $c_i$  sua concentração molar  $mol/L$ ,  $R$  é a constante universal dos gases perfeitos ( $= 0,082 kgfL/(cm^2 molK)$ ) e  $T$  a temperatura absoluta da solução ( $K$ ).

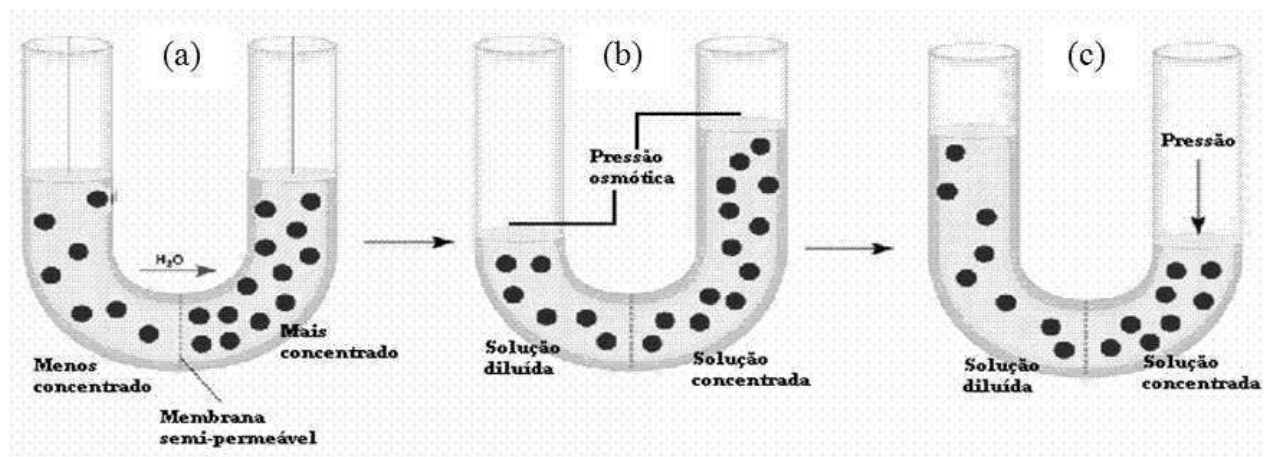


Figura 3.4: Processo de Osmose Natural e Inversa.

Esta equação é válida para soluções diluídas. Para soluções concentradas ela é multiplicada por um coeficiente osmótico que é estimado de dados de pressão de vapor ou do ponto de congelamento da solução avaliada. Na prática, a equação de van't Hoff pode ser usada para água salobra.

No processo de osmose inversa tem-se que aplicar uma pressão superior à pressão osmótica na membrana para que haja produção de permeado.

### 3.5 Fluxo de Permeado e de Soluto

Na osmose inversa os sais dissolvidos e moléculas orgânicas retidas na superfície da membrana causam o aumento da concentração próxima à superfície considerada. Este aumento de concentração amplia a diferença de pressão osmótica da solução, o que tende a diminuir o fluxo do permeado (FILHO, 2000). Os fluxos de permeado e de soluto são dados respectivamente pelas equações 3.2 e 3.3

$$J_w = k_w(\Delta P - \Delta\pi) = Q_p/A \quad (3.2)$$

onde:  $J_w$  é a taxa de fluxo de permeado,  $k_w$  o coeficiente de transferência de massa do solvente,  $\Delta P$  é o gradiente de pressão aplicada,  $\Delta\pi$  é o gradiente de pressão osmótica,  $Q_p$  é a vazão de permeado e  $A$  é a área de permeação da membrana.

$$J_i = k_i\Delta C = Q_p C_p/A \quad (3.3)$$

onde:  $J_i$  é fluxo máximo do soluto,  $k_i$  o coeficiente de transferência de massa do soluto,  $\Delta C$  é o gradiente de concentração,  $C_p$  é a concentração do permeado. onde,  $\Delta P$ ,  $\Delta\pi$  e  $\Delta C$  são dadas pelas equações 3.4, 3.5 e 3.6.



$$\Delta P = (P_a + P_c)/2 - P_p \quad (3.4)$$

$$\Delta\pi = (\pi_a + \pi_c)/2 - \pi_p \quad (3.5)$$

$$\Delta C = (C_a + C_c)/2 - C_p \quad (3.6)$$

onde:

$P_a$ ,  $P_c$  e  $P_p$  são a pressão da alimentação, do concentrado e do permeado respectivamente;

$\pi_a$ ,  $\pi_c$  e  $\pi_p$  são a pressão osmótica da alimentação, do concentrado e do permeado respectivamente;

$C_a$ ,  $C_c$  e  $C_p$  são a concentração da alimentação, do concentrado e do permeado respectivamente.

A recuperação  $r$  (%) refere-se à razão da vazão de água permeada  $Q_p$  em relação a vazão da água de alimentação  $Q_a$ . A recuperação de um sistema pode ser definida pela equação 3.7.

$$r = (Q_p/Q_a)100\%. \quad (3.7)$$

### 3.6 Balanço de Energia no Sistema de Osmose Inversa

Este balanço de energia (FOUST et al., 1982) pode ser feito para o Sistema Experimental de osmose inversa deste trabalho entre os pontos 1 e 2 da Figura 3.5 e tem por objetivo obter a potência da bomba de alta pressão. O balanço de energia é definido pela equação 3.8.

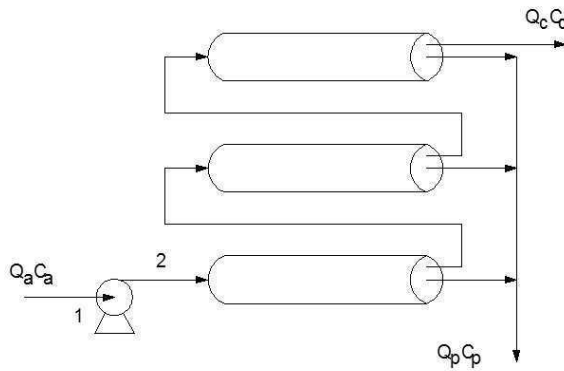


Figura 3.5: Sistema Experimental de Osmose Inversa.

$$\Delta E + \Delta(v_f^2/2g_c\varepsilon_c) + \Delta Zg_g/g_c + \Delta(P_aV) = Q_s - \sum F - W_f \quad (3.8)$$

onde:  $\Delta E$  é a variação de energia interna,  $\Delta(v_f^2/2g_c\varepsilon)$  é a variação de energia cinética do fluido,  $\Delta Zg_g/g_c$  é a variação de energia potencial,  $\Delta(P_aV)$  é a variação de energia de volume,  $Q_s$  é o calor trocado entre o fluido e o ambiente,  $\sum F$  é o somatório das perdas de energia por atrito e  $W_f$  é o trabalho de eixo produzido.

Para o balanço de energia, faz-se as seguintes considerações:

$$\begin{aligned}\Delta E &= 0 \text{ (não há variação de energia interna);} \\ \Delta v_f^2/2g_c\varepsilon &= 0 \text{ (não há variação de energia cinética do fluido escoante);} \\ \Delta Zg_g/g_c &= 0 \text{ (não há variação de energia potencial do fluido escoante);} \\ Q_s &= 0 \text{ (não há troca de calor no sistema);} \\ \sum F &= 0 \text{ (não há perdas de energia por atrito)}\end{aligned}$$

Utilizando as considerações anteriores, a equação 3.8 pode ser escrita como:

$$-W_f = P_{a1}V_1 - P_{a2}V_2 \quad (3.9)$$

onde:  $P_{a1}$  e  $P_{a2}$  são a pressão nos pontos 1 e 2 da Figura 3.5 e  $V_1$  e  $V_2$  são os volumes específicos nestes pontos.

Como

$$V_1 = 1/\rho_a e V_2 = 1/\rho_a \quad (3.10)$$

Tem-se

$$-W_f = (P_{a1} - P_{a2})/\rho_a. \quad (3.11)$$

Sendo a vazão mássica  $w$  dada por

$$w = \rho_a Q_a. \quad (3.12)$$

A potência elétrica  $P$  é dada pelo produto entre o trabalho realizado  $W_f$  e vazão mássica  $w$ , dividido pela eficiência do motor  $\eta_m$  e da bomba  $\eta_b$

$$P = (W_f w)/\eta_m \eta_b = [(P_{a2} - P_{a1})/(\rho_a \eta_m \eta_b)] \rho_a Q_a = (P_{a2} - P_{a1}) Q_a / \eta_m \eta_b. \quad (3.13)$$

### 3.7 Consumo de Energia

A energia  $E$  necessária para plantas de osmose inversa de baixa pressão pode ser calculada através da equação 3.14, dados a pressão de alimentação  $P_a$ , a recuperação  $r$  e a eficiência da bomba  $\eta_b$  e do motor  $\eta_m$  (FILHO, 2000).

$$E_{teórico} = (0,0287P_a)/(r\eta_m\eta_b). \quad (3.14)$$

A constante 0,0287 serve de fator de conversão da energia de  $kWh/kgal$  para  $kWh/m^3$  e da pressão de coluna de água dada em  $ft$  para  $kgf/cm^2$ . Portanto o resultado será dado em  $kWh/m^3$  de água permeada.

### 3.8 Dessalinizador via Osmose Inversa (OI)

A osmose inversa (OI) é uma operação unitária que através de membranas semipermeáveis e com o auxílio de um gradiente de pressão, pode rejeitar sais inorgânicos de baixo peso molecular, como também pequenas moléculas orgânicas (OLIVEIRA, 2002). As moléculas de água, por outro lado, passam livremente através da superfície da membrana, criando uma corrente de água purificada. A parcela restante da água de alimentação que não atravessa a membrana, conhecida como concentrado, ou rejeito, transporta os compostos rejeitados pela mesma.

A osmose inversa é um método de dessalinização de grande sucesso aplicado para água do mar, água salobra e água industrial. Para o processo ocorrer, depende das propriedades de semipermeabilidade da membrana e da aplicação de uma pressão superior a pressão osmótica da solução. A membrana atua como uma barreira a todos os sais dissolvidos e moléculas inorgânicas com peso molecular acima de  $100 g/mol$ . As rejeições típicas de sais dissolvidos para águas salobras atingem a marca de 95 à 99% e para a água do mar de 25 à 45% (OLIVEIRA, 2002).

Na Figura 3.6 é apresentado o diagrama de um sistema de dessalinização com seus componentes. Começando pela tomada de água bruta existente no local, que neste caso é um poço tubular, porém, nada impede da fonte de água bruta ser um rio ou outra fonte qualquer. Continuando o fluxo do processo, tem uma bomba para transportar a água deste poço até o tanque de água bruta e uma bomba auxiliar que transporta água bruta deste tanque para o processo de dessalinização. Na seqüência, existe um filtro, uma bomba dosadora e a bomba de alta pressão. Esta bomba eleva a pressão e faz passar a água pelas membranas, onde a água permeada vai para o tanque de água potável e água não permeada vai para o tanque de concentrado.

Existe ainda o processo de limpeza química que aparece na Figura 3.6 como se fosse uma retro alimentação das membranas. Na verdade o que ela faz é passar um produto químico predeterminado, por entre as membranas. Após a limpeza química, é executado um enxágüe das membranas com água potável. Por este motivo é que aparece nessa figura um tanque de água potável antes da bomba de retro lavagem.

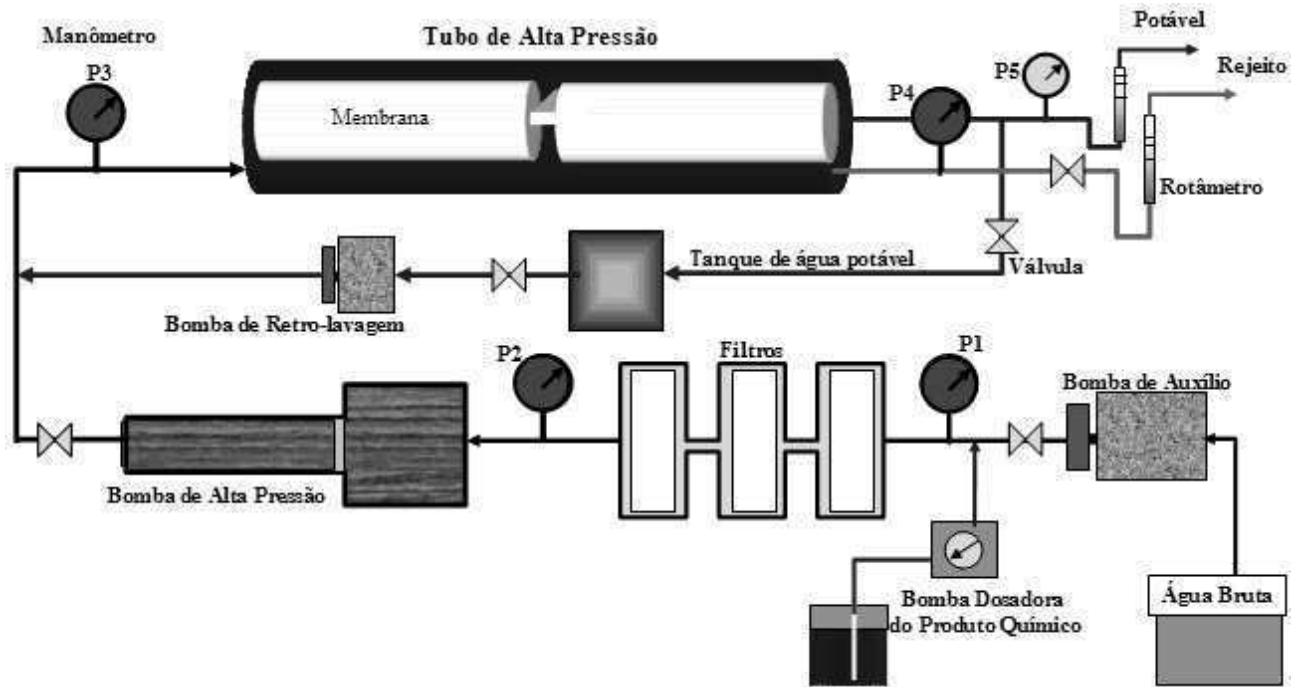


Figura 3.6: Diagrama de um Sistema de Dessalinização.

### 3.9 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as características básicas de um processo de dessalinização. Alguns processos de separação de sais da água, como osmose inversa, foram mostrados. O processo da osmose inversa proporciona um menor custo de implantação e de operação, inclusive com menor consumo de energia. Foi mostrado também o diagrama da planta, com todos os equipamentos necessários para o seu funcionamento.

# Capítulo 4

## Sistema Híbrido de Geração de Energia

### 4.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado um breve estudo sobre as fontes de energias renováveis, painel fotovoltaico e turbina eólica, banco de baterias e o grupo gerador, os quais farão parte do sistema híbrido de energia que alimentará o sistema de dessalinização.

### 4.2 Painéis Fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos produzem energia elétrica a partir da luz solar que incide sobre ele. As principais vantagens de se usar painéis fotovoltaicos em lugares longínquos e sem mão de obra especializada são:

- Manutenção extremamente simples, consistindo apenas de limpeza dos painéis e reaperto das conexões elétricas;
- Não necessita combustível.

#### 4.2.1 Painéis utilizados para realizar experimentos

O Gerador Fotovoltaico usado para efetuar os experimentos é composto por 4 painéis *SX80 Solarex* do fabricante Kyocera Solar Inc., conectados em paralelo, sendo que cada painel contém 36 células solares, conectadas todas em série, para alcançar os seguintes valores, referentes a uma radiação incidente de  $1.000 \text{ W/m}^2$ :

$V_{pmax} = 16,8 \text{ V}$  - Tensão nominal máxima

$V_{oc} = 21,0 \text{ V}$  - Tensão de circuito aberto

$W_p = 80 \text{ W}$  - Potência nominal máxima

$I_{cc} = 5,17 \text{ A}$  - Corrente de curto circuito

$I_{pmax} = 4,75 A$  - Corrente nominal máxima

Cada célula tem uma área  $A_{cel} = 165 cm^2$  e

cada painel tem uma área  $A_p = 0,5940 m^2$ .

Estes painéis serão montados em uma base fixa e a inclinação dos mesmos em relação a horizontal deverá ser regulada em torno da latitude de Campina Grande que é  $6^{\circ}30'$ , acrescida de  $+/- 10^{\circ}$ , o qual resultará num ângulo variando entre  $-3^{\circ}30'$  e  $+16^{\circ}30'$ . Entretanto, esta inclinação nunca deverá ser inferior a  $10^{\circ}$  para facilitar a auto limpeza dos módulos. Portanto serão regulados a uma inclinação de  $13^{\circ}30' +/- 3^{\circ}30'$ , voltados para o Norte Geográfico.

Foram realizados alguns experimentos com painéis fotovoltaicos, sem o dispositivo de MPPT, durante alguns dias. Mediu-se a tensão de circuito aberto e também do circuito com uma carga linear acoplada (resistência de  $3,3 \Omega$ ). Foi constatado que quando o painel está alimentando uma carga, a pouca incidência de radiação solar no mesmo é crítica, pois tanto a corrente quanto a tensão diminui drasticamente e conseqüentemente a potência fornecida à carga também.

Os resultados dos experimentos estão apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2. A Figura 4.2 é um detalhamento da Figura 4.1. Enquanto na Figura 4.1 é mostrado um intervalo de tempo de 5 : 00 às 18 : 00 horas, na Figura 4.2 é mostrado apenas um intervalo de tempo de 11 : 00 às 12 : 00 horas. Com isto é possível observar quão grande é a variação de tensão, corrente e conseqüentemente de potência, dos painéis fotovoltaicos, quando estes são ligados à uma carga, submetidos à variações da radiação solar.

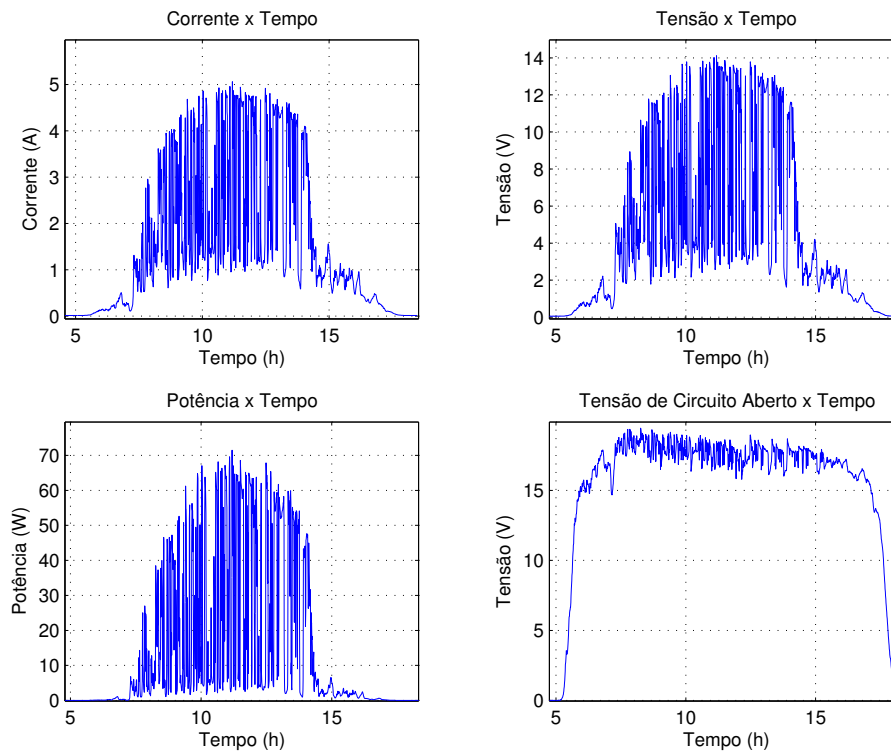


Figura 4.1: Influência da Radiação Solar na Potência Gerada.

A aquisição de dados foi feita do seguinte modo: Uma medição a cada 50 *ms* e para cada 650 medições uma média aritmética, armazenado como um único ponto. Ao longo de um dia são armazenados 1.600 pontos, os quais formam os gráficos das Figuras 4.1 e 4.2.

Com exceção da tensão de circuito aberto, é grande a variação nas amplitudes de corrente, tensão e potência, quando varia a incidência de radiação solar sobre os painéis. Para uma melhor análise destas variações de amplitudes, é necessário ampliar os gráficos da Figura 4.1. Portanto, serão mostrados os gráficos da Figura 4.2 num intervalo de tempo de 1 hora apenas.

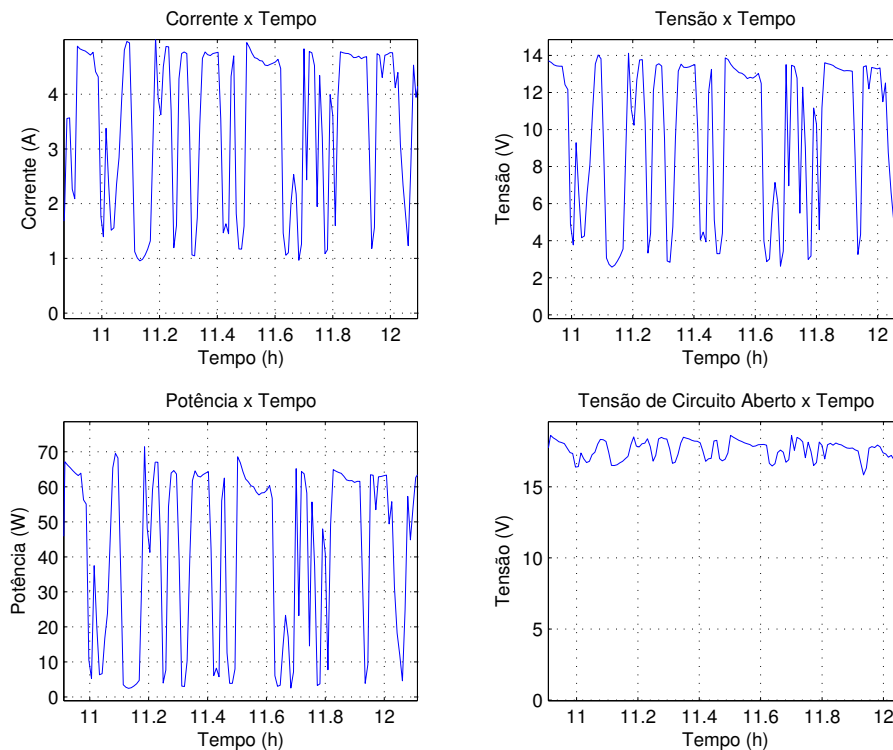


Figura 4.2: Detalhes da Figura 4.1 numa escala maior.

## 4.2.2 Dimensionamento dos painéis

Será feito um dimensionamento dos painéis necessários para suprir as cargas relacionadas no capítulo 6. Serão considerados painéis fotovoltaicos de fabricação Kyocera Solar ref. 110  $W_p$ ;  $V_N = 16,8$  V e  $I_N = 6,67$  A. Estes painéis estão disponíveis no LABDES - UFCG.

Como foi visto na seção anterior, a potência elétrica gerada pelo painel é diretamente proporcional a radiação incidente no mesmo. Portanto, será elaborado um dimensionamento considerando quatro níveis distintos de radiação incidente, mostrado na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Dimensionamento dos painéis fotovoltaicos

Descrição	Unidade	Radiação1	Radiação2	Radiação3	Radiação4
Irradiação no local	$W/m^2$	1.000	800	600	400
Tensão nominal por painel	$V$	16,8	14,8	12,2	8,9
Corrente nominal por painel	$A$	6,67	5,41	4,11	2,78
Potência máxima por painel	$W$	112,1	80,1	50,1	24,7
Tensão das cargas	$V$	24,0	24,0	24,0	24,0
Corrente das cargas *	$A$	75,0	75,0	75,0	75,0
Potência das cargas	$W$	1.927,0	1.927,0	1.927,0	1.927,0
Painéis em série - p/obter tensão necessária	$un$	02	02	02	03
Painéis em paralelo - p/obter corrente necessária	$un$	12	14	19	27
Quantidade total de painéis	$un$	24	28	38	81
Potência total do conjunto	$W$	2690	2242	1903	2000
Tensão total do conjunto	$V$	33,6	29,6	24,4	26,7
Corrente total do conjunto	$A$	80,0	75,7	78,1	75,1

\* - Valor obtido da última linha da Tabela 6.1, do capítulo 6.

Análise dos resultados da Tabela 4.1:

- 1) Coluna de  $P = 1000 W/m^2$ : A vantagem é o menor custo de implementação, pois serão apenas 24 painéis solares. A desvantagem é que esta estrutura só alimentaria as cargas quando a irradiação atingisse o ponto máximo, ou seja, instantes raros durante o dia, veja o gráfico da Figura 4.1;
- 2) Coluna de  $P = 400 W/m^2$ : A vantagem desta configuração é que os painéis teriam energia gerada para alimentar as cargas durante quase todo o tempo do dia, entre 08 : 00 e 16 : 00h. A desvantagem seria o custo quase quadruplicado da implementação da mesma;
- 3) Coluna de  $P = 800 W/m^2$ : Esta configuração teria, em relação ao primeiro item, um custo maior de implementação ( $\pm 17\%$ ), porém um aumento da energia gerada diária, satisfazendo as necessidades das cargas em intervalos de tempo maiores;
- 4) Coluna de  $P = 600 W/m^2$ : Considerando os gráficos da Figura 4.1 e os custos inerentes à compra dos painéis, esta deverá ser a opção de melhor custo benefício. Esta alternativa teria um custo de  $\pm 60\%$  maior com relação ao primeiro item, porém tem um aumento significativo em relação ao aproveitamento da irradiação incidente, disponível ao longo do dia.



Fazendo uma análise sobre os dados de irradiação solar, coletados pelo Laboratório de Meteorologia da UFCG, se obteve os seguintes resultados: A) A radiação solar média mensal de janeiro à agosto de 2005, no horário de 8 : 00 às 16 : 00h, foi respectivamente 663, 5; 631, 1; 668, 2; 559, 9; 477, 9; 370, 9; 496, 6; 454, 8  $W/m^2$ . Observa-se que os valores começam a decrescer em abril, isto é devido ao período de chuvas. B) Janeiro/2005 foi escolhido então para mostrar na Figura 4.3, sua radiação solar entre 8 : 00 e 16 : 00h, isto porque não é o mês de maior nem menor radiação média mensal, dentre os meses sem influência de chuvas. C) Dentro da análise sobre a radiação solar de janeiro/2005, chegou-se aos seguintes resultados: i) incidência maior que  $600W/m^2$  totalizou uma média diária de  $4h40min$ ; ii) Entre  $500W/m^2$  e  $600W/m^2$  totalizou  $60min$ ; iii) Entre  $400W/m^2$  e  $500W/m^2$  totalizou  $50min$ .

A partir desta análise pode-se concluir que a melhor condição custo benefício para dimensionamento dos painéis fotovoltaicos é a condição indicada na coluna da tabela 4.1 que especifica  $600W/m^2$ . O dimensionamento dos painéis fotovoltaicos foi realizado levando-se em consideração a plataforma de dessalinização apresentado no capítulo 3.

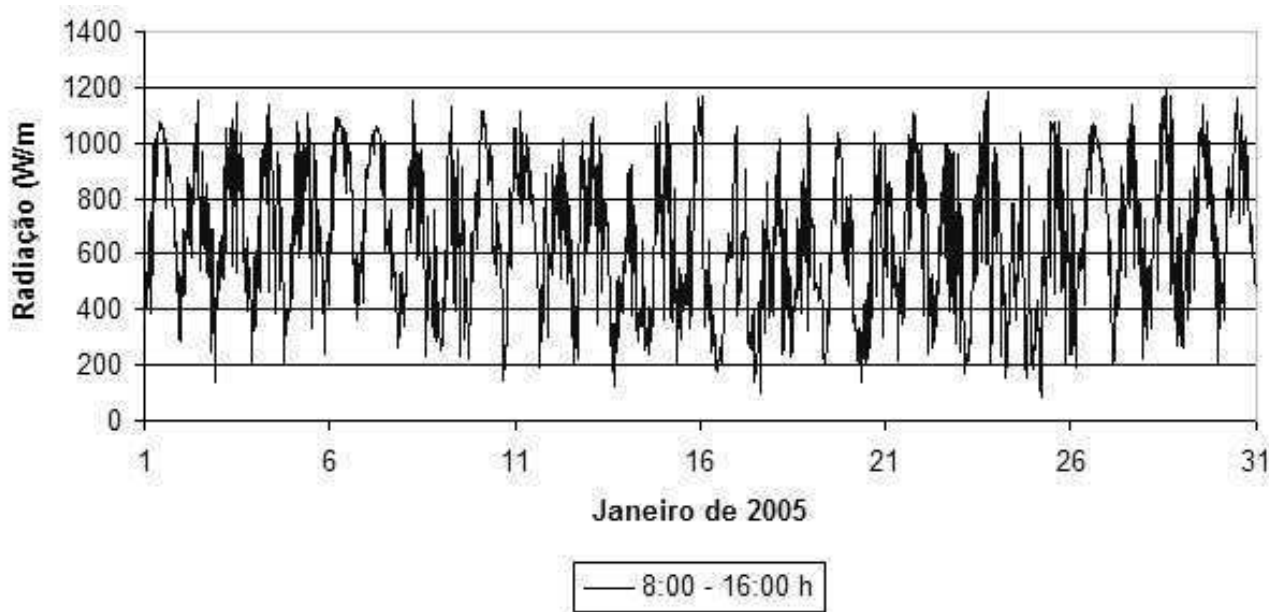


Figura 4.3: Radiação Solar medida no Campus da UFCG.

### 4.3 Turbina Eólica

A turbina eólica é mais uma opção de fonte de energia renovável, e funciona a partir da existência de ventos em suas pás. Diferentemente dos painéis fotovoltaicos, independe de ser dia ou noite. Esta fonte de energia complementa a falta da outra.

### 4.3.1 Dimensionamento da turbina eólica

No mercado de turbina eólica para pequenas potências, não existem muitas alternativas com relação ao valor da potência gerada. As turbinas disponíveis no mercado são basicamente as seguintes:

- 1) Abaixo de 1 kW;
- 2) 1,0 kW;
- 3) 3,2 kW;
- 4) 7,5 kW;
- 5) 10,0 kW;
- 6) Acima de 10,0 kW;

Considerando o consumo de energia diário e instantâneo e as opções de ofertas de turbinas e seus custos, então será escolhida uma turbina de 3,2 kW de potência, fabricante *Southwest Windpower* e referência *Whisper175*,  $24 V_{cc}$ , com uma potência de saída de 3,0 kW para ventos de 10,5 m/s e 3,2 kW para ventos de 12 m/s. A velocidade mínima para iniciar a operação é 3,4 m/s e máxima permitida é 55 m/s. Se os ventos atingirem a velocidade máxima, as pás serão travadas para evitar rotação excessiva no rotor do gerador elétrico.

O fabricante da turbina eólica apresenta uma curva de rendimento, mostrada na Figura 4.4, onde a potência de saída é função da velocidade do vento incidente nas pás da turbina.

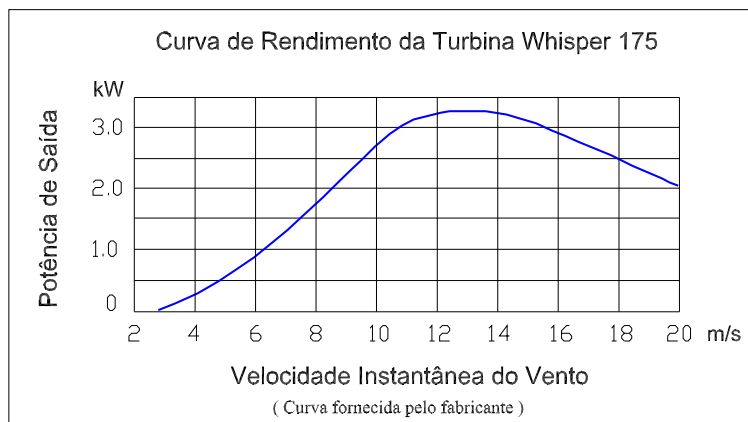


Figura 4.4: Rendimento da Turbina Whisper 175.

Tomando como base os dados de velocidade do vento, à 10m de altura do solo, coletados pelo Laboratório de Meteorologia da UFCG e, fazendo uma extrapolação dos valores para velocidades do vento à 20 e 50 metros de altura (MONTEITH, 1975), se obteve os seguintes

resultados, mostrados nas Figuras 4.5 e 4.6. Da Figura 4.5 nota-se que a predominância dos ventos está entre 4 e 6,5  $m/s$  ao longo de todo o mês, isto à 20m de altura do solo. Estes dados são mostrados na tabela 4.2 de forma resumida, onde os valores encontrados nas colunas "Quantidade" significa a quantidade de vezes que ocorreu um vento com a respectiva velocidade média por um período de dez minutos. Na Figura 4.6 é apresentada a quantidade de vezes que o vento atinge determinadas velocidades num mês.

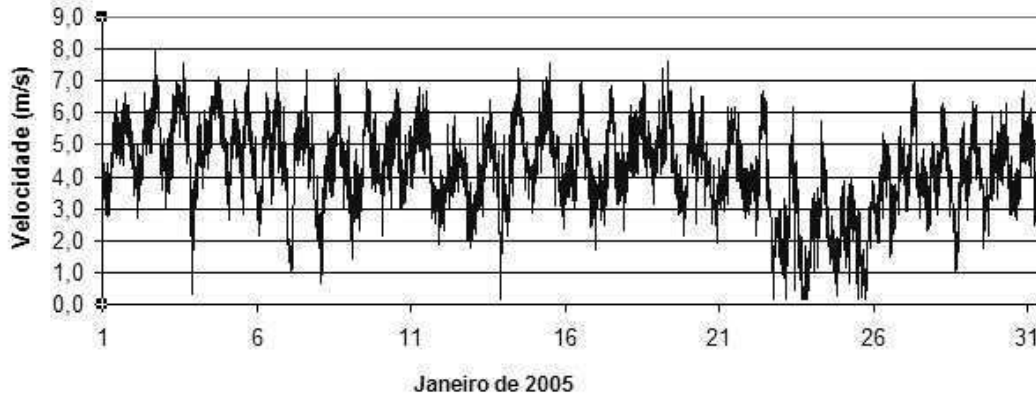


Figura 4.5: Velocidade do Vento ao longo do mês, à 20m de altura (m/s), no Campus da UFCG.

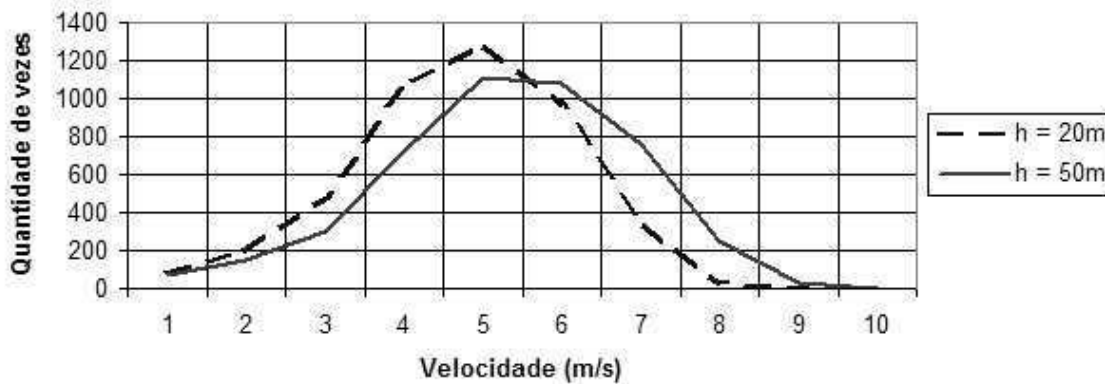


Figura 4.6: Ocorrência de ventos com duração de 10 minutos.

A extrapolação da velocidade do vento para outras alturas foi feita usando a equação 4.1 (MONTEITH, 1975).

$$u(z) = (u_*/k_v) \ln(z/z_0) \quad (4.1)$$

onde  $u$  é a velocidade do vento,  $z$  é altura onde se quer medir ou calcular esta velocidade,  $u_*$  é a velocidade de remoinho,  $k_v$  é conhecido como constante de von Karman's,  $z_0$  é o fator de rugosidade da superfície que são feitas estas medições,  $\ln$  é o logaritmo neperiano e se deve ao fato que a taxa do incremento da velocidade do vento cai com o incremento da altura, ou seja,

o incremento da velocidade do vento em relação a altura é segundo uma escala logarítmica. No presente caso, o valor adotado para  $z_0$  foi de 0,15 (Dado fornecido pelo Departamento de Meteorologia da UFCG).

Tomando como exemplo a equação 4.1 e fazendo uma extrapolação:

$$[u(z_2)]/[u(z_1)] = \{[(u_*/k_v)]/[(u_*/k_v)]\} \{[\ln(z_2/z_0)]/[\ln(z_1/z_0)]\}. \quad (4.2)$$

Simplificando a equação 4.2 resulta na equação 4.3

$$[u(z_2)]/[u(z_1)] = [\ln(z_2/z_0)]/[\ln(z_1/z_0)]. \quad (4.3)$$

Portanto, conhecendo a velocidade do vento à 10m de altura  $u(z_1)$ , calcula-se por exemplo para 20m de altura  $u(z_2)$ , onde  $z_1 = 10m$  e  $z_2 = 20m$ .

Da tabela 4.2 pode-se tirar algumas conclusões:

- i) neste local não se pode contar com velocidades dos ventos acima de 7m/s;
- ii) ventos com velocidade entre 6 e 7m/s, pode-se contar com 2 horas diárias;
- iii) ventos entre 5 e 6m/s, pode-se ter durante 5 horas diárias;
- iv) ventos entre 4 e 5m/s, pode-se ter durante 7 horas diárias;
- v) ventos com velocidades abaixo de 4m/s não interessam.

Tabela 4.2: Frequência da ocorrência de ventos à 20m de altura

Velocidade (v) (m/s)	Quantidade mensal	Quantidade média por dia	Duração (min)	Tempo Total por Dia (min)
$v \leq 1$	81	2,7	10	27
$1 < v \leq 2$	198	6,6	10	66
$2 < v \leq 3$	481	16,0	10	160
$3 < v \leq 4$	1059	35,3	10	353
$4 < v \leq 5$	1288	42,9	10	429
$5 < v \leq 6$	973	32,4	10	324
$6 < v \leq 7$	349	11,6	10	116
$7 < v \leq 8$	35	1,2	10	12
$8 < v \leq 9$	0	0,0	10	0
$v > 9$	0	0,0	10	0

Fazendo uma análise do conjunto de informações tiradas da Figura 4.4 e da tabela 4.2 pode-se concluir que:

- 1) Do item (iv) pode-se gerar  $400W$  durante  $7h$ , totalizando  $2,8kWh$  diário;
- 2) Do item (iii) pode-se gerar  $700W$  durante  $5h$ , totalizando  $3,5kWh$  diário;
- 3) Do item (ii) pode-se gerar  $1.000W$  durante  $2h$ , totalizando  $2,0kWh$  diário.

Portanto, durante um dia será gerado em média  $8,3kWh$ , o que representa  $71\%$  do consumo diário do sistema de dessalinização.

Há duas alternativas: a) Conviver com uma turbina que supre apenas  $71\%$  da carga e complementar o restante com a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos e/ou com o grupo gerador; b) Para suprir totalmente a carga que é de  $1,93 kW$  será necessário adquirir uma turbina de  $5,0 kW$  e que tenha características similares a de  $3,2 kW$ .

Está claro na Figura 4.4 que para se ter uma potência de saída mínima de  $2,1 kW$ , com a turbina de  $3,2 kW$ , é necessário que os ventos estejam numa faixa de velocidade superior a  $9,0 m/s$ . Com esta potência de saída menos as perdas no retificador CA/CC, certamente haverá energia suficiente para alimentar as cargas que totalizam  $1,93 kW$ , considerando que exista ocorrência de ventos nesta faixa de velocidade com certa frequência.

## 4.4 Banco de Baterias

Nas seções anteriores foram dimensionadas as fontes de energias renováveis: solar e eólica. Estas duas fontes de energia não podem, por si só, garantir a continuidade no fornecimento de energia às cargas.

Então é preciso pensar num sistema onde se possa armazenar toda a energia proveniente destas fontes, no instante em que ocorre a geração de energia, para ser utilizada no momento em que as cargas necessitarem de energia. A solução portanto é construir um banco de baterias, devido a grande quantidade de energia que será acumulada para posterior utilização.

### 4.4.1 Dimensionamento do banco de baterias

O dimensionamento do banco de baterias é apresentado na tabela 4.3:

Referência das baterias:

Tipo : Estacionária; Tensão Nominal :  $12 V_{cc}$ ; Capacidade Nominal ( $C_{20}$ ):  $194 Ah$ ;

Quantidade Total: 38 unidades.

Tabela 4.3: Cálculo do Banco de Baterias

Potência Total das Cargas	W	1927
Tensão Nominal do Sistema	V	24
Quantidade de Baterias (12V) em Série	un	2
Consumo Total das cargas	Ah/dia	449,8
Dias de Armazenamento de energia	Dias	4
Capacidade Necessária do Banco Baterias	Ah	1799,2
Capacidade de 01 Bateria	Ah	194,0
Profundidade de Descarga	%	50,0
Capacidade Útil de 01 Bateria	Ah	97,0
Necessidade de Baterias em Paralelo	un	19
<b>Quantidade Total de Baterias</b>	un	38
Capacidade Nominal do Bco. Baterias	Ah	3686,0
Capacidade Efetiva do Bco. Baterias	Ah	1843,0

Cuidados recomendados pelos fabricantes:

- a) Baterias liberam hidrogênio quando em processo de recarga. Mantenha ventilado o compartimento das mesmas e evite faíscas no local.
- b) Recarregue imediatamente as baterias após o uso.
- c) A maioria das baterias somente adquire sua capacidade nominal de carga depois de 10 a 30 ciclos de descarga.
- d) Nunca faça ciclo profundo de descarga em baterias automotivas.
- e) Para melhorar a vida útil das baterias, deve mantê-las sob carga flutuante ( $13,2 V_{cc}$  e injeção de corrente de 1% do  $Ah$  nominal, para uma bateria de 12V nominal).
- f) Para carregar as baterias, dê preferência à carga lenta, ao longo de pelo menos 10 horas com um carregador que forneça no máximo 15% do  $Ah$  nominal (DELPHI FREEDOM, 2004).

## 4.5 Grupo Gerador

Além das fontes de energias renováveis, solar e eólica, e do banco de baterias, ainda pode ocorrer períodos de tempo em que o sistema não tenha energia para fornecer às cargas. Para isto acontecer, basta que não haja geração por parte das fontes de energias renováveis por mais de quatro dias. Para evitar que isto venha a ocorrer, deve-se inserir ao sistema de energia, um grupo gerador movido à óleo diesel.

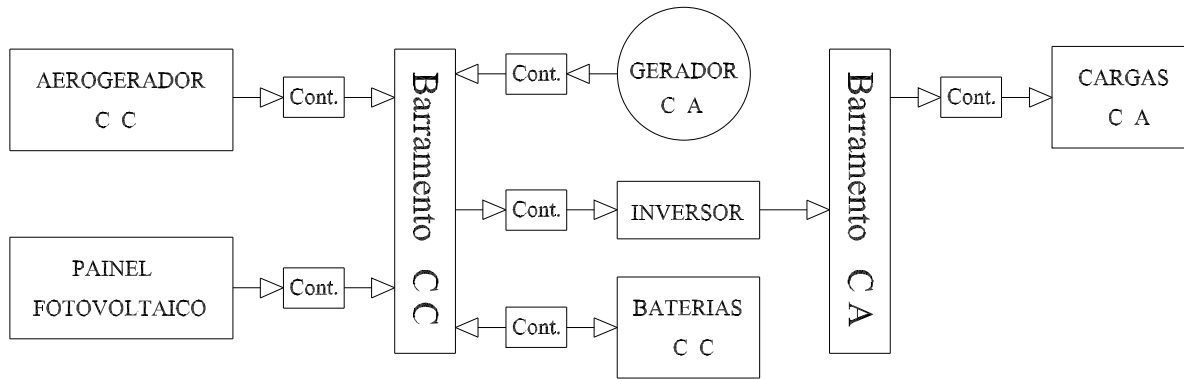


Figura 4.7: Diagrama de Blocos do Sistema Híbrido de Geração de Energia.

### 4.5.1 Dimensionamento do grupo gerador

Será utilizado neste trabalho um grupo gerador movido a óleo diesel, com gerador assíncrono e um retificador CA/CC na saída para fornecer energia em corrente contínua. A potência deste gerador será de  $5\text{ kVA}$ , a tensão de saída após o retificador será de  $24\text{ Vcc}$  e corrente contínua nominal de saída de  $200\text{ A}$ . Tudo isto porque este poderá precisar recarregar o banco de baterias citado neste capítulo, dentro de um período de 20 horas, e alimentar as cargas ao mesmo tempo. Banco de baterias: 19 conjuntos de baterias em paralelo, com  $9,7\text{ A}$  de corrente efetiva, cada conjunto. Cargas:  $1,93\text{ kW}$ .

Com todos estes componentes no sistema de geração de energia elétrica, será montado então um "Sistema Híbrido de Geração de Energia Elétrica".

## 4.6 Sistema Híbrido de Geração de Energia

Será projetado então um sistema híbrido de energia elétrica composto por painéis fotovoltaicos, turbina eólica, banco de baterias e um grupo gerador à diesel. Na Figura 4.7 é mostrado como deverá ser a configuração, bem como as interligações do sistema híbrido.

### 4.6.1 Funcionamento do Sistema Híbrido

A estratégia de operação do sistema implica na utilização da energia disponibilizada pelo sistema renovável (solar e/ou eólico) em cada período de operação, e o excesso de energia gerada é então armazenado em um banco de baterias. Se a energia gerada pelo sistema renovável não for suficiente para suprir a carga em um dado período, a estratégia de controle é extrair primeiramente a energia armazenada no sistema. Se ela não for suficiente, o gerador diesel deve suprir a porção restante da carga. Quando isto ocorrer, a energia gerada pelo gerador alimentará as cargas e recarregará as baterias (MACêDO, 2002).

Caso o aerogerador e os painéis fotovoltaicos gerem energia no mesmo instante, os controladores de carga de ambos serão os responsáveis para gerenciar qual das duas fontes irá alimentar o barramento de corrente contínua. Isto será realizado através das diferenças de potencial nas saídas das fontes.

O barramento de corrente alternada será alimentado através do inversor  $CC/CA$  com um transformador elevador e terá como tensão padrão  $220\text{ Vca}$ , monofásico,  $60\text{ Hz}$ .

No instante em que as cargas necessitarem de energia, esta será fornecida a partir do banco de baterias ou até mesmo de uma das duas fontes renováveis. Se num determinado instante, não houver energia suficiente no banco de baterias nem nas fontes alternativas, aí será ligado o grupo gerador. Neste caso o gerador só será desligado quando o nível de tensão da bateria atingir o valor de flutuação.

### 4.6.2 Sistema de condicionamento de potência

O sistema de condicionamento de potência é composto por equipamentos cuja função principal é otimizar o controle geração/consumo visando ao aproveitamento ótimo dos recursos, aliado à qualidade e continuidade na entrega da energia ao usuário. São normalmente equipamentos eletrônicos, como controladores de carga, seguidores de ponto de máxima potência, retificadores, inversores de tensão, entre outros (BLASQUES, 1999).

### 4.6.3 Controladores de carga

Os controladores de carga, são dispositivos eletrônicos que apresentam como função básica o controle dos níveis de carga e descarga das baterias. Situações de sobrecarga e descarga profunda contribuem fortemente para redução da vida útil da bateria; neste sentido, o controlador deve atuar desconectando a carga quando a bateria atingir um nível máximo pré-determinado de tensão, e desconectando a carga quando a bateria atingir um nível mínimo de tensão. Alguns modelos de controladores são utilizados também para fornecer informações sobre o desempenho do sistema ao usuário, tais como potência gerada e consumida, etc.

O controlador de carga opera em corrente contínua, em função disto a turbina eólica que gera em corrente alternada é acompanhada de um retificador  $CA/CC$ , para que a energia gerada possa ser injetada no banco de baterias. Normalmente um controlador está associado ao retificador, desempenhando o papel do controlador de carga. Em sistemas híbridos, apesar ser possível a utilização de um controlador independente para cada fonte, é preferível que seja utilizado um único controlador para todo o sistema (BLASQUES, 1999).



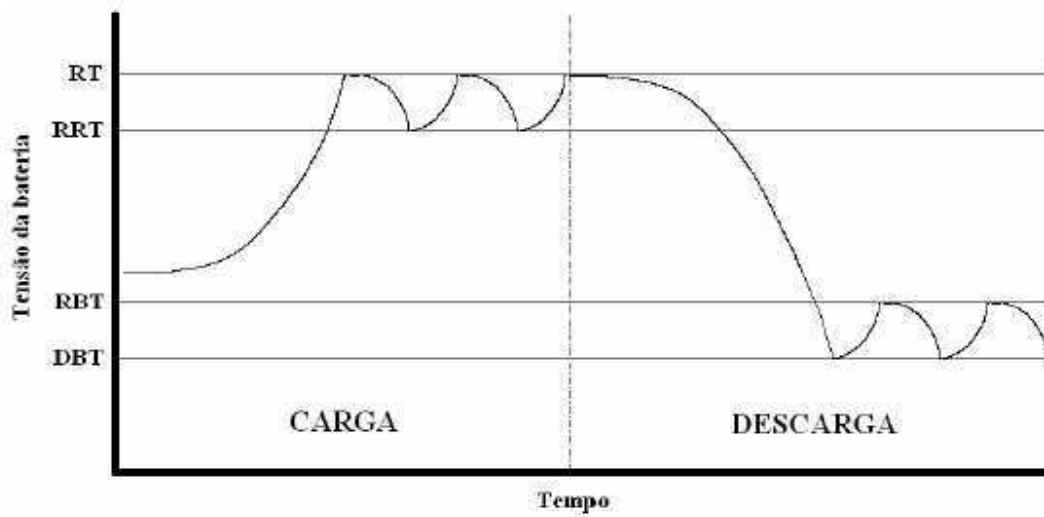


Figura 4.8: Curvas de carga e descarga de uma bateria controlada pelo método liga/desliga.

Como estratégia de controle, apesar das diversas variações existentes, são aqui citadas dois métodos: o método de interrupção (liga/desliga) e o método de tensão constante. O primeiro atua como uma chave, permitindo completa injeção de corrente gerada na bateria até esta atingir um nível máximo, chamado de regulação de tensão (RT). A geração contínua interrompida até a bateria atingir o nível de reconexão por regulação de tensão (RRT), inferior ao valor de RT. No método de tensão constante, a corrente injetada na bateria é regulada até que a bateria atinja seu valor de regulação de tensão. Com relação à desconexão da carga, o controle atua por meio de dois valores, o de desconexão por baixa tensão (DBT) e o de reconexão por baixa tensão (RBT). Para mostrar esses quatro valores, de extrema importância no desenvolvimento do projeto, o gráfico da Figura 4.8 apresenta o comportamento das curvas de carga e descarga de uma bateria controlada pelo método liga/desliga (BLASQUES, 1999). A seqüência de operação do sistema híbrido está ilustrado no fluxograma da Figura 4.9:

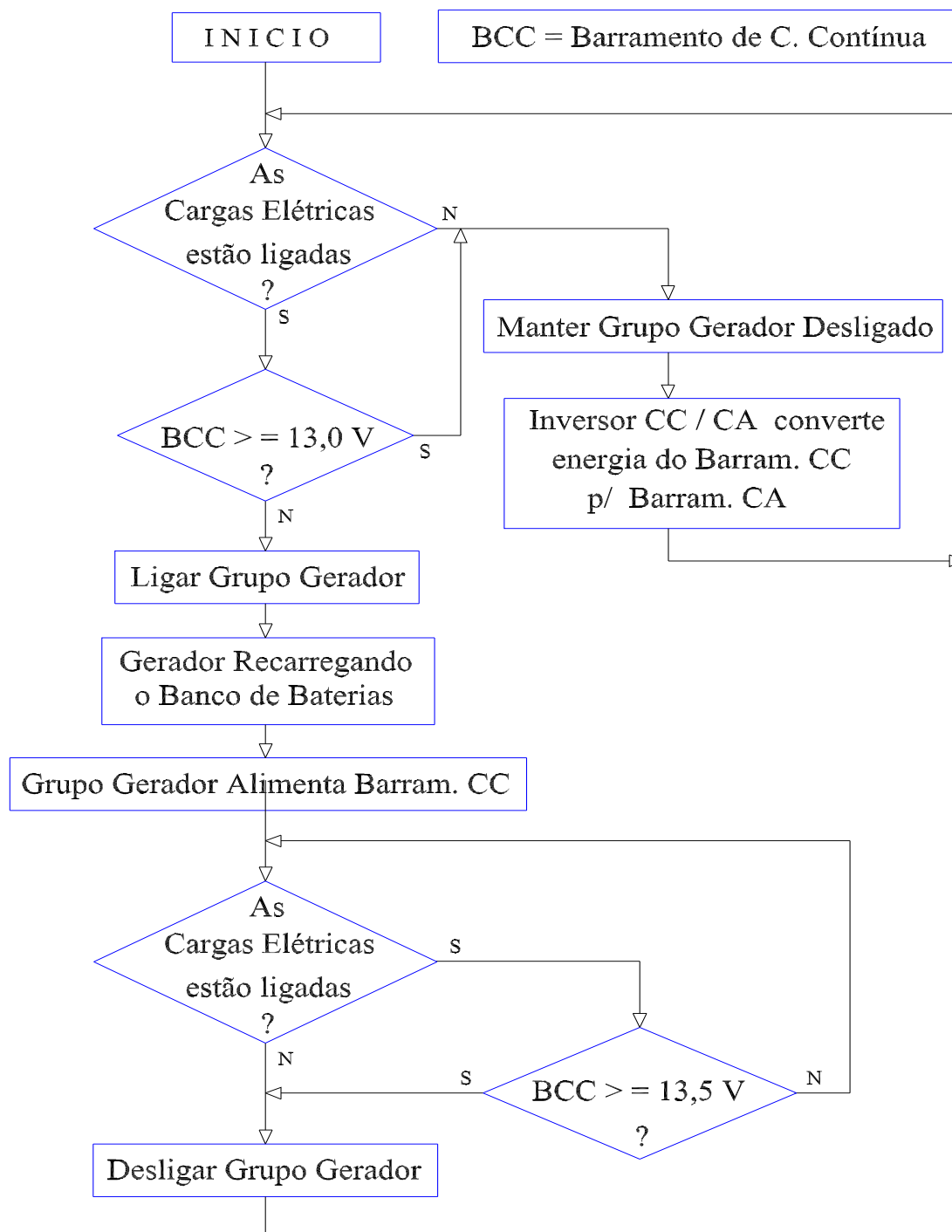


Figura 4.9: Fluxograma do Sistema Híbrido.

## 4.7 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a necessidade de se ter um sistema híbrido de geração de energia elétrica. Foram dimensionados: o conjunto de painéis fotovoltaico, uma turbina eólica, um banco de baterias e o grupo gerador como garantia de sempre haver disponibilidade de energia elétrica para o sistema de dessalinização. Através de um diagrama de blocos, foi apresentado como serão as interligações entre os diversos componentes do sistema. Pelo fluxograma da Figura 4.9 foi mostrado como será realizado o gerenciamento do fluxo de energia entre as fontes geradoras e entre estas e as cargas.

Para dimensionar os painéis fotovoltaicos e o grupo gerador, tomou-se como base os dados meteorológicos de radiação solar e velocidade do vento respectivamente. Estes dados foram levantados no Campus da UFCG em 2005.

Os experimentos com os painéis fotovoltaicos mostraram um fato interessante: Quando o painel está alimentando uma carga e a incidência de radiação solar sobre o mesmo diminui muito, o valor da tensão gerada pelo painel diminui drasticamente. A teoria diz que a tensão quase não decresce com a diminuição da irradiação solar, porém isto só é válido para a tensão de circuito aberto.

# Capítulo 5

## Dimensionamento do Sistema

### 5.1 Introdução

No capítulo 6, foi feito o levantamento de todas as cargas do sistema, mostrado na Tabela 6.1, chegando-se a seguinte conclusão:

Potência total das cargas:  $1.927 \text{ Watts}$ ;

Período diário de funcionamento destas cargas: 6 horas;

Carga nominal total do sistema:  $450 \text{ Ah}$ ;

Corrente nominal horária do sistema:  $75 \text{ A}$ ;

Da Tabela 4.1 do capítulo 4, considerando uma radiação solar média diária de  $600 \text{ W/cm}^2$ , ou seja, tomando-se a coluna 3 da referida tabela, conclui-se que serão necessários um total de 38 painéis fotovoltaicos de  $110 \text{ Watts}$  cada, formando uma configuração de 19 conjuntos de painéis em paralelo, sendo cada conjunto formado por dois painéis em série. A escolha da coluna de  $600 \text{ W/m}^2$  é justificada e explicada na seção 4.2.2.

Da seção 4.3.1 - Dimensionamento de turbina eólica, determinou-se que a melhor solução custo/benefício é uma turbina de  $3,2 \text{ kW}$ ,  $24 \text{ Vcc}$ , de fabricação *Southwest Windpower*, referência *Whisper175*.

O dimensionamento do banco de baterias foi feito no capítulo 4, seção 4.4.1. Foi então especificado um banco composto por 2 baterias em série e 19 conjuntos em paralelo, num total de 38 baterias seladas, do tipo estacionária, com capacidade individual de  $194 \text{ Ah}$  e  $12 \text{ Vcc}$ .

O grupo gerador foi dimensionado no capítulo 4, seção 4.5.1: Um gerador diesel com potência de  $5,0 \text{ kVA}$ , um retificador *CA/CC*, com  $24 \text{ Vcc}$  na saída do retificador e corrente contínua nominal de  $200 \text{ A}$ .

## 5.2 Modelagem Matemática

Será feito a seguir uma modelagem matemática sucinta de cada parte do sistema como um todo, tais como, cargas, painéis fotovoltaicos, turbina eólica, banco de baterias e grupo gerador.

## 5.3 Cargas do Sistema

Projetos de sistemas híbridos devem dispensar especial atenção à carga para que se possa otimizar o dimensionamento das fontes geradoras, principalmente quando se deseja reduzir ao máximo o consumo de combustível em sistemas que possuem grupos geradores complementares. É preciso também se preocupar com as perdas relacionadas a todo o processo de geração-consumo. Um modelo típico de sistemas de geração e consumo é mostrado na Figura 5.1. A geração deve ser suficiente para atender o consumo total mais as perdas associadas ao processo. Essas perdas podem resultar de diversas fontes. Em sistemas centralizados como este, elas são devidas à geração, distribuição e consumo, embora estas últimas possam ser embutidas no próprio consumo. Este conjunto de perdas é verificado principalmente no cabeamento, transformação, acionamento, proteção, medição, entre outros. No modelo apresentado na Figura 5.1 todas essas perdas são representadas por um único bloco de perdas totais.



Figura 5.1: Sistema típico de geração e consumo.

No estudo de sistemas de geração com fontes renováveis o modelo segue um padrão semelhante. Na Figura 5.2 é mostrado de maneira mais detalhada as perdas em todas as etapas do processo.

Assume-se aqui cinco principais fontes de perdas, verificadas na geração, no armazenamento e controle de energia gerada/consumida, na inversão, na rede de distribuição e no consumo. As perdas em sistemas renováveis de pequeno porte, são na fiação, equipamentos, etc. Porém, as perdas críticas nesses sistemas estão associadas principalmente a baixas eficiências dos processos de geração e inversão. Essas perdas são analisadas com mais detalhes nos itens seguintes.

Para analisar a carga a ser atendida, inicialmente calcula-se o consumo diário efetivo ( $C_{ef}$ ), em  $kWh$ , através da equação 5.1, válida para cálculos de consumo tanto em corrente alternada

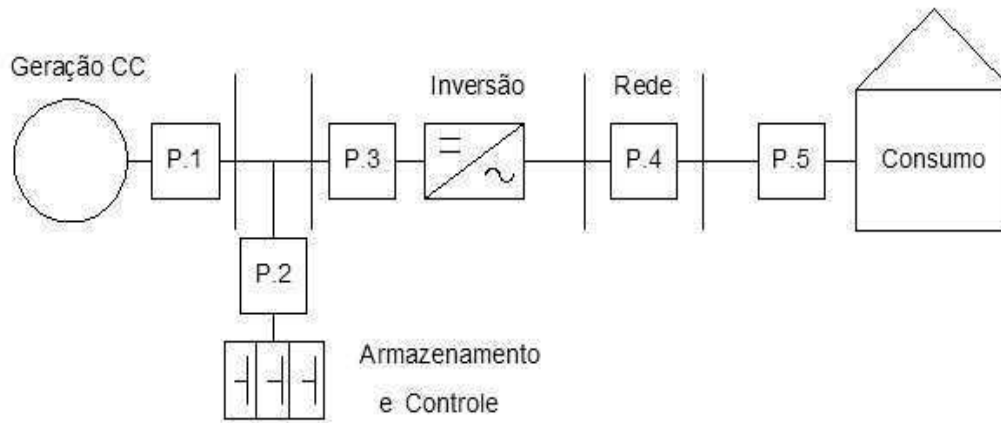


Figura 5.2: Fontes de perdas típicas em sistemas renováveis.

( $C_{CA}$ ) quanto em corrente contínua ( $C_{CC}$ ).

$$C_{ef} = \sum q_n \frac{P}{1.000} CSD \frac{CSS}{7} \quad (5.1)$$

onde  $P$  é a potência do equipamento em ( $W$ ),  $CSD$  é o ciclo de serviço diário, ou o número de horas diárias em que o equipamento permanece ligado,  $CSS$  é o ciclo de serviço semanal, ou o número de dias por semana em que o equipamento é ligado, e  $q_n$  é o número de equipamentos que possuem potência e ciclos de serviço diários e semanal idênticos.

A partir do consumo efetivo obtido anteriormente, a equação 5.2 calcula o consumo corrigido diário ( $C_{COR}$ ), em  $kWh$ , considerando as perdas nas cargas, transmissão/distribuição e inversão.

$$C_{COR} = k_c k_r \left( \frac{C_{CA}}{\eta_{inv}} + C_{CC} \right). \quad (5.2)$$

O termo  $k_c$ , representado por ( $P5$ ) na Figura 5.2, é o fator de perdas na fiação, normalmente considerado igual a 1,1, com exceção de alguns casos onde as instalações elétricas estejam em estado bastante precário, elevando assim o seu valor. o termo  $k_r$  ( $P4$ ) é o fator de perdas nos sistemas de transmissão e/ou distribuição. Este valor varia de acordo com o tipo de sistema. Sistemas com linhas médias e longas, com estágios de transformação, apresenta  $k_r$  mais alto, já pequenos sistemas de distribuição, conhecidos como mini-redes, apresentam valores bem mais reduzidos. Finalmente, a eficiência do inversor é representada pelo termo  $\eta_{inv}$ , sendo obviamente aplicável somente às cargas atendidas em corrente alternada.

Por fim, um outro parâmetro importante que deve ser especificado nessa etapa é a tensão nominal ( $V$ ) do sistema CC, escolhida normalmente em função da corrente de pico do projeto. A elevação no valor da tensão nominal permite a redução da corrente, com conseqüente diminuição da seção reta dos condutores além da redução de riscos. Entretanto, deve-se atentar para utilização de níveis de tensão compatíveis com os disponíveis comercialmente em equipamentos.

A equação 5.3 relaciona a tensão nominal com a corrente de pico ( $I_{pico}$ ), através da potência máxima gerada ou demandada pela carga ( $P_{pico}$ ), em  $W$ , dependendo da finalidade do sistema, se isolado ou interligado. A eficiência do inversor é considerada apenas se  $P_{pico}$  corresponder à carga e esta for atendida em CA.

$$I_{pico} = \frac{P_{pico}}{\eta_{inv}V}. \quad (5.3)$$

## 5.4 Geração Fotovoltaica

No projeto do sistema fotovoltaico, deve-se calcular uma potência mínima instalada do arranjo para suprir a carga determinada, já considerando todas as perdas envolvidas no processo. Essa potência é aqui denominada de potência de projeto ( $P_{PROJ}$ ), sendo calculada em  $kW$  pela equação:

$$P_{PROJ} = k_{FV}k_{ac} \frac{C_{COR}}{HSP}. \quad (5.4)$$

O número de horas de sol pleno ( $HSP$ ), é usualmente apresentado em termos de médias mensais, mas também podem ser utilizados intervalos menores, como o diário, por exemplo. Os parâmetros  $k_{FV}$  (P1) e  $k_{ac}$  (P2), representam respectivamente as perdas na geração e nos sistemas de armazenamento e controle, mostradas na Figura 5.2.

O fator  $k_{FV}$  é devido a perdas por dispersão das características dos módulos, pois os valores de potência dos módulos fornecidos pelos fabricantes são baseados em uma condição padrão de testes, que nem sempre é satisfeita na prática, principalmente com relação a temperatura da célula. Um valor típico de  $k_{FV}$  é da ordem de 1,25.

Com a potência de projeto calculada, define-se a potência efetivamente instalada do sistema FV ( $P_{FV}$ , em  $kW_P$ , de tal modo que ela seja igual ou maior que  $P_{PROJ}$ . A partir desse ponto, a energia entregue  $E_{FV}$  à carga, pelo sistema FV em  $kWh$ , pode ser calculada pela equação 5.5. O parâmetro  $k_G$  representa as perdas globais do sistema. Se for necessário obter-se o valor de energia gerada no ponto final de consumo, junto às cargas, em um sistema isolado,  $k_G$  será a contribuição de todas as demais perdas (P1 a P5). Caso contrário, se estiver previsto a venda de energia em ponto imediatamente após a inversão,  $k_G$  será dado pela multiplicação das perdas P1, P2 e P3. Outra variação pode ser obtida caso se deseje verificar a energia gerada na saída do arranjo FV, quando, então,  $k_G = k_{FV}$ .

$$E_{FV} = \frac{P_{FV}HSP}{k_G}. \quad (5.5)$$

Um outro método que pode ser utilizado para a análise da energia gerada por um sistema fotovoltaico é o método da área do módulo (BLASQUES, 1999), como mostra a equação 5.6.

$$E_{FV} = \frac{A_{mo}\eta_{mo}f_P G}{k_G} \quad (5.6)$$

onde  $A_{mo}$  é área do módulo ou do arranjo, em  $m^2$ ,  $\eta_{mo}$  é a eficiência do módulo,  $f_P$  é o fator de preenchimento do módulo (%) e  $G$  é a irradiação solar média do período considerado na análise, em  $kWh/m^2$ . O  $f_P$  é um percentual que considera o não aproveitamento da área total do módulo para fins de conversão fotovoltaica.

## 5.5 Geração Eólica

Um método geral utilizado, para analisar o potencial eólico, leva em consideração o fator forma de Weibull ( $k_f$ ) (BLASQUES, 1999), calculado e os parâmetros básicos da curva de potência da turbina: velocidade do vento ( $v_v$ ), velocidade de partida ( $v_p$ ), velocidade nominal ( $v_n$ ), velocidade de corte ( $v_c$ ) e potência nominal ( $P_n$ ). Dada uma certa velocidade de vento, a potência fornecida pela turbina ( $P_{eo}$ ) varia segundo o modelo do sistema:

$$\begin{aligned} P_{eo} &= 0 & (v_v < v_p) \\ P_{eo} &= P_n \frac{v_v^{k_f} - v_p^{k_f}}{v_n^{k_f} - v_p^{k_f}} & (v_p \leq v_v \leq v_n) \\ P_{eo} &= P_n & (v_n \leq v_v \leq v_c) \\ P_{eo} &= 0 & (v_v > v_c) \end{aligned} \quad (5.7)$$

As principais fontes de perdas em um aerogerador são as perdas aerodinâmicas nas pás, as perdas nos componentes do sistema, tais como eixos, transmissão, caixa multiplicadora e gerador, além das perdas relacionadas ao fato do rotor eólico operar apenas em uma determinada faixa de velocidade de vento. Somando à limitação imposta pelo valor de  $C_P$ , as perdas de um sistema de geração eólico podem ser representadas por uma eficiência global, aqui denominada de  $\eta_{eo}$ , valor que pode ser considerado equivalente ao fator  $k_{FV}$  definido anteriormente para a geração fotovoltaica.

Quando a velocidade do vento está compreendida entre a velocidade de partida e a velocidade nominal da turbina ( $v_p \leq v \leq v_n$ ), a potência eólica gerada pelo segundo método, em  $W$ , é dada pela equação 5.8

$$P_{eo} = \frac{1}{2} \eta_{eo} \rho_{ar} A_{pa} v^3. \quad (5.8)$$

A área de varredura das pás  $A_{pa}$  é dada em  $m^2$  e a densidade do ar  $\rho_{ar}$  em  $kg/m^3$ .

Para se ter maior precisão da equação 5.8, utiliza-se a equação 5.9 para a determinação de valores de  $\rho_{ar}$ , conhecendo-se apenas a altitude ( $z_{alt}$ ), em metros.



$$\rho_{ar} = 1,225 - (1,194 \times 10^{-4})z_{alt}. \quad (5.9)$$

Para efeito de cálculo, a turbina eólica escolhida para este trabalho está descrita no capítulo 4 seção 4.3, e tem os seguintes dados:

$$P_n = 3,0kW; P_{pico} = 3,2kW; V_N = 24V_{cc}; v_p = 3,4m/s; v_n = 10,5m/s; v_c = 12m/s; A_{pa} = 15,90m^2.$$

Quanto a eficiência da turbina não foi possível determinar, pois até o final deste trabalho, a turbina não havia sido adquirida pela Universidade.

## 5.6 Geração a Diesel

O grupo gerador neste sistema híbrido será usado apenas como alternativa de *backup*, operando somente em situações onde não há disponibilidade de energia renovável gerada e armazenada. Este deverá ser dimensionado para suprir completamente a carga durante o período em que a geração é insuficiente, além de recarregar o banco de baterias.

Por existir uma grande variação de grupo gerador comercialmente no mercado, a determinação do valor da potência do gerador mais adequado ao sistema irá depender apenas dos custos envolvidos, da finalidade do sistema e da estratégia de operação adotada.

Definida a potência nominal do gerador ( $P_{GMG}$ ), dada em  $kWe$  e o seu consumo de combustível ( $F$ ), em  $L/h$ , é dado pela relação Skartein e Uhlen apresentada pela equação 5.10 (BLASQUES, 1999).

$$F = 0,246P_{ci} + 0,08415P_{GMG}. \quad (5.10)$$

O termo  $P_{ci}$ , dado em  $kW$ , representa a potência efetivamente demandada pela carga naquele instante. Para fins de cálculos práticos, quando não se dispuser de valores pontuais de demanda, pode-se considerar o primeiro termo da equação 5.10 como a potência total instalada e multiplicá-lo pelo fator de carga, o que garante uma aproximação razoável. Como exemplo, a Figura 5.3 apresenta a curva de consumo de um grupo gerador a diesel de  $32kWe$  para uma carga variando de 0 a  $32kW$ .

## 5.7 Armazenamento

O armazenamento em sistemas de geração de energia é dimensionado de forma tal que a energia útil total do banco de baterias seja suficiente para alimentar a carga durante um determinado período de tempo onde não haja disponibilidade de geração renovável, denominado de período de autonomia do sistema ( $P_{auto}$ ). Sistemas híbridos que utilizam grupos geradores

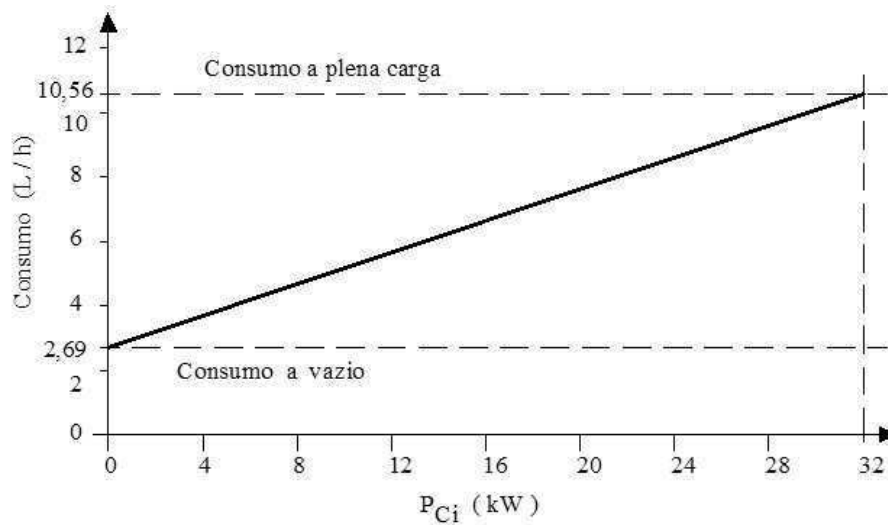


Figura 5.3: Curva de consumo de um grupo gerador de kWe.

conjuntamente com fontes renováveis tendem a possuir bancos de baterias de menor capacidade, devido à disponibilidade do gerador atuar como *backup*. Nesta aplicação, o banco de baterias é dimensionado para suprir a carga até no período de autonomia, evitando ao máximo o uso do grupo gerador e conseqüentemente o consumo de óleo diesel.

A capacidade energética total de uma bateria ( $C_E$ ) é dada simplesmente pelo produto entre a sua capacidade de corrente e sua tensão nominal. Entretanto, a capacidade energética útil de uma bateria ( $C_B$ ) depende da especificação de sua profundidade máxima de descarga, variando de acordo com o regime de operação ao qual a bateria é submetida:

$$C_B = C_E P_D \quad (5.11)$$

com  $C_B$  e  $C_E$  sendo dados em  $kWh$  e  $P_D$  em %.

Logo, para ser capaz de suprir um determinado consumo diário mais as perdas ( $C_{COR}$ ), o sistema de armazenamento deve suprir uma capacidade total ( $C_{BB}$ ), em  $kWh$ , dada pela equação 5.12.

$$C_{BB} = k_{ac} C_{COR} P_{auto}. \quad (5.12)$$

Este método é eficiente em situações onde o consumo diário não exceda o valor calculado ( $C_{COR}$ ). Nesses casos, se o sistema de armazenamento e controle operar satisfatoriamente, a carga é sempre satisfeita e o índice de interrupção é nulo. Em casos onde o consumo diário exceder o calculado, a conseqüência imediata é a redução na autonomia do sistema, até o ponto em que haverá interrupção no atendimento originado por corte efetuado pelo sistema de controle. Também é importante ressaltar que se a geração for inferior a prevista, a autonomia

do sistema é reduzida em função da energia gerada não ser suficiente para recarregar o banco de baterias.

De posse da eficiência de carregamento da bateria ( $\eta_{bat}$ ), dos valores de energia gerada ( $E_G$ ) e consumida ( $C_{COR}$ ) em cada intervalo de tempo, e da capacidade da bateria em um instante imediatamente anterior a  $t$ ,  $C_B(t)$  pode ser determinado pelo conjunto de equações 5.13, sendo a primeira referente ao ciclo de carregamento e a segunda referente ao ciclo de descarga.

$$\begin{aligned} C_B(t) &= C_B(t-1) + (E_G(t) - C_{COR}(t))\eta_{bat} & (E_G(t) > C_{COR}(t)), \\ C_B(t) &= C_B(t-1) - (C_{COR}(t) - E_G(t)) & (C_{COR}(t) > E_G(t)). \end{aligned} \quad (5.13)$$

## 5.8 Condicionamento de Potência

Entre os componentes típicos de um sistema de condicionamento de potência de sistemas híbridos para geração de eletricidade, dois equipamentos merecem especial destaque em seu dimensionamento: controladores de carga e inversores de tensão. Demais equipamentos, como retificadores de turbinas eólicas, unidades de controle de grupo gerador, entre outros, são na maioria das vezes fornecidos conjuntamente com os equipamentos principais.

Controladores de carga ligados a sistemas fotovoltaicos devem ser dimensionados de forma tal que permitam a passagem de corrente máxima especificada do arranjo FV para o banco de baterias. Situações de máxima corrente são indicadas nos módulos fotovoltaicos por seus valores de corrente de curto circuito. Dessa forma, a capacidade mínima do controlador de carga ( $C_{cont}$ ), em  $A$ , deve ser igual à corrente de curto-circuito total do arranjo ( $I_{SCarranjo}$ ), também dada em  $A$ , como mostra a equação 5.14.

$$C_{cont} = I_{SCarranjo}. \quad (5.14)$$

Como as características elétricas dos módulos são fornecidas segundo uma condição padrão de testes, podem ocorrer situações onde as condições verificadas na prática excedam os valores de testes (níveis de irradiância maiores que  $1.000W/m^2$ , por exemplo). Nesses casos a uma tendência natural de conseqüente elevação nos valores de corrente de curto-circuito do arranjo, variando de acordo com as condições climáticas do local de instalação. Em alguns casos recomenda-se a utilização de um fator de segurança variando de 25% a 30%, de acordo com a situação (BLASQUES, 1999). Alguns controladores de carga modernos já são fabricados para suprir determinados picos de corrente, devendo ser analisado esse fato quando do dimensionamento do componente. De uma maneira geral, a equação 5.14 confere bons níveis de segurança.

Por fim, um parâmetro de grande importância na seleção do inversor a ser utilizado é sua eficiência. Uma variação de 1% na eficiência pode resultar em um diferencial de 10% na energia

gerada anual (BLASQUES, 1999). atualmente, a grande maioria dos fabricantes informa valores maiores que 90% de eficiência de conversão. Valores inferiores representam perdas excessivas, que podem comprometer a viabilidade do projeto.

## 5.9 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas todas as etapas da modelagem matemática do sistema, no que diz respeito à carga a ser atendida, geração fotovoltaica, eólica e diesel, além do armazenamento e condicionamento de potência. Concluiu-se que a viabilidade técnica pode ser verificada se forem seguidas algumas diretrizes básicas tais como, adquirir uma turbina eólica que funcione também com ventos de baixas velocidades, a altura que vai ser instalada a turbina deve-se levar em conta os cálculos de velocidade do vento, a observância da instalação dos painéis fotovoltaicos com relação a inclinação e sombra, deve-se adquirir baterias seladas para evitar manutenção de eletrólito, evitando assim baixo rendimento.

Foi apresentado a importância de se calcular as perdas de energia nas diversas partes do sistema híbrido, assim como a curva de consumo de óleo diesel de um grupo gerador. Também foi mostrado como se calcular a capacidade energética útil de uma bateria, a fim de não se exceder na profundidade de descarga e comprometer a vida útil da mesma.

# Capítulo 6

## Automação do Sistema de Dessalinização

### 6.1 Introdução

Como foi dito no capítulo 1, a maioria dos sistemas de dessalinização são instaladas em lugares distantes dos grandes centros, onde há escassa, ou nenhuma, mão-de-obra especializada que possa operar a planta com segurança e qualidade.

Para suprir tal deficiência, esta planta será automatizada e monitorada remotamente através de um sistema supervisorio.

### 6.2 Planta de Dessalinização

É apresentado na Figura 6.1 o diagrama do sistema de dessalinização com toda instrumentação necessária para automatizar o processo.

Em seguida será relacionado e depois descrito cada sub-conjunto da planta de dessalinização.

#### 6.2.1 Componentes da Planta de Dessalinização

- i) Fonte hídrica (Água superficial ou subterrânea);
- ii) Bomba de água de alimentação;
- iii) Reservatório de água de alimentação;
- iv) Bomba auxiliar;
- v) Pré-filtro;
- vi) Bomba de alta pressão;
- vii) Membranas de dessalinização;

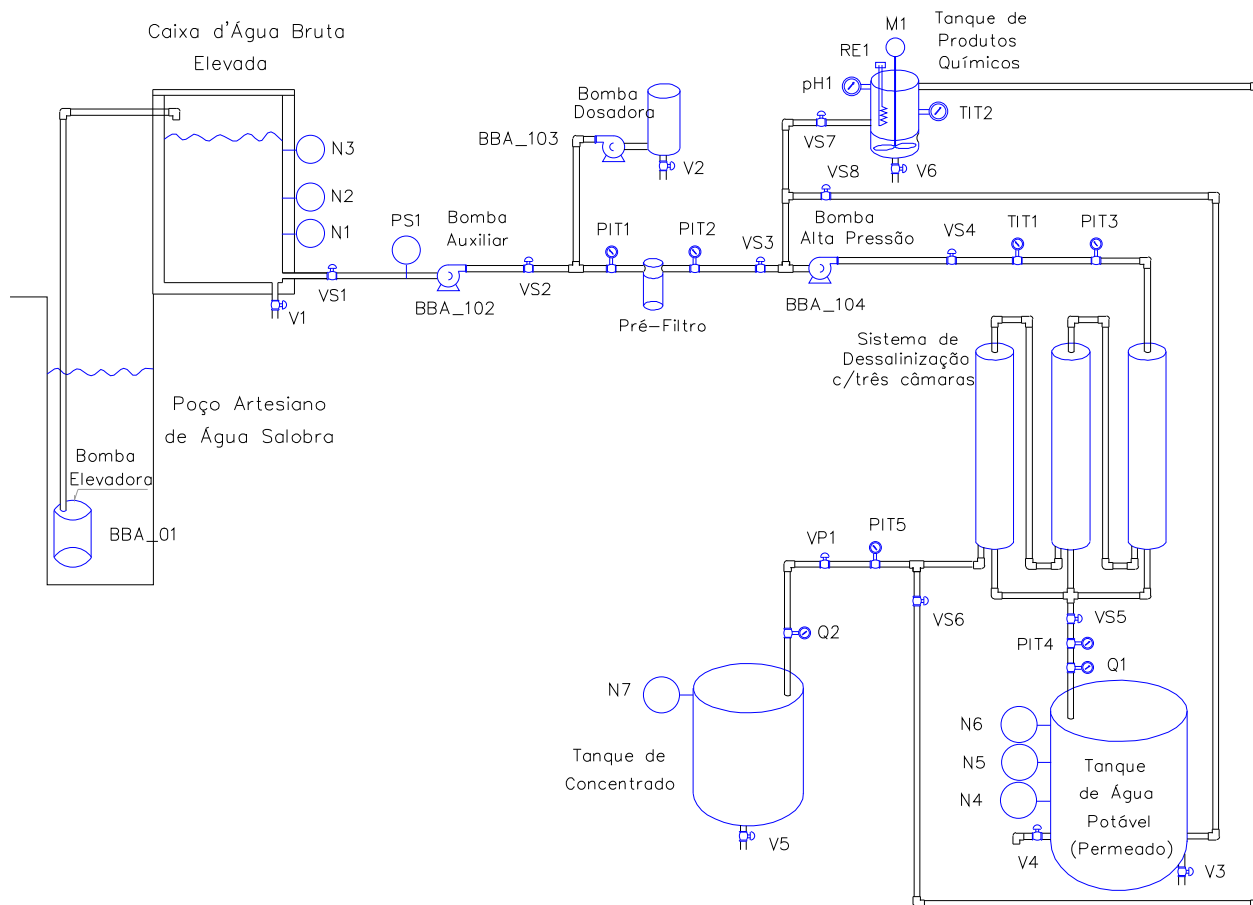


Figura 6.1: Diagrama de um Sistema de Dessalinização com instrumentação.

- viii) Reservatório de água potável (Permeado);
- ix) Reservatório de concentrado (Rejeito);
- x) Tanque de produtos químicos de limpeza;
- xi) Bomba de limpeza química;
- xii) Bomba dosadora.

A seguir serão descritos cada componente anteriormente relacionados:

#### i) Fonte hídrica

A partir da fonte hídrica, a água de alimentação é bombeada para o reservatório de capacidade definida, próximo ao dessalinizador. Considerando esta fonte como sendo um poço, este terá dois sensores de nível: a) Nível baixo e b) Nível Alto. Entre a tomada de água bruta e este reservatório poderá ou não haver um pré-tratamento físico-químico, que depende da qualidade da própria água, por exemplo, quando a mesma apresenta elevado nível de turbidez ou presença de componentes incrustantes.

**ii) Bomba de água de alimentação**

Esta bomba é a responsável pelo bombeamento de água bruta para o reservatório de água de alimentação do dessalinizador. Para esta bomba funcionar é preciso que duas condições sejam satisfeitas simultaneamente: a) O reservatório de água de alimentação esteja acusando um nível abaixo do ponto intermediário (nível 2) e b) Caso a água bruta seja oriunda de um poço tubular, considerando seus níveis estático e dinâmico, o sensor de nível deste deverá estar acusando água acima do seu nível dinâmico. De modo inverso, se o reservatório de água de alimentação atingir o nível 3 ou, o poço atingir um nível baixo do seu nível dinâmico, a bomba será desligada.

**iii) Reservatório de água de alimentação**

Este reservatório garante um mínimo de água em condições de ser dessalinizada. O mesmo possui no seu interior três sensores de níveis, veja a Figura 6.1, a saber: a) Nível 1 (mínimo); b) Nível 2 (intermediário); c) Nível 3 (máximo). Para iniciar o processo de dessalinização é necessário que este reservatório esteja no nível 3). De modo inverso, uma das condições de parada do processo é quando este reservatório atinge o nível 1 ou quando o reservatório de água potável atinge o nível 3.

**iv) Bomba auxiliar**

Esta bomba fica na saída do reservatório de água de alimentação e sua função principal é garantir uma vazão pré-determinada na entrada da bomba de alta pressão, evitando assim uma possível cavitação. Sendo assim é a primeira a entrar em funcionamento durante o processo e a última a ser desligada.

**v) Pré-filtro**

Este componente se encontra entre a bomba auxiliar e a bomba de alta pressão. Sua função é reter partículas acima de uma certa granulometria, caso contrário, estas partículas indesejadas poderiam comprometer o funcionamento tanto da bomba de alta pressão quanto das membranas dessalinizadoras. Quando o pré-filtro satura por causa de sujeiras acumuladas nele, a diferença de pressão medida pelos manômetros existentes na entrada e saída do mesmo, faz com que o sistema acuse uma necessidade de limpeza do elemento filtrante. Isto faz com que o processo pare e aguarde a referida limpeza que será manual. Para dar continuidade ao processo será preciso que alguém dê um *RESET* através de um botão existente no campo, junto ao pré-filtro.

**vi) Bomba de alta pressão**

A bomba de alta pressão tem como objetivo gerar pressão (de 10 à 30  $kgf/cm^2$ ) suficiente na entrada dos elementos de membrana, superior a pressão osmótica da água bruta para

que ocorra a osmose inversa através das membranas. Durante o processo de dessalinização é gerado duas correntes de água: permeada e concentrada. A água permeada é conduzida para um reservatório (chafariz) e o concentrado para outro reservatório (água de gasto).

**vii) Membranas de dessalinização**

As membranas de dessalinização são constituídas de compósitos poliméricos que resistem altas pressões e oferecem condições durante o processo de extrair os sais dissolvidos na água de alimentação do dessalinizador. Considerando o tipo da água a ser tratada, a taxa de extração de sais pode atingir um percentual em torno de 99.5%. Caso a pressão de entrada seja maior que a da saída em 20% significa que há necessidade de limpeza química das membranas e faz com que o processo pare e dê início automaticamente a esta limpeza. Caso contrário, estas membranas poderiam atingir um nível tal de saturação que não haveria mais recuperação das mesmas, acarretando num grande prejuízo de tempo e dinheiro.

**viii) Reservatório de água potável**

A finalidade deste reservatório é armazenar água potável para abastecer a respectiva comunidade. Como ilustrado na Figura 6.1, o reservatório contém no seu interior três sensores de níveis, a saber: a) Nível 1 (mínimo); b) Nível 2 (intermediário); c) Nível 3 (máximo). Para iniciar o processo de dessalinização é necessário que este reservatório esteja abaixo do nível 2. De modo inverso, uma das condições de parada do processo é quando a água deste reservatório atinge o nível 3.

**ix) Reservatório de concentrado**

Este serve para armazenar o concentrado, ou seja, água com alto teor de sais. Por este motivo, o mesmo deve ser de PVC para evitar corrosão. Esta água concentrada poderá ser utilizada para algumas funções, como por exemplo, limpeza e descarga de sanitário. Não haverá nenhum sensor de nível no mesmo, pois não é desejável que o processo comece ou termine por causa do reservatório de concentrado (rejeito). Porém, o operador terá condições de esvaziá-lo periodicamente, de acordo com a tendência do mesmo encher.

**x) Tanque de produtos químicos de limpeza**

Este tanque conserva produtos de limpeza, previamente preparado para ser utilizado quando da necessidade de limpeza química das membranas. Haverá um sensor de nível baixo dentro deste para sinalizar e evitar que a bomba de limpeza entre em funcionamento com este tanque vazio. Contudo, durante o processo de limpeza química, o produto sai deste tanque, passa pelas membranas e retorna para o mesmo. Também dentro deste haverá um medidor de pH com intuito de monitorar e parar a limpeza quando o pH atingir o valor pré-fixado.



**xi) Bomba de limpeza química**

A função desta é bombear produtos químicos do tanque e fazê-los passar através das membranas de dessalinização, impondo uma pressão entre 1 e 2  $kgf/cm^2$  para poder arrastar sujeiras impregnadas nas mesmas. Após a limpeza química, esta mesma bomba faz passar água limpa, vinda do tanque de água potável, pelas membranas numa espécie de enxágüamento.

**xii) Bomba dosadora**

Esta bomba se localiza entre a bomba auxiliar e a de alta pressão e é responsável pela dosagem de produtos anti-incrustantes necessários durante o processo de dessalinização, a fim de minimizar a incrustação nas membranas de alguns elementos contidos na água bruta. Esta bomba e a de alta pressão devem entrar em funcionamento simultaneamente. Os produtos e a relação de dosagem é determinada pelos técnicos em dessalinização e dependem exclusivamente das características inerente àquela água a ser dessalinizada.

## 6.2.2 Funcionamento da Planta

Existem dois processos paralelos e independentes a serem considerados: a) Alimentação do reservatório de água bruta e b) Dessalinização.

a) Quando o reservatório de água bruta está abaixo do nível 2 e o poço está acima do nível dinâmico, a bomba do poço é acionada, e irá encher o reservatório. No instante em que este atingir o nível 3 ou o poço acusar nível abaixo do seu nível dinâmico, esta bomba será desligada.

b) Quando o reservatório de água potável estiver sinalizando nível abaixo do intermediário e ao mesmo tempo o de água bruta estiver no nível 3, será dado início ao processo de dessalinização. Liga-se a bomba auxiliar, analisa-se o estado físico do pré-filtro, se estiver impedindo a passagem de água, pára-se o processo para limpeza do mesmo, caso esteja normal, prossegue-se com o processo. Liga-se então as bombas dosadora e de alta pressão e alimenta-se as membranas de dessalinização. Caso estas membranas estejam normais o processo continua até atingir o nível máximo do tanque de água potável ou atingir o nível mínimo do tanque de água bruta. Se as membranas apresentarem obstrução, indicada pela diferença de pressão entre os manômetros existentes antes e depois das membranas, o processo é interrompido para efetuar limpeza química nas mesmas, desligando-se as bombas de alta pressão, dosadora e auxiliar, nesta ordem, e ligando-se a bomba de limpeza química. Após esta limpeza e o enxágüamento com água potável, será desligada a bomba de limpeza e inicia-se o processo novamente.

Considerando o consumo diário de 3.600 litros de água potável e a produção do dessalinizador de 600 *litros/hora*, descritos no item 6.5, será necessário então operar o sistema durante 6 *horas/dia*. Se for utilizado um tanque de 5.000 *litros* para água potável e levando-se em conta que o processo será reiniciado sempre que este tanque atingir o nível intermediário, ou seja,

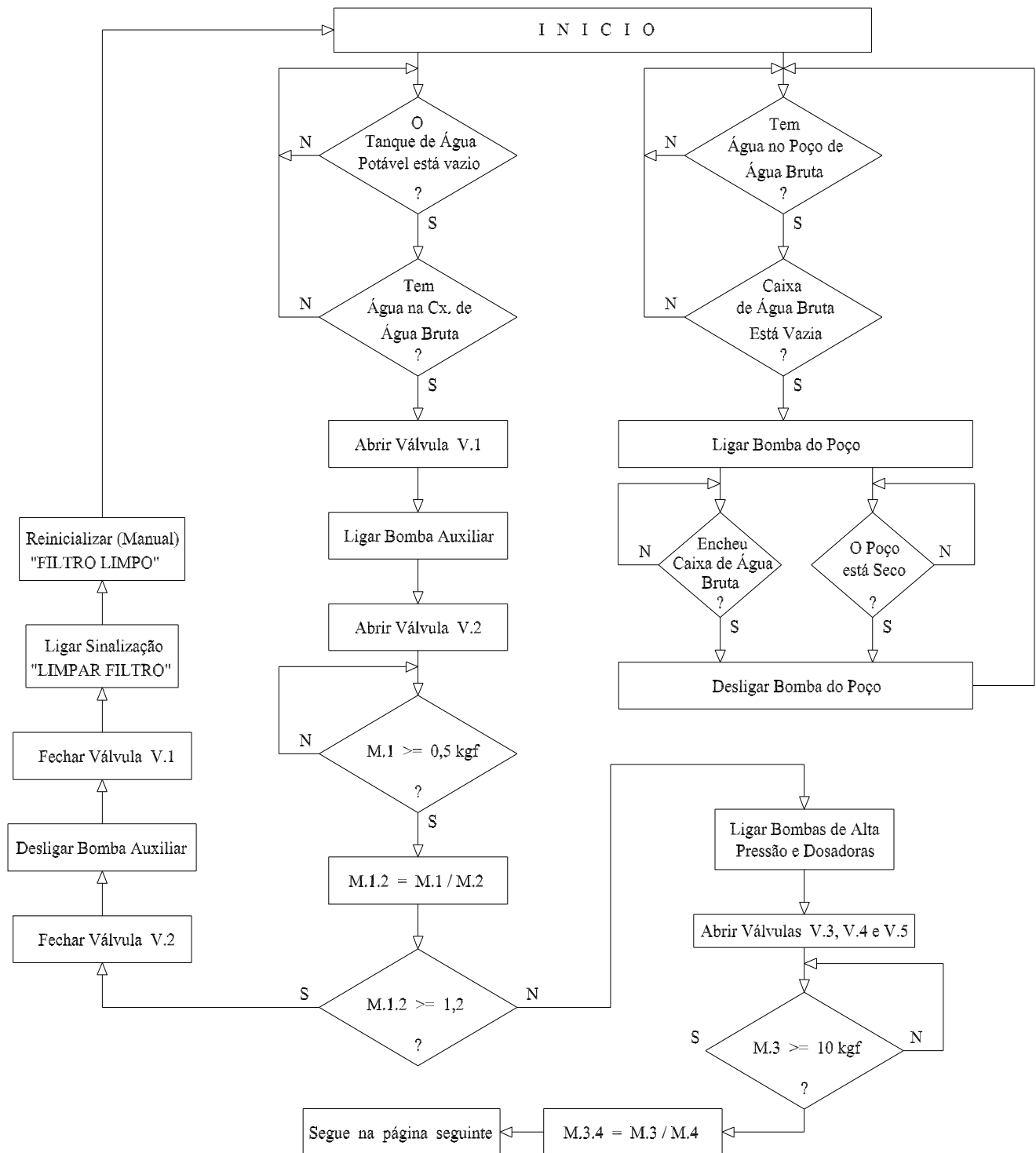


Figura 6.2: Fluxograma 1 (Inicio).

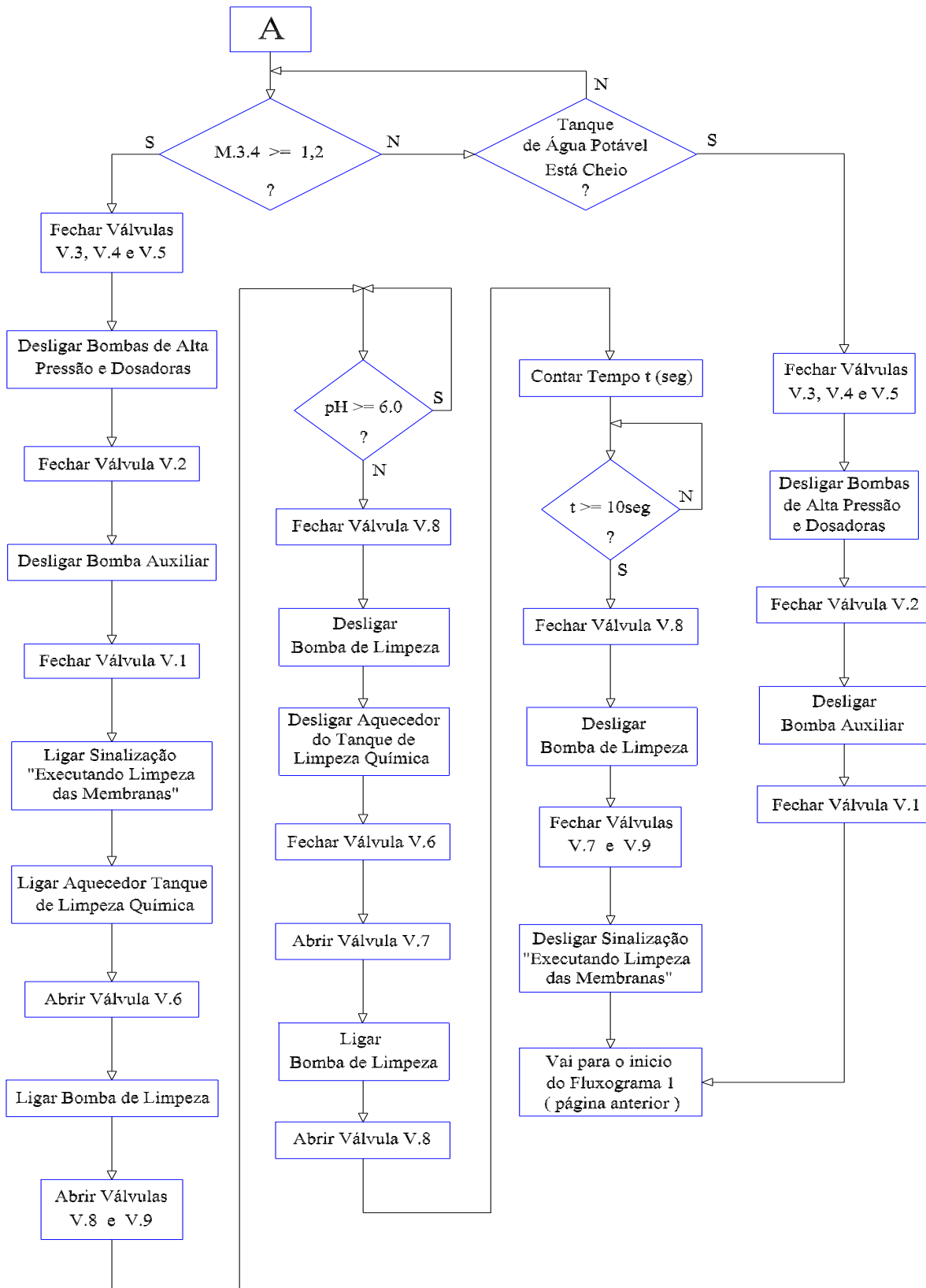


Figura 6.3: Fluxograma 2 (Complementação).

2.500 *litros* de água já acumulada no tanque, então o volume de água a ser produzida será de 2.500 *litros*, durante aproximadamente 4 *horas*. A partir desta situação poderá ocorrer duas hipóteses: a) Durante essas 4 *horas* de produção, a comunidade consumiria mais 1.100 *litros* de água, perfazendo o total de 3.600 *litros* diário e neste caso o dessalinizador continuaria produzindo por mais duas *horas*, num total de 6 *horas* sem interrupção; b) Após as 4 *horas* de operação, o tanque de água potável atingiria o nível máximo e o processo seria finalizado, aguardando novamente este tanque atingir o nível intermediário para o processo ser reiniciado. Nesta segunda hipótese, o processo deverá a cada dia funcionar durante 4 *horas*, ficar parado durante 4 *horas* e funcionar novamente durante 4 *horas*.

A seqüência de operação de toda a planta está contida nos fluxogramas operacionais ilustrados nas Figuras 6.2 e 6.3. O funcionamento do processo começa no bloco "INICIO", mostrado na Figura 6.2 e compara os níveis de água no poço e nos tanques de água bruta e água potável. Dependendo destes níveis de água, o processo se mantém em "espera" ou prossegue com a abertura de válvulas, entrada em funcionamento das bombas, observações das pressões através dos manômetros, até atingir o bloco "A" na parte inferior da Figura 6.2, o qual representa o ponto de conexão com o fluxograma da Figura 6.3, também através do ponto de conexão "A".

Ainda com relação a Figura 6.2, se ocorrer uma diferença de pressão superior a 20% entre a entrada e a saída do pré-filtro, o sistema acusará "Filtro Sujo", necessitando de uma limpeza ou substituição dos elementos deste filtro. A parada e o reinício da operação do sistema é automático, porém a referida limpeza do elemento filtrante é uma tarefa manual, executada pelo homem, (operador responsável pelo funcionamento da planta).

Quanto ao fluxograma da Figura 6.3 tem início no ponto de conexão "A", segue com o teste do diferencial de pressão entre a entrada e a saída das membranas, e verifica se o tanque de água potável está cheio. Dependendo do resultado destes testes o processo segue, dessalinizando até a água atingir o nível máximo do tanque de água potável. Caso contrário, o processo acusa a necessidade de se efetuar uma limpeza química das membranas. Este processo de parada, limpeza das membranas e retorno ao modo de operação, é executado de modo automático.

### 6.3 Modelagem em Redes de Petri

Os fluxogramas apresentados nas Figuras 6.2 e 6.3 foram convertidos numa CPN - Rede de Petri Colorida. Existe uma ferramenta computacional chamada *Design CPN* (JENSEN, 1997), cuja função é construir e testar a funcionalidade da Rede de Petri Colorida. Se houver falhas no fluxograma como *inalcançabilidade* ou *dead lock*, estes serão detectados. Com este procedimento e ferramenta, pode-se garantir a qualidade da automação.

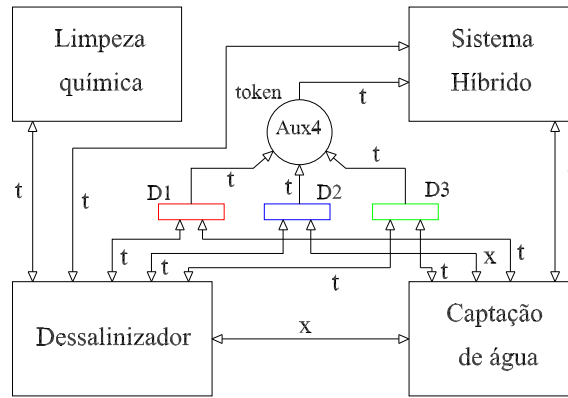


Figura 6.4: Diagrama de Blocos da Rede de Petri do Sistema de Dessalinização Completo.

Ao se construir um fluxograma de um determinado processo, são criados  $n$  transições e  $m$  estados do processo. Para transitar de um estado para outro é necessário cumprir os pré-requisitos exigidos para tal. Há situações que para se chegar a um determinado estado é preciso cumprir os pré-requisitos de mais de um estado simultaneamente. Existe também situações em que ao sair do estado "A" pode-se ir para o "B" ou "C", dependendo das condições atuais do estado "A". Portanto, é normal encontrar num fluxograma, um ou mais estados cujo processo nunca o alcança - *inalcançabilidade*. Também pode-se chegar a outro estado, cujas condições interrompe a continuidade do processo. Esta situação é chamada de *dead lock* ou *bloqueio*.

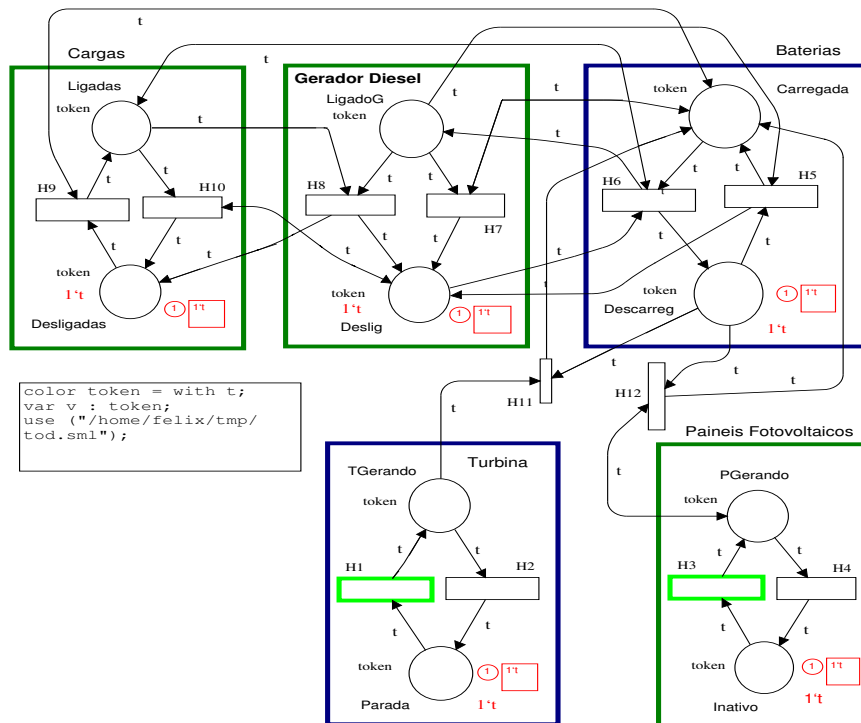


Figura 6.5: Rede de Petri (Parte 1) - Sistema Híbrido de Energia.

A Rede de Petri Colorida deste sistema de dessalinização está representada em forma de diagrama de blocos com as conexões entre estes, na Figura 6.4. Para uma melhor visualização, esta rede é dividida em quatro partes, ilustradas nas Figuras 6.5, 6.7, 6.9 e 6.11.

Na Figura 6.5 é apresentada a rede de Petri colorida referente ao sistema híbrido de energia. Através desta figura pode-se verificar as condições necessárias para uma determinada transição disparar, ou um lugar específico receber ou consumir uma ficha. Através dos disparos de transições e recebimento ou consumo de fichas pelos lugares se observará todo o funcionamento deste processo.

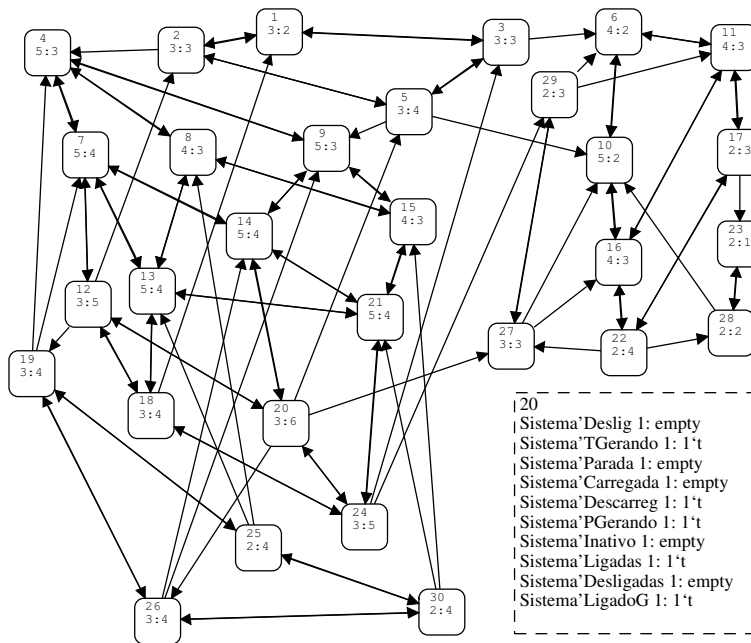


Figura 6.6: Sistema Híbrido - Grafo de ocorrência.

Já o grafo de ocorrência da Figura 6.6 apresenta o resultado da simulação da rede de Petri da Figura 6.5. Neste grafo verificam-se todas as propriedades inerentes a redes de Petri, como por exemplo a alcançabilidade do nó 30 a partir do nó 1, a reversibilidade do processo, pois a partir de qualquer nó se chega ao nó 1.

Na Figura 6.7 é mostrada a rede de Petri colorida referente ao sistema de captação de água bruta de um poço tubular. Através desta figura pode-se observar todo o funcionamento deste processo.

O grafo de ocorrência da Figura 6.8 é muito simples e apresenta o resultado da simulação da rede de Petri da Figura 6.7. Neste grafo observa-se todas as propriedades inerentes a redes de Petri, como alcançabilidade, reversibilidade e vivacidade.

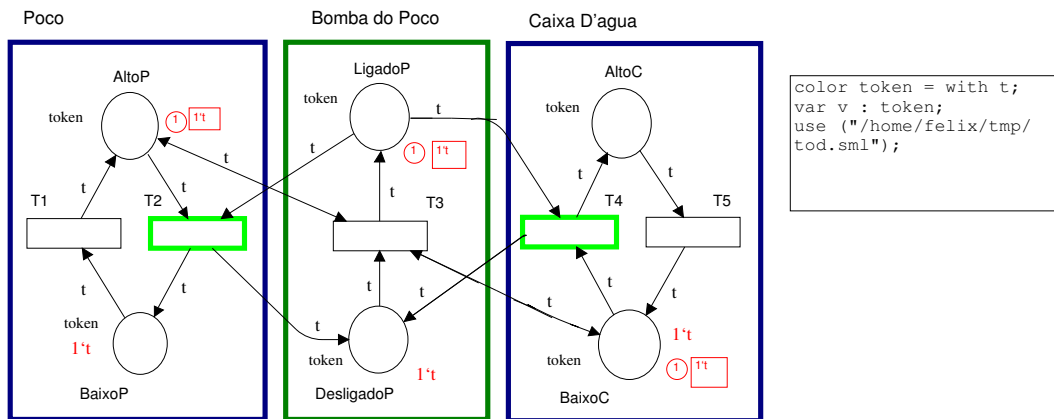


Figura 6.7: Rede de Petri (Parte 2) - Captação de Água Bruta.

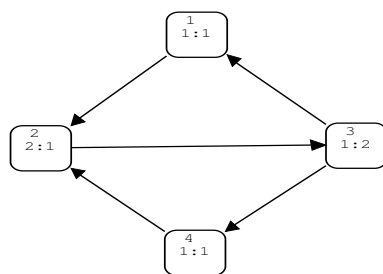


Figura 6.8: Captação de Água Bruta - Grafo de ocorrência.

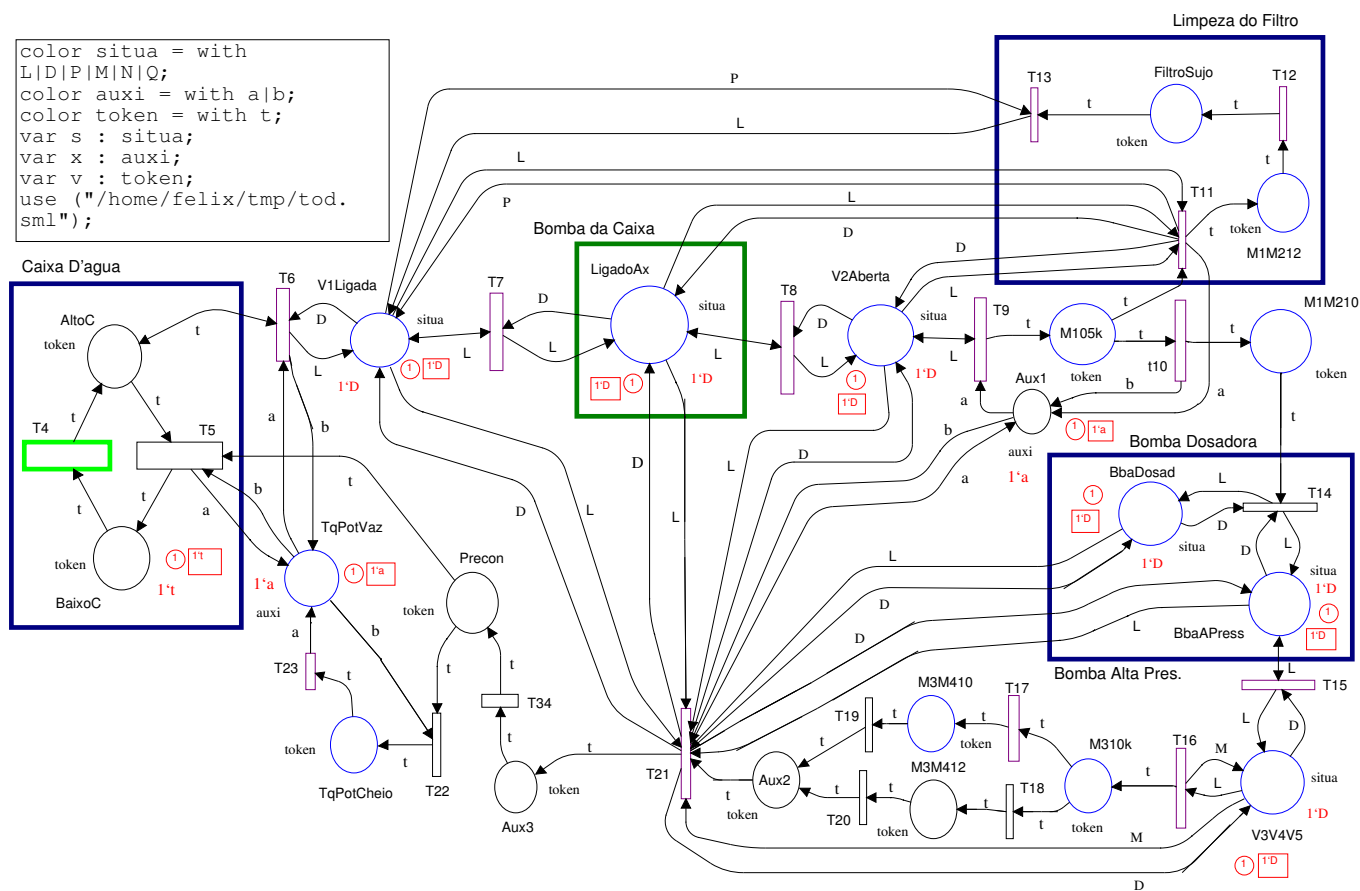


Figura 6.9: Rede de Petri (Parte 3) - Processo de Dessalinização.

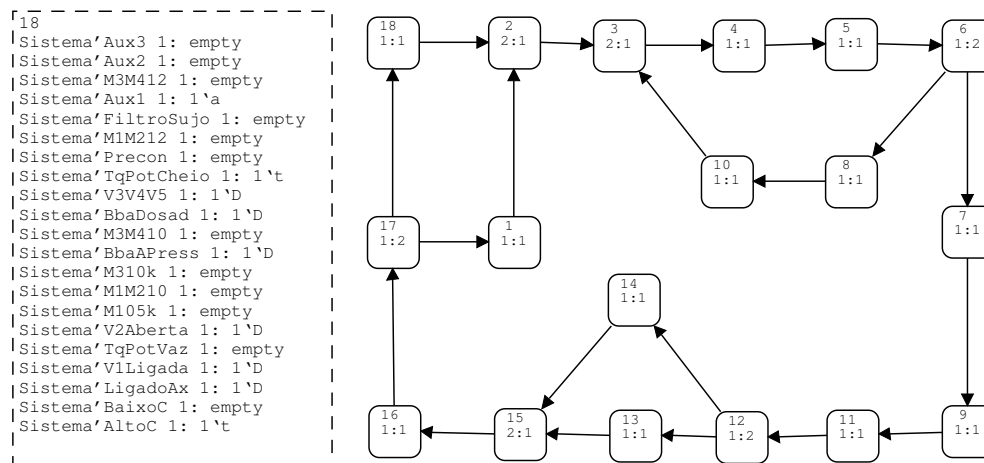


Figura 6.10: Processo de Dessalinização - Grafo de ocorrência.

É apresentada na Figura 6.9 a rede de Petri colorida referente ao sistema de dessalinização propriamente dito. Do mesmo modo, através desta figura pode-se observar todo o funcionamento deste processo.

A Figura 6.10 apresenta o grafo de ocorrência da rede de Petri da Figura 6.9. É fácil verificar neste grafo todas as propriedades inerentes a redes de Petri.

Finalmente, a Figura 6.11 mostra a rede de Petri colorida referente ao sistema de limpeza química do dessalinizador. O funcionamento deste processo pode ser verificado através desta figura.

O grafo de ocorrência da rede de Petri da Figura 6.11 é apresentado na Figura 6.12. Verifica-se neste grafo todas as propriedades inerentes a redes de Petri.

A seguir serão apresentados e analisados os resultados obtidos através das simulações das redes de Petri, em relação a este processo.

## 6.4 Análises dos Resultados

Interligando a rede de Petri do sistema híbrido, ao sistema de captação de água bruta, ambos apresentados respectivamente nas Figuras 6.5 e 6.7 para executar algumas simulações no *Design/CPN*.

Os resultados obtidos foram os seguintes:

### 6.4.1 Sistema híbrido de energia e captação de água

Estatísticas - (*Occurrence Graph*)

- Nodes: 144



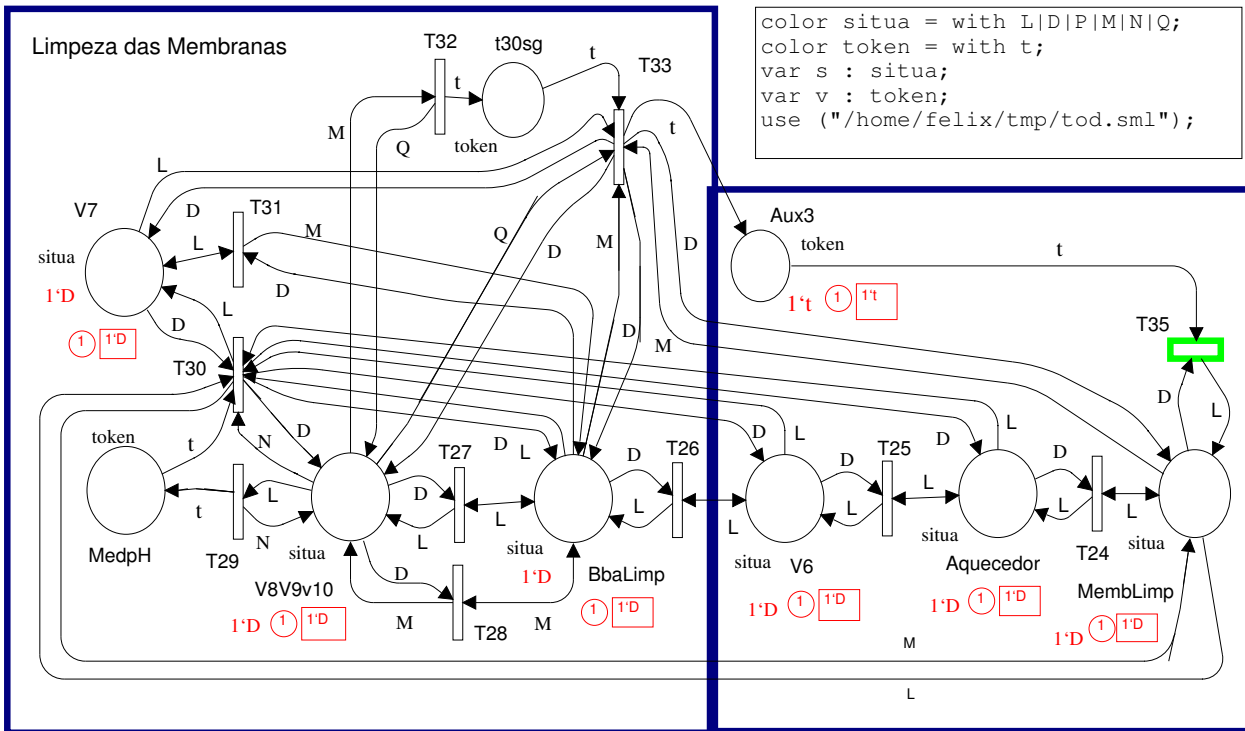


Figura 6.11: Rede de Petri (Parte 4) - Processo de Limpeza.

- Arcs: 716
- Secs: 0
- Status: Full

**Boundedness Properties - Upper - Lower.** Quantidade máxima e mínima de fichas em cada lugar, respectivamente.

Sistema'AltoC	1 - 0	Sistema'AltoP	1 - 0
Sistema'Aux4	1 - 1	Sistema'BaixoC	1 - 0
Sistema'BaixoP	1 - 0	Sistema'Carregada	1 - 0
Sistema'D Descarreg	1 - 0	Sistema'Deslig	1 - 0
Sistema'Desligadas	1 - 0	Sistema'DesligadoP	1 - 0
Sistema'Inativo	1 - 0	Sistema'Ligadas	1 - 0
Sistema'LigadoG	1 - 0	Sistema'LigadoP	1 - 0
Sistema'P Gerando	1 - 0	Sistema'Parada	1 - 0
Sistema'T Gerando	1 - 0	Sistema'V1Ligada	1 - 1

Esta propriedade (*Boundedness*) está informando a quantidade máxima de fichas que cada lugar recebeu. Como se Vê, o número máximo é um. Isto indica que esta é uma rede segura, de acordo com a teoria descrita na seção 2.2.2. Na prática, isto significa que nenhum tanque

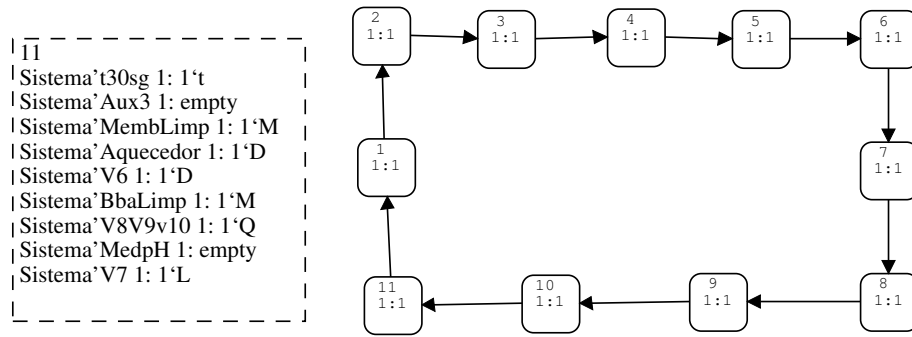


Figura 6.12: Processo de Limpeza - Grafo de ocorrência.

irá transbordar e que nenhum equipamento receberá um comando para ligar ou desligar, se já estiver ligado ou desligado respectivamente.

**Liveness Properties -**

**Dead Markings:** None

**Dead Transitions Instances:** None

Transição morta inexistente indica que todas as transições da rede são disparáveis, podendo ser habilitadas em qualquer instante. Na prática isto significa que, serão realizadas todas as ações previstas nesta rede de Petri, tais como, ligar, desligar, abrir, fechar, encher, esvaziar, entre outras ações.

ListHomeMarkings()	val it = [1,4,9,16,21, 29,41,53,65,81,101, 125,...] : Node list	ListDeadTIs	val it = fn : unit -> Tl. TransInst list
AllReachable()	val it = true : bool	ListDeadMarkings	val it = fn : unit -> Node list
Reachable'(1,144)	A path from node 1 to node 144 is: [1, 3, 8, 15, 24, 34, 46, 58, 72, 90, 109, 132, 142, 144] val it = true : bool	Reachable'(144,1)	A path from node 144 to node 1 is: [144, 128, 141, 6, 2, 1] val it = true : bool

Figura 6.13: Sistema Híbrido de energia e captação de água bruta - Relatório extraído através de funções do Design/CPN.

Os quadros apresentados na Figura 6.13 foram gerados a partir de funções existentes no *Design/CPN*, durante a simulação da rede de Petri elaborada para este trabalho. Entre tantas, foram utilizadas apenas estas seis funções explicadas a seguir:

1. "*ListHomeMarkings()*" - Uma *Home Marking* é uma marcação da qual é sempre possível retornar para uma outra marcação anterior. Com o resultado desta função, conclui-se que o processo pode retornar ao seu início, de diversos pontos (lugares). Isto indica que a propriedade **reversibilidade** é observada;
2. "*AllReachable()*" - Com o resultado desta função: "true", se tem a informação que todos os lugares desta rede são **alcançáveis**, isto é, nenhum equipamento ficará sem funcionar durante o processo;
3. "*Reachable'(1, 144)*" - Esta função retorna, se houver, o caminho para ir do nó "1" ao nó "144", que neste caso é o primeiro e último nó desta rede;
4. "*Reachable'(144, 1)*" - Esta função retorna, se houver, o caminho para ir do nó "144" ao nó "1", ou seja, é o caminho inverso do item anterior. Este resultado vem confirmar a propriedade reversibilidade;
5. "*ListDeadMarkings*" - Como o resultado está indicando: não há marcação morta;
6. "*ListDeadTIs*" - Esta função retorna uma lista de transições mortas. Como esta função não retornou nenhuma transição, conclui-se que todas as transições desta rede são vivas. Isto já foi indicado na propriedade *Liveness*, anteriormente.

Na Figura 6.14 é apresentado o grafo de ocorrência parcial do processo que engloba o sistema híbrido de energia e o sistema de captação de água bruta. Este grafo é composto de 144 nós e 716 arcos, o que o torna de certa forma ilegível se for desenhado completamente. Portanto foi plotado parcialmente, com apenas 47 nós.

## 6.4.2 Sistema de dessalinização e limpeza química

Estatísticas - (*Occurrence Graph*)

- Nodes: 29
- Arcs: 31
- Secs: 0
- Status: Full

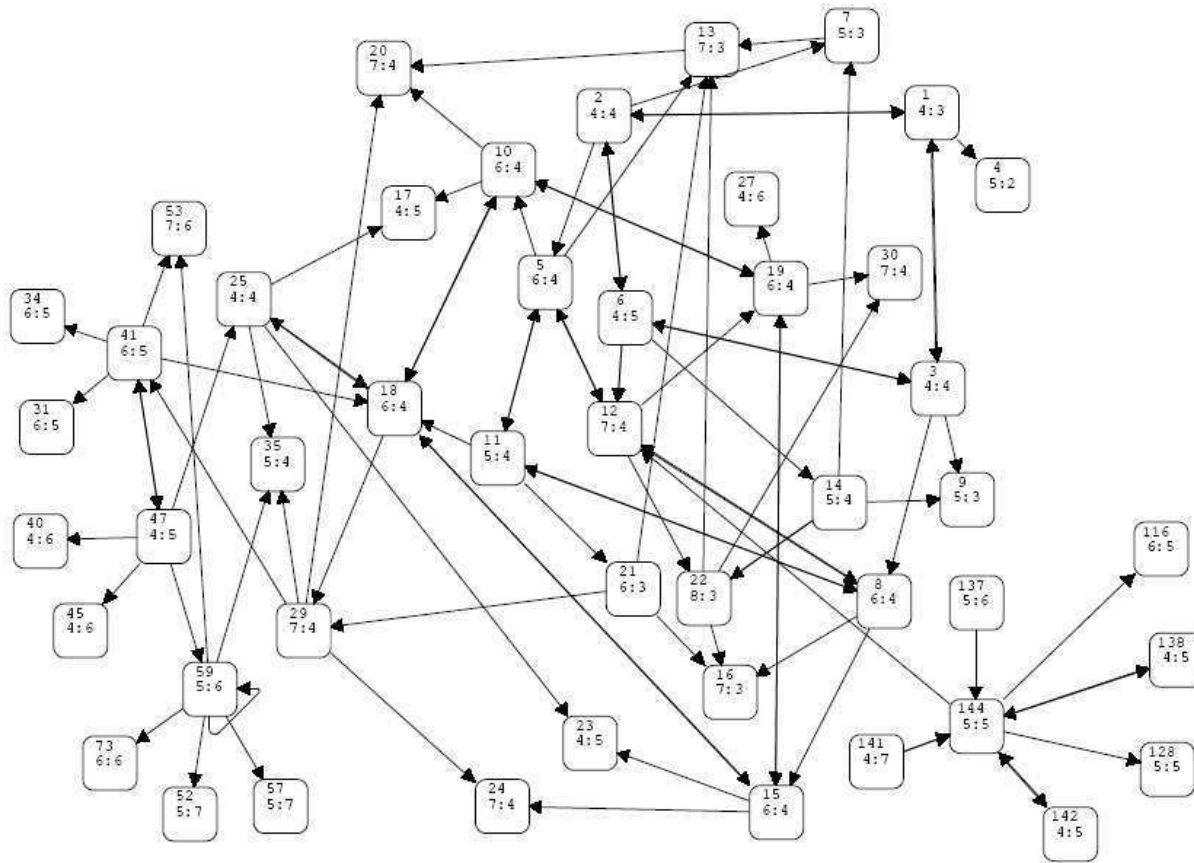


Figura 6.14: Sistema Híbrido de energia e captação de água bruta - Grafo de ocorrência.

**Boundedness Properties - Upper - Lower.** Quantidade máxima e mínima de fichas em cada lugar, respectivamente.

Sistema'Aquecedor	1 - 1	Sistema'Aux1	1 - 0
Sistema'Aux2	1 - 0	Sistema'Aux3	1 - 0
Sistema'BbaAPress	1 - 1	Sistema'BbaDosad	1 - 1
Sistema'BbaLimp	1 - 1	Sistema'FiltroSujo	1 - 0
Sistema'LigadoAx	1 - 1	Sistema'M105k	1 - 0
Sistema'M1M210	1 - 0	Sistema'M1M212	1 - 0
Sistema'M310k	1 - 0	Sistema'M3M410	1 - 0
Sistema'M3M412	1 - 0	Sistema'MedpH	1 - 0
Sistema'MembLimp	1 - 1	Sistema'TPC	1 - 0
Sistema'TqPotCheio	1 - 0	Sistema'TqPotVaz	1 - 0
Sistema'V1Ligada	1 - 1	Sistema'V2Aberta	1 - 1
Sistema'V3V4V5	1 - 1	Sistema'V6	1 - 1
Sistema'V7	1 - 1	Sistema'V8V9v10	1 - 1
Sistema't30sg	1 - 0		

Propriedade (*Boundedness*). Como se observa, o número máximo é um. Isto indica que esta é uma rede segura, de acordo com a teoria descrita na seção 2.2.2. Na prática, isto significa que nenhum tanque irá transbordar e que nenhum equipamento receberá um comando para ligar ou desligar, se já estiver ligado ou desligado respectivamente.

### Liveness Properties -

**Dead Markings:** None

**Dead Transitions Instances:** None

Transição morta inexistente indica que todas as transições da rede são disparáveis, podendo ser habilitadas em qualquer instante. Na prática isto significa que, serão realizadas todas as ações previstas nesta rede de Petri.

Reachable'(1,29)	A path from node 1 to node 29 is: [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29] val it = true : bool
AllReachable()	val it = true : bool
ListHomeMarkings()	val it = [1,2,3,4,5,7,9,6,8,10,11,13,...] : Node list
ListDeadMarkings()	val it = [] : Node list
ListDeadTIs()	val it = [] : TI.TransInst list
ListLiveTIs()	val it = [Sistema'T23 1,Sistema'T22 1,Sistema'T61 1,Sistema'T19 1, Sistema'T33 1, Sistema'T32 1,Sistema'T28 1,Sistema'T31 1,Sistema'T30 1, Sistema'T29 1, Sistema'T27 1,Sistema'T26 1,...] : TI.TransInst list

Figura 6.15: Sistema de dessalinização e limpeza química - Relatório extraído através de funções do Design/CPN.

Os quadros apresentados na Figura 6.15 foram gerados a partir de funções existentes no *Design/CPN*, durante a simulação da rede de Petri elaborada para este trabalho. Entre tantas, foram utilizadas apenas estas seis funções explicadas a seguir:

1. "*ListHomeMarkings()*" - Com o resultado desta função, conclui-se que o processo pode retornar ao seu início, de diversos pontos (lugares). Isto indica que a propriedade **reversibilidade** é observada;

2. "AllReachable()" - Com o resultado desta função: "true", se tem a informação que todos os lugares desta rede são **alcançáveis**, isto é, todos os equipamentos irão funcionar durante o processo, no seu devido tempo;
3. "Reachable'(1,29)" - Esta função retorna, se houver, o caminho para ir do nó "1"ao nó "29", que neste caso é o primeiro e último nó desta rede;
4. "ListLiveTIs" - Esta função retorna uma lista das transições vivas. Como o resultado desta função são todas as transições existentes na rede, conclui-se que não há transição morta, confirmado na propriedade a seguir.
5. "ListDeadTIs" - Como esta função não retornou nenhuma transição, conclui-se que todas as transições desta rede são vivas. Isto já foi indicado na propriedade *Liveness*, anteriormente.
6. "ListDeadMarkings" - Como o resultado está indicando: não há marcação morta;

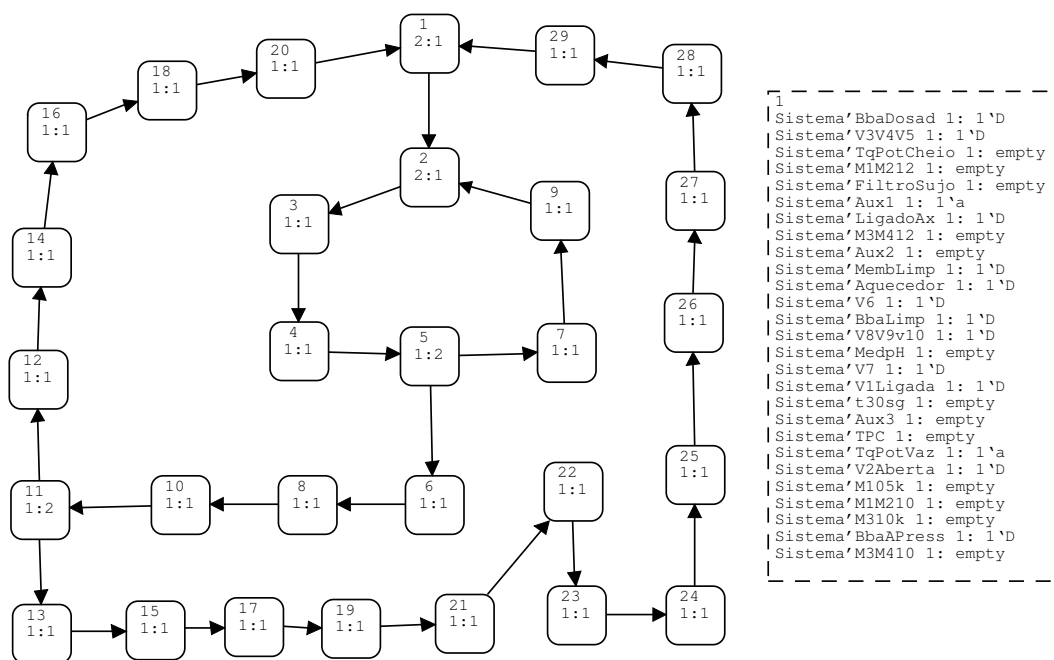


Figura 6.16: Sistema de dessalinização e limpeza química - Grafo de ocorrência.

Na Figura 6.16 é apresentado o grafo de ocorrência completo do processo que engloba o dessalinizador e a limpeza química das membranas. Este grafo é composto de 29 nós e 31 arcos, sendo facilmente plotado na sua totalidade. O quadro ao lado do grafo de ocorrência representa a marcação do nó 1, consequentemente é a marcação inicial desta rede de Petri. Neste quadro, para cada lugar é indicado se existe ficha, o tipo de ficha, ou se o mesmo está vazio (*empty*). "1'D" significa que existe uma ficha do tipo "D".

Também através da figura do grafo de ocorrência, é possível observar que a rede é reversível e todas as marcações são alcançáveis.

## 6.5 Dimensionamento das Cargas

Será feito um dimensionamento de cargas para um dessalinizador com capacidade para produzir  $600\text{litros/hora}$  de água potável, num ciclo diário de 6 horas de trabalho. Com esta produção é possível abastecer uma comunidade com aproximadamente 120 casas com 5 pessoas por casa, e 6 litros de água por pessoa por dia.

É necessário saber quais são as cargas, seus valores, tempo de funcionamento diário e semanal. Estes dados estão na Tabela 6.1:

A potência da bomba do poço é em função da altura manométrica e da vazão necessária para produzir  $600\text{litros/hora}$  de água potável, os quais dependem do nível dinâmico, nível estático e da vazão do poço. Como este trabalho visa a instalação deste sistema em qualquer lugar, então foi predeterminado uma bomba para o poço de 1,0CV, a qual oferece uma vazão de até  $4.000\text{litros/hora}$  com uma altura manométrica de até  $34\text{metros}$  (Dados obtidos através de tabelas do fabricante de bombas Dancor).

Tabela 6.1: Relação das cargas da planta

Descrição das Cargas	Quantidade	Potência ( W )	Ciclo Diário ( h )	Ciclo Semanal	Eficiência ( % )	Tensão ( V )	Consumo Diário ( Ah )
Bomba do Poço	1	736	6	6/7	90,0	24	175,21
Bomba Auxiliar	1	184	6	6/7	90,0	24	43,80
Bomba Alta Pressão	1	736	6	6/7	90,0	24	175,21
Bomba Dosadora 1	1	17	6	6/7	90,0	24	4,05
Bomba Dosadora 2	1	25	6	6/7	90,0	24	5,95
Iluminação (2x45W)	2	45	1	6/7	90,0	24	1,79
Diversos	1	184	6	6/7	90,0	24	43,80
Consumo total	8	1.927					449,81
Consumo p/hora(A)							75,00

## 6.6 Automação

Entende-se por automação qualquer sistema, apoiado em computadores, que substitua o trabalho humano e que vise a soluções rápidas e econômicas para atingir os complexos objetivos

das indústrias e dos serviços. Os pequenos computadores de processo são mais poderosos, pois permitem:

- coletar informações importantes sobre o processo a ser controlado, para criar o modelo matemático;
- sintetizar leis de controle ótimo, *off-line*;
- simular desempenhos;
- implantar sofisticadas leis de controle de operação "em tempo real", regras de segurança;
- facilitar interfaces com supervisores.

A automação implica a implantação de sistemas interligados e assistidos por redes de comunicação, compreendendo sistemas supervisórios e interfaces homem-máquina que possam auxiliar os operadores no exercício de supervisão e análise dos problemas que porventura venham a ocorrer.

Neste contexto, são de extraordinária importância os CLPs (controladores lógicos programáveis), que tornaram a automação industrial propriamente dita uma realidade (MORAES; CASTRUCCI, 2001).

Após ser realizado o dimensionamento das cargas necessárias para se construir um dessalinizador que atenda as necessidades de uma determinada localidade, foi descrito o funcionamento de cada subconjunto do sistema, e do sistema como um todo. O passo seguinte foi elaborar um fluxograma do processo que satisfaça as condições operacionais do sistema.

A partir destas informações, contidas no fluxograma e na descrição de funcionamento da planta, elaborou-se a rede de Petri colorida descrevendo este processo, apresentada nas Figuras 6.4 à 6.12. Foram realizadas simulações desta rede de Petri através da ferramenta computacional Design/CPN, verificando a validade de todas as propriedades inerentes a redes de Petri, confirmando assim a funcionalidade do referido processo. As análises dos resultados destas simulações estão apresentadas nos itens **6.4.1** e **6.4.2**.

É importante deixar claro que a modelagem com redes de Petri já inclui implicitamente ações de controle. Deste modo, a verificação das propriedades garante a correção da solução de controle e, conseqüentemente poderá ser implementada com segurança.

Uma próxima etapa a ser realizada, é a automatização do sistema de dessalinização com fontes de energias renováveis. Isto significa transformar as informações contidas na rede de Petri elaborada para este sistema em código "ladder" do CLP.

Como informação preliminar, o CLP é um dispositivo digital que controla máquinas e processos. Utiliza uma memória programável para armazenar instruções e executar funções específicas como controle de energização/desenergização, temporização, contagem, seqüenciamento, operações matemáticas e manipulação de dados.



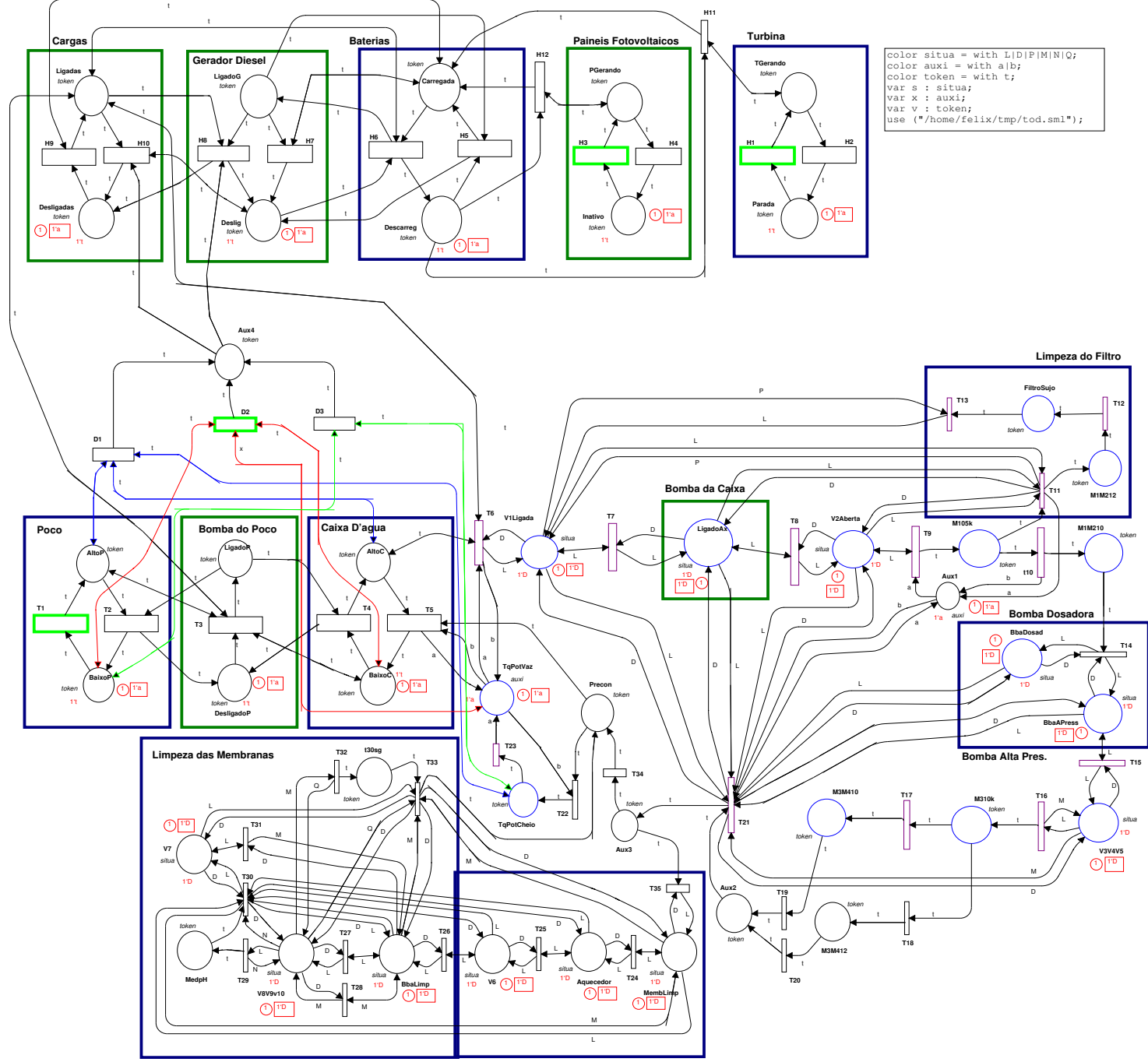


Figura 6.17: Sistema Completo - Dessalinização e sistema híbrido de energia

## Instrumentação

Será necessário instrumentalizar todo o sistema, com sensores de níveis, manômetros, pressostatos, pHmetros, termômetros e rotômetros, para obtenção de sinais oriundos das diversas partes e equipamentos da planta, enviando-os para o CLP (Controlador Lógico Programável). Na Figura 6.1 deste capítulo foi ilustrado um diagrama do sistema de dessalinização, contendo toda a instrumentação e atuadores necessários para que a mesma possa ser automatizada.

## Sistema Supervisório

Em um microcomputador remoto, será instalado um sistema supervisório (ainda a ser especificado) e elaborado um programa de aplicação dedicado à operação deste sistema, em conformidade com a aplicação do CLP, a fim de permitir que o CLP e o Supervisório possam se comunicar via modem. Esta comunicação significa enviar e receber dados um do outro, enviar e receber comandos. Através deste sistema supervisório, o operador poderá obter relatórios referentes ao processo, tais como, produtividade, paradas, falhas, disponibilidades dos produtos, entre outros, além de poder interferir no processo através do envio de alguns comandos.

## 6.7 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados cada subconjunto da planta de dessalinização, com suas funções principais, seus limites e suas hierarquias em relação ao todo. Foi também apresentado o *layout* da planta, com todos os equipamentos necessários ao seu funcionamento, além do fluxo operacional completo da planta, através do fluxograma ilustrados nas Figuras 6.2 e 6.3 e da rede de Petri colorida ilustrada da Figura 6.4 a 6.12.

Finalmente, o processo como um todo foi dividido em duas partes, realizado algumas simulações e apresentado a análise dos resultados obtidos através destas simulações.

Foi elaborado um dimensionamento das cargas necessárias para o funcionamento do sistema de dessalinização e apresentado na tabela 6.1.

# Capítulo 7

## Conclusões

Este trabalho tratou das possibilidades de utilização de métodos formais, no caso redes de Petri colorida e como ferramenta computacional para simulação, foi utilizado o Design CPN, no estudo de automatização de um processo industrial, mais especificamente um sistema de dessalinização via osmose inversa, alimentado por fontes de energias renováveis, abrangendo turbina eólica, painéis fotovoltaicos, banco de baterias e um grupo gerador.

### 7.1 Resultados Obtidos

A modelagem de uma planta que é constituída de uma usina de dessalinização e de um sistema híbrido de geração de energia elétrica foi apresentada neste trabalho. Os modelos em rede de Petri colorida apresentados tratam de todos os subsistemas da planta e do sistema global que é a usina de dessalinização juntamente com o sistema híbrido de energia. Os resultados obtidos demonstram que o modelo em rede de Petri e a ferramenta Design/CPN proporcionam um ambiente viável para uma análise de sistemas complexos, tais como o que está sendo proposto neste trabalho. A complexidade do sistema é caracterizada pela existência de componentes elétricos, mecânicos, químicos e, todos eles interagindo. A utilização do Design/CPN permitiu estudar e conceber várias leis de controle para a usina de dessalinização. O sistema de controle da usina de dessalinização que está em fase de implantação será montado com controladores lógicos programáveis. Deste modo, a construção do modelo permitiu, além da verificação de propriedades, a elaboração do programa de controle que será executado pelos controladores lógico programáveis. O estudo realizado mostrou resultados eficazes no que se refere ao refinamento de projeto de automação da planta de dessalinização alimentada por um sistema híbrido de geração de energia elétrica.

## 7.2 Contribuições

O presente trabalho tem vários aspectos positivos em termos de inovação tecnológica. Os mais relevantes são:

1. Desenvolvimento de um modelo a eventos discretos, baseado em redes de Petri, para representar os subsistemas e a usina de dessalinização que viabiliza o projeto do sistema de controle automático da própria usina.

1. Desenvolvimento de um modelo a eventos discretos, baseado em redes de Petri, para gerenciamento das fontes de geração de energias renováveis que fornece energia para o funcionamento da usina de dessalinização.

## 7.3 Perspectivas

Considerando a importância do presente trabalho com respeito a matriz da distribuição de águas subterrâneas doces e salobras no semi-árido brasileiro, apresenta-se as seguintes perspectivas:

1. Refinar o controle do sistema híbrido a partir do gerenciamento das fontes renováveis, com a inclusão do banco de baterias, do grupo gerador e das cargas.

2. Implementação do modelo em um sistema de dessalinização no campo, visando monitorar a qualidade da água, a capacidade de produção do sistema e os efeitos causados através das incrustações durante o processo.

3. Estudar e desenvolver uma interface computacional que a partir da rede de Petri possa gerar o programa do CLP, ambos elaborados para este sistema.

4. Estudar o desempenho do sistema híbrido em função da sazonalidade.

# Apêndice A

## Painéis Fotovoltaicos

Painéis Fotovoltaicos são formados por dezenas de células solares, que são as unidades básicas dos painéis. As células solares convertem a radiação solar incidente sobre a mesma em energia elétrica. Esta conversão é limitada para o espectro de radiação solar. O material básico usado na construção da maioria das células existentes no mercado é silício e quartzo (SiO<sub>2</sub>). Atualmente três tipos de tecnologia são empregadas na produção de células solares: monocristalino, policristalino e silício amorfo com eficiências típicas de 15%, 13% e 7% respectivamente. Para geração de energia fotovoltaica a tecnologia usada hoje é o Si-cristalino (CASTRO, 2004).

Um gerador solar consiste de um número de módulos, formado pela interconexão de células solares, conectadas em série e paralelo para fornecer a tensão e a corrente necessária. A performance do gerador depende primeiramente da qualidade dos módulos que o compõem e das células que compõem cada módulo. A energia elétrica gerada por cada célula depende diretamente da radiação solar que incide sobre esta célula.

### A.1 Modelagem dos Painéis Solares

O circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica é mostrado na Figura A.1:

A fonte de corrente  $I_s$  representa a corrente elétrica gerada pela irradiação solar incidente sobre a superfície ativa da célula; esta corrente unidirecional é constante para uma dada irradiação incidente. Como a célula é composta por silício, ela se comportará como um diodo que é atravessado por uma corrente interna unidirecional  $I_d$ , que depende da tensão  $V$  nos terminais da célula. Na célula observa-se uma queda de tensão no circuito até os contatos externos, causada por uma resistência parasita série  $R_s$ . Do mesmo modo, existe uma corrente de fuga, provocada por uma resistência parasita paralela,  $R_{sh}$ . A corrente  $I$  devido a carga (CASTRO, 2004) é dada por:

$$I = I_s - I_d - I_{sh} \quad (\text{A.1})$$

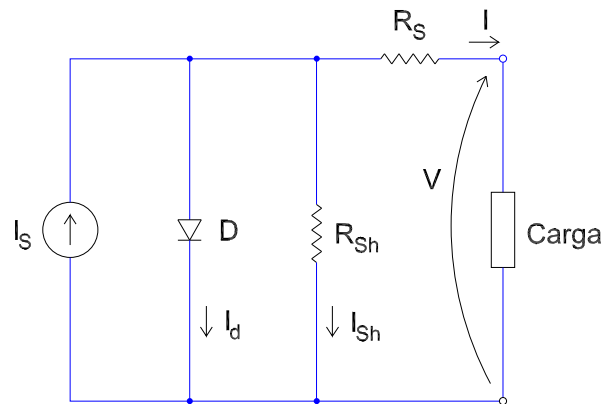


Figura A.1: Circuito Elétrico Equivalente.

onde:  $I_s$  - Corrente gerada pela célula;  $I_d$  - Corrente no diodo;  $I_{sh}$  - Corrente que passa pela resistência paralela. A corrente que passa através do diodo (SHALIMOVA, 1975) é :

$$I_d = I_o \left\{ \exp\left[\frac{qV_d}{mkT_{cel}}\right] - 1 \right\} \quad (\text{A.2})$$

onde:  $I_o$  - Corrente reversa máxima de saturação do diodo;  $V_d$  - Tensão nos terminais do diodo;  $m$  - Fator de idealidade do diodo;  $T_{cel}$  - Temperatura absoluta da célula fotovoltaica em  $K$ ;  $k$  - Constante de Boltzmann ( $k = 1,38e^{-23} J/K$ );  $q$  - Carga do elétron ( $q = 1,6e^{-19} \text{ Coulomb}$ ).

A tensão nos terminais do diodo é:

$$V_d = V + R_s I. \quad (\text{A.3})$$

E a corrente que passa através da resistência parasita paralela é:

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{A.4})$$

onde:  $R_s$  - Resistência parasita série;  $R_{sh}$  - Resistência parasita paralela.

A partir das equações anteriores pode-se chegar a equação que descreve a corrente que uma célula fotovoltaica fornece à uma carga, substituindo A.2, A.3 e A.4 em A.1:

$$I = I_s - I_o \left\{ \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{mkT_{cel}}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}. \quad (\text{A.5})$$

Na Figura A.2 é mostrada a curva  $I - V$  de uma célula que possui as seguinte especificações do fabricante:  $V_{max} = 0,4667 \text{ V}$ ;  $I_{max} = 1,1875 \text{ A}$ ;  $V_{ca} = 0,5833 \text{ V}$ ;  $I_{cc} = 1,2925 \text{ A}$ . Os valores de  $R_s$  e  $R_{sh}$  foram obtidos experimentalmente e tem os seguintes valores:  $R_s = 0,0256 \Omega$  e  $R_{sh} = 40 \Omega$ .

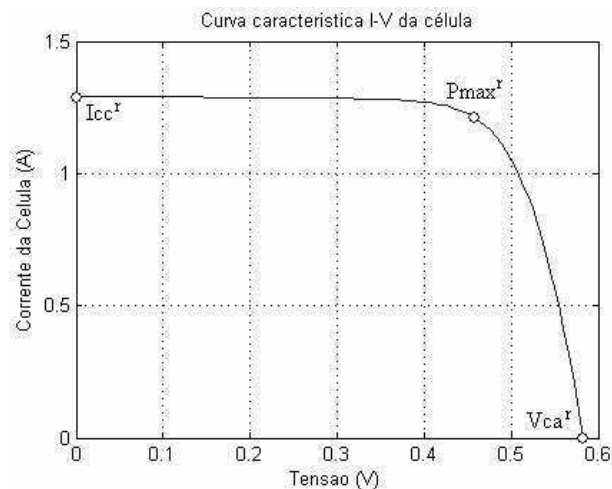


Figura A.2: Curva Característica Típica de uma célula de silício cristalino.

O ponto de máxima potência obtida da célula fotovoltaica está no joelho da curva que equivale a uma tensão de aproximadamente  $0,46V$ .

## A.2 Influência da Radiação Solar Incidente e da Temperatura

Com a variação da temperatura observa-se que:

- A potência de saída decresce com o aumento da temperatura;
- A tensão de circuito aberto decresce com a temperatura (aproximadamente  $2,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ );
- A corrente de curto-circuito varia muito pouco com a temperatura, sendo esta variação desprezada nos cálculos.

Na Figura A.3, ilustra-se a variação da curva  $I - V$  com a temperatura para a célula que serviu anteriormente de exemplo. A célula está sob a incidência de uma insolação  $G$  de  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ .

A corrente reversa de saturação  $I_o$  pode ser escrita em termos das características do material, da temperatura do material, e das condições de referência (CASTRO, 2004):

$$I_o = I_{or} \left( \frac{T}{T^r} \right)^3 \left\{ \exp \left[ \frac{\varepsilon}{m'} \left( \frac{1}{V_t^r} - \frac{1}{V_t} \right) \right] \right\} \quad (\text{A.6})$$

onde:

$T^r$  - temperatura de referência ( $T^r = 298,16 \text{ K}$ );  $T$  - temperatura da célula em  $K$ ;  $\varepsilon$  - barreira de junção do silício =  $1,12 \text{ eV}$ ;  $m'$  - fator de idealidade equivalente.

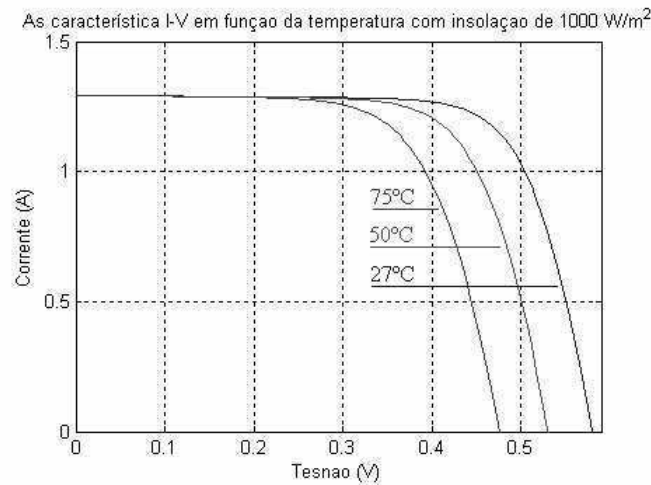


Figura A.3: Influência da Temperatura no comportamento da célula.

$$m' = \frac{m}{N_{sn}} \quad (\text{A.7})$$

em que  $N_{sn}$  é o número de células ligadas em série;  $V_t$  = Potencial térmico em *Volt*.

Já com a variação da radiação solar incidente sobre a célula, se observa o seguinte:

- A potência de saída aumenta com o aumento da radiação solar incidente;
- A corrente de curto-circuito varia linearmente com a radiação solar incidente;
- A tensão de circuito aberto varia pouco com a radiação solar incidente, sendo esta variação, no entanto, mais importante para valores baixos de radiação solar incidente.

Na Figura A.4, ilustra-se a variação da curva I-V com a radiação solar incidente para uma célula com tais características:  $V_{max} = 0,4667 \text{ V}$ ;  $I_{max} = 1,1875 \text{ A}$ ;  $V_{ca} = 0,5833 \text{ V}$ ;  $I_{cc} = 1,2925 \text{ A}$ . A temperatura em que a célula se encontra é de  $27^\circ\text{C}$ .

Como o que varia com maior grau é a corrente de curto-circuito, ela será dada pela equação A.7 (CASTRO, 2004):

$$I_{cc} = I_{cc}^r \frac{G}{G_r} \quad (\text{A.8})$$

em que  $G$  é a radiação solar incidente. Como a corrente gerada pela célula  $I_s$  está diretamente ligada a corrente de curto-circuito, pode-se dizer então que:

$$I_s = I_s^r \frac{G}{G_r}. \quad (\text{A.9})$$



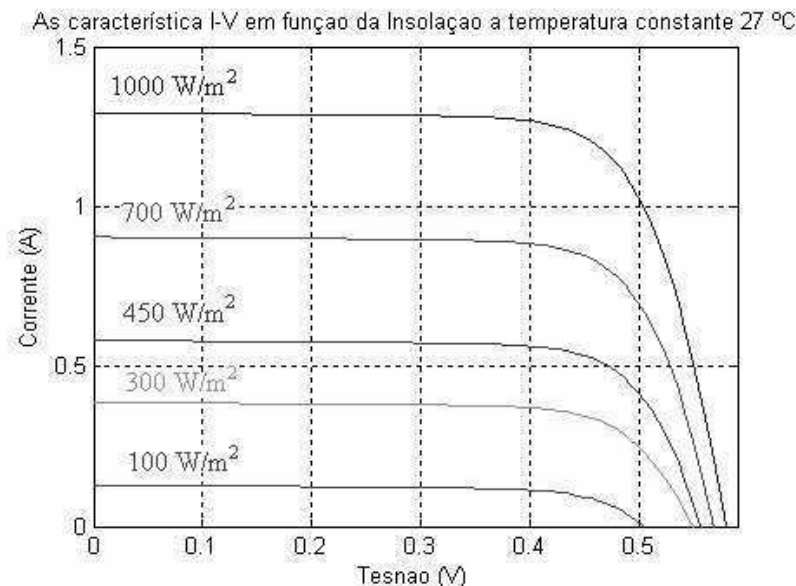


Figura A.4: Influência da Radiação Solar.

### A.3 Maximum Power Point Tracking - MPPT

A potência que pode ser produzida por um painel fotovoltaico é primeiramente dependente da irradiação solar, mostrado na Figura A.4 e com uma magnitude menor sobre a temperatura da célula solar, como descrito pelo gráfico da Figura A.3. Por causa desta dependência, os painéis solares podem apenas prover máxima potência a um nível específico de tensão e corrente. A operação do gerador solar para levar ao seu ponto de máxima potência (MPP) implica igualar a impedância da carga com a do gerador. Para esta proposta um dispositivo eletrônico (normalmente um conversor DC-DC) capaz de executar a função do *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) que significa "Seguidor do Ponto de Máxima Potência", ou uma aproximação para isto, tem de ser conectado entre o painel solar e a carga, ou incluído no circuito do inversor, dependendo do tipo de carga. Existem diferentes métodos e estratégias de controle para igualar o ponto de operação do painel fotovoltaico e da carga. Neste trabalho será tratado, de forma resumida, apenas o método de Controle por MPP-Seguidor (DAMM, 1994).

O método de controle conhecido como o *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) é baseado num algoritmo, no qual o ponto máximo da curva de potência é encontrado sem interromper a operação normal do gerador solar. Este controle não é baseado no valor de referência prefixado determinado a partir do sistema ou a partir de parâmetros operacionais. O valor de controle de referência é obtido pela procura continuamente do ponto de máxima potência da curva característica I-V do gerador fotovoltaico. Para um certo ponto de trabalho num tempo  $t_1$ , a tensão correspondente varia num determinado intervalo de tempo; Se isto produz um incremento da potência de saída, a direção de busca no próximo intervalo de tempo  $t$  é mantida, de modo

contrário a direção será invertida. Este esquema é conhecido como *closed loop tracking* (DAMM, 1994).

O atual ponto de trabalho se move dentro de um certo intervalo de tensão ao redor do ponto de máxima potência. Isto normalmente causa instabilidade e adiciona alguma forma de ruído ao sinal de controle que em algumas circunstâncias pode influenciar a operação do sistema (DAMM, 1994).

Basicamente a busca do MPP envolve o sinal de corrente e tensão e pela multiplicação destes se calcula a potência de saída do gerador. Atualmente isto é feito de acordo com o tipo de algoritmo de controle usado. Baseado em algoritmos diferentes, existem vários métodos de controle implementado em MPP-Seguidor (DAMM, 1994).

# Apêndice B

## Turbina Eólica

A turbina eólica é mais uma opção de fonte de energia renovável, e funciona a partir da existência de ventos em suas pás. Diferentemente dos painéis fotovoltaicos, independe de ser dia ou noite. Esta fonte de energia complementa a falta da outra.

### B.1 História e Realidade Brasileira

A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares. A utilização desta fonte energética para a geração de eletricidade, em escala comercial, teve início há pouco mais de 30 anos e através de conhecimentos da indústria aeronáutica os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de idéias e conceitos preliminares para produtos de alta tecnologia. No início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e carvão. Mais de 50.000 novos empregos foram criados e uma sólida indústria de componentes e equipamentos foi desenvolvida. Atualmente, a indústria de turbinas eólicas vem acumulando crescimentos anuais acima de 30% e movimentando cerca de 2 bilhões de dólares em vendas por ano (1999). Existem, atualmente, mais de 30.000 turbinas eólicas de grande porte em operação no mundo, com capacidade instalada da ordem de 13.500 MW. No âmbito do Comitê Internacional de Mudanças Climáticas, está sendo projetada a instalação de 30.000 MW, por volta do ano 2030, podendo tal projeção ser estendida em função da perspectiva de venda dos "Certificados de Carbono"(CBEE, 2004).

No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cata-ventos multipás para bombeamento d'água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado. Grande atenção tem sido dirigida para o Estado do Ceará, por este ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de

levantamento do potencial eólico através de medidas de vento com modernos anemógrafos computadorizados. Entretanto, não foi apenas na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. Em Minas Gerais, por exemplo, uma central eólica está em funcionamento, desde 1994, em um local (afastado mais de 1000 km da costa) com excelentes condições de vento. A capacidade instalada no Brasil é de 20,3 MW, com turbinas eólicas de médio e grande portes conectadas à rede elétrica. Além disso, existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas - bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural (CBEE, 2004).

A avaliação precisa do potencial de vento em uma região é o primeiro e fundamental passo para o aproveitamento do recurso eólico como fonte de energia. Para a avaliação do potencial eólico de uma região faz-se necessária a coleta de dados de vento com precisão e qualidade. Em geral, os dados de vento coletados para outros usos (aeroportos, estações meteorológicas, agricultura) são pouco representativos da energia contida no vento e não podem ser utilizados para a determinação da energia gerada por uma turbina eólica - que é o objetivo principal do mapeamento eólico de uma região. No Brasil, assim como em várias partes do mundo, quase não existem dados de vento com qualidade para uma avaliação do potencial eólico. Os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para energia eólica foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha/Pernambuco apenas no início dos anos 90. Os bons resultados obtidos com aquelas medições favoreceram a determinação precisa do potencial eólico daqueles locais e a instalação de turbinas eólicas. Vários estados brasileiros seguiram os passos de Ceará e Pernambuco e iniciaram programas de levantamento de dados de vento. Hoje existem mais de cem anemógrafos computadorizados espalhados por vários estados brasileiros.

## B.2 Mapeamento dos Ventos no Brasil

A análise dos dados de vento de vários locais no Nordeste confirmaram as características dos ventos comerciais (*trade-winds*) existentes na região: velocidades médias de vento altas, pouca variação nas direções do vento e pouca turbulência durante todo o ano. Além disso foram observados fatores de forma de Weibull (da distribuição estatística de Weibull), ( $k_f$ ), maiores que 3 - valores considerados muito altos quando comparados com os ventos registrados na Europa e Estados Unidos. Dada a importância da caracterização dos recursos eólicos da região Nordeste, o Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE, com o apoio da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e do Ministério de Ciência e Tecnologia - MCT lançou, em 1998, a primeira versão do Atlas Eólico do Nordeste do Brasil (WANEB - Wind Atlas for the Northeast of Brazil) com o objetivo principal de desenvolver modelos atmosféricos, analisar dados de ventos e elaborar mapas eólicos confiáveis para a região (CBEE, 2004). Um mapa de ventos preliminar do Brasil gerado a partir de simulações computacionais com modelos atmosféricos é mostrado

na Figura B.1.

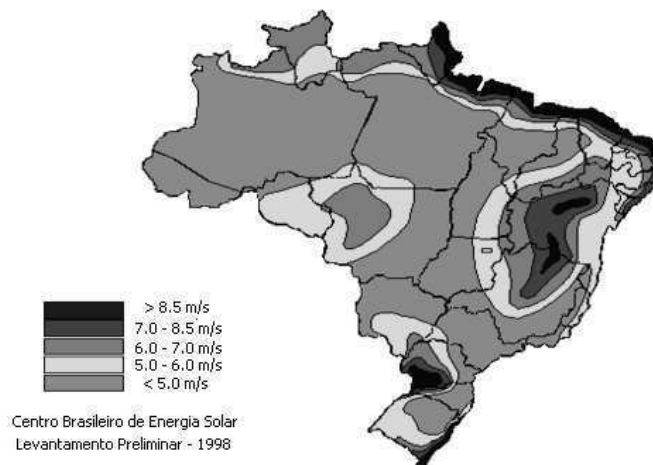


Figura B.1: Mapa de Ventos do Brasil.

### B.3 Turbina Eólica

A função da turbina eólica é transformar a energia eólica em eletricidade. A energia contida no vento é a energia cinética do ar em movimento. A potência disponível em uma seção de  $A_{pa}m^2$  de uma massa de ar se movimentando a uma velocidade de  $V\text{ m/s}$ :

$$P_v = (1/2)\rho_{ar}A_{pa}V_v^3 \quad (\text{B.1})$$

onde  $P_v$  é a potência contida no vento,  $\rho_{ar}$  a massa específica do ar,  $A_{pa}$  é a área de abrangência das pás em  $m^2$ , mostrada na Figura B.2 e  $V_v$  a velocidade do vento em  $m/s$ .

Em condições atmosféricas normais, a massa específica do ar não varia significativamente, de modo que a potência disponível do vento é essencialmente proporcional ao cubo de sua velocidade. Segundo a Organização Aeronáutica Civil Internacional, o valor da densidade do ar sob condições padrão (nível do mar,  $15^\circ C$ ) é  $1,225\text{ kg/m}^3$ . O aerogerador é a máquina empregada para converter a energia contida no vento em energia elétrica (BLASQUES, 1999).

Primeiramente a energia do vento é convertida em energia mecânica no eixo da turbina eólica, que por sua vez é convertida em energia elétrica através do gerador acoplado (alternador). Segundo a equação B.1, a potência é proporcional a área de captação, que neste caso é a área definida pelo disco formado pelas pás da turbina eólica, sendo este o motivo fundamental do incremento observado no tamanho das pás dos grandes aerogeradores.

Um vento de  $12\text{ m/s}$  tem uma densidade de potência de mais de  $1\text{ kW/m}^2$ , a qual não poderá ser aproveitada totalmente devido à eficiência de conversão da turbina eólica. Tal eficiência ou

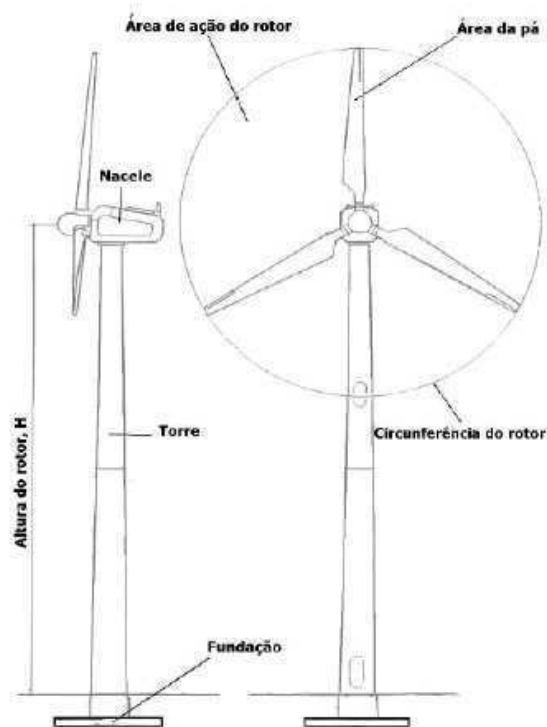


Figura B.2: Componentes principais de uma turbina eólica de eixo horizontal.

fator, recebe o nome de coeficiente de potência  $C_P$ , e tem um limite máximo teórico de 59% para aerogeradores com rotor em forma de disco. Assim a potência aproveitada pelas máquinas eólicas será determinada pela equação B.2 (BLASQUES, 1999).

$$P_v/A_{pa} = (1/2)\rho_{ar}C_P V_v^3 \quad (\text{B.2})$$

onde a relação  $P_v/A_{pa}$  permite normalizar a potência produzida em relação a área de captação, ou área definida pela turbina eólica.

Do ponto de vista formal, uma turbina eólica é constituída unicamente pelo rotor-pás e respectiva ligação mecânica - de um sistema de conversão de energia do vento em energia elétrica. Entretanto quando se fala em turbina eólica, está se referindo a todo o sistema de conversão, desde as pás até a saída do gerador elétrico, incluindo o sistema de conversão de frequência, quando existente. Uma turbina eólica é composta, basicamente, por um gerador elétrico ligado ao rotor da turbina, um sistema de transmissão, um multiplicador de velocidades em sistemas convencionais, um sistema de controle, um sistema local de compensação de energia reativa, um transformador elevador e um sistema de proteção elétrica, onde é mostrado na Figura B.3.

A conexão da turbina com a carga ou com a rede elétrica pode ser de forma direta ou através de conversor de frequência.

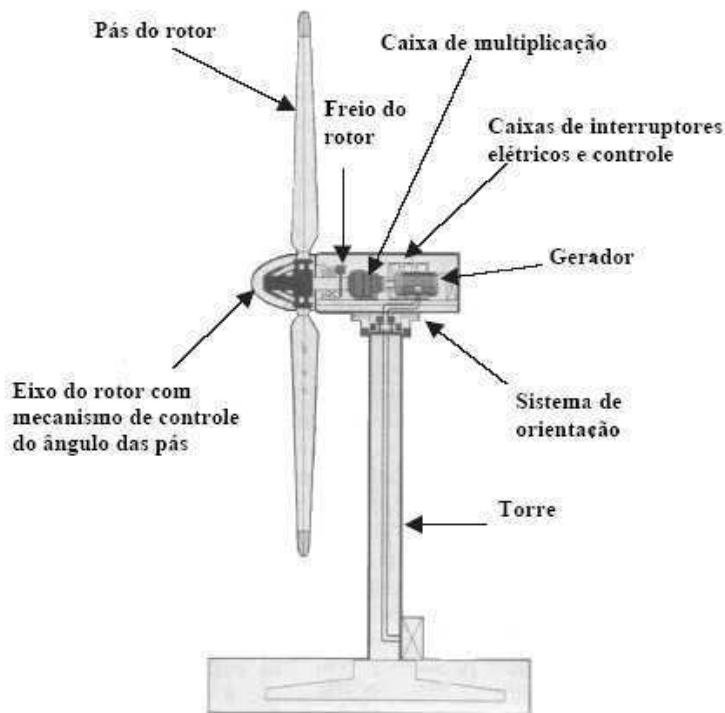


Figura B.3: Seção de uma turbina eólica típica.

## B.4 Avaliação do Potencial Energético do Vento

A avaliação do potencial eólico de um local tem por objetivo determinar a energia possível de se obter mediante um sistema eólico durante um determinado período, visando justificar ou não a sua exploração frente a outras opções, mais ou menos econômicas. Para isto pode ser necessária a extrapolação da velocidade do vento a partir das medições de vários anos do local. É importante salientar que as medidas das velocidades do vento devem ser muito exatas, pois como mostra a equação B.1, uma incerteza de 10% na velocidade medida provoca uma incerteza de mais de 30% na potência calculada.

As medições realizadas são em geral reduzidas a parâmetros estatísticos, sendo os mais conhecidos a média, a variância e o desvio padrão. Entre os relacionados com a probabilidade de ocorrência de velocidades encontra-se o fator de forma, ( $k_f$ ) e o fator de escala ( $c_f$ ) da função de distribuição de Weibull.

A forma mais simples de estimar a potência média do vento (por unidade de área),  $\overline{P}_v$ , a partir de uma série de medições de velocidades é através da equação B.3:

$$\overline{P}_v = (1/2)\rho_{ar}k_e\overline{V}_v^3 \quad (\text{B.3})$$

onde  $\overline{V}_v$  é a velocidade média do vento no período e  $k_e$  é o fator padrão de energia, que pode ser determinado como:

$$k_e = \frac{\frac{\sum V_{vi}^3}{N}}{[\frac{\sum V_{vi}}{N}]^3} \quad (\text{B.4})$$

onde  $V_{vi}$  representa a amostra  $i$  da série de velocidades do vento e  $N$  é o total de amostras.

A energia elétrica  $E_a$  que poderia fornecer um aerogerador sob um regime de vento determinado, pode ser calculada mediante a equação B.5:

$$E_a = \overline{P}_v \eta_g A_{pa} T_a \quad (\text{B.5})$$

onde  $\eta_g$  é a eficiência total do aerogerador em % e  $T_a$  é o período analisado em horas.

## B.5 Distribuição de Weibull

Estudos estatísticos de séries de velocidades do vento de vários anos mostram que a probabilidade de ocorrência das velocidades segue comportamentos típicos, que podem ser representados através de expressões analíticas. A mais empregada para este fim é a função de densidade de probabilidade de Weibull ( $f(V_v)$ ) representada pela equação B.6:

$$f(V_v) = \frac{k_f}{c_f} \left(\frac{V_v}{c_f}\right)^{k_f-1} \exp\left[-\left(\frac{V_v}{c_f}\right)^{k_f}\right] \quad (\text{B.6})$$

onde  $k_f$  é um fator de forma, adimensional, e está relacionado com as características locais do vento e dá uma medida da dispersão dos valores de velocidades em relação à velocidade média do período.

Os fatores  $k_f$  e  $c_f$  são obtidos a partir da análise dos dados de velocidades do vento, que preferencialmente devem representar o valor médio de  $10min$  de amostragem. Entre os métodos empregados para a determinação dos fatores encontram-se o do desvio padrão da velocidade média e o da regressão linear e dos mínimos quadrados. Para o primeiro método mencionado são suficientes os valores da velocidade média e seu desvio padrão, os quais são difíceis de achar para algumas localidades, devido a medições metereológicas. Já o segundo método precisa de toda a série de velocidades do vento, a qual vai se tornando cada vez mais comum devido ao uso de modernos sistemas automatizados de monitoramento.

Depois de conhecidos, os fatores poderão contribuir a determinar o valor dos parâmetros estatísticos e o potencial energético do local:

$$\overline{V}_v = \int_0^{\infty} V_v f(V_v) dV_v = c_f \Gamma\left(1 + \frac{1}{k_f}\right) \quad (\text{B.7})$$

$$\sigma^2 = c_f^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k_f}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k_f}\right) \right] \quad (\text{B.8})$$



$$k_e = \frac{\Gamma(1 + \frac{3}{k_f})}{\Gamma^3(1 + \frac{1}{k_f})} \quad (\text{B.9})$$

onde  $\Gamma$  representa a função Gamma, cujos valores aparecem tabelados para vários valores do seu argumento.

A Figura B.4 mostra a forma em que é realizada a análise. Primeiramente as amostras de velocidades do vento da série são agrupadas em intervalos regulares, de 1  $m/s$  por exemplo, e permitem a determinação de  $k_f$  e  $c_f$ . Conhecidos os valores destes parâmetros é possível reproduzir em qualquer momento a distribuição de probabilidade de ocorrências, através da função de Weibull.

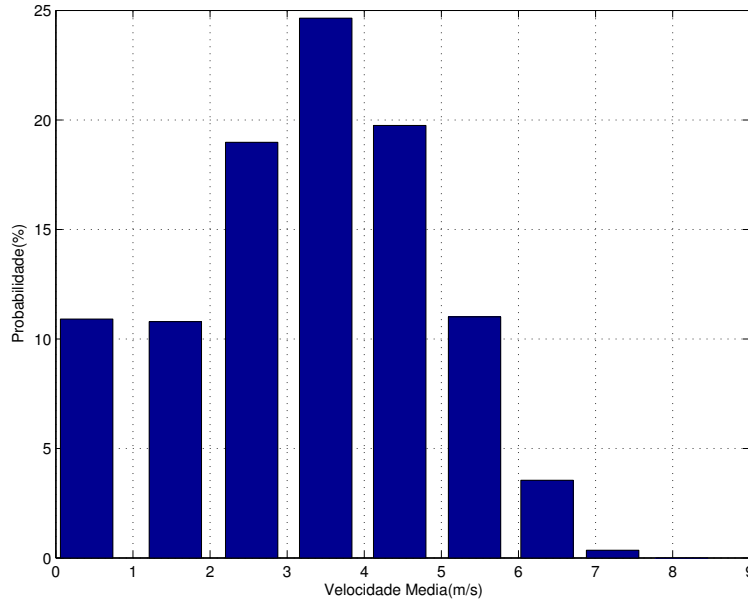


Figura B.4: Distribuição de probabilidade de ocorrência de velocidades: real e estimada.

A partir da representação da Figura B.4, informações importantes podem ser obtidas, como a probabilidade e, portanto, o período de manifestação de uma velocidade do vento na localidade, ou o período em que ocorrem velocidades do vento superiores, ou inferiores, a um determinado valor.

O emprego da equação B.10, para cada intervalo de velocidades do vento, permitirá estimar a quantidade de energia possível de se obter em cada um deles e, portanto, a energia que poderá ser fornecida por cada  $m^2$  da área da turbina do aerogerador na localidade:

$$EAG_A = 4380\rho_{ar} \sum_{V_{vo}}^{V_{vs}} \eta_{gi} V_{vi}^3 f(V_{vi}) \quad (\text{B.10})$$

onde  $EAG_A$  refere-se à energia anual gerada por unidade de área do rotor do aerogerador,  $\eta_{gi}$  é a eficiência do aerogerador para a velocidade considerada  $V_{vi}$  e  $f(V_{vi})$  é a probabilidade

de ocorrência da velocidade  $V_{vi}$  no período.  $V_{vo}$  e  $V_{vs}$  englobam a faixa de velocidades do vento de funcionamento da máquina, desde o início da geração ( $V_{vo}$ ) até a sua parada por motivos de segurança ( $V_{vs}$ ).

## B.6 Regulação de Potência

Além da forma de conexão da turbina eólica, outro fator importante é a forma de regulação de potência, dividida em descolamento do vento ou estol e por variação do ângulo de passo das pás (CBEE - UFPE, 2003). Máquinas com dispositivos de variação de ângulo de pá permite um controle mais preciso da potência entregue ao gerador, sobretudo na proximidade da potência nominal, enquanto máquinas com o uso de descolamento do vento exige uma mecânica mais robusta, pois a limitação da captação da energia do vento é efetuada de forma passiva por processos aerodinâmicos. Ambos podem transmitir ao gerador picos instantâneos de potência vindos das rajadas momentâneas, pois a previsão de rajadas em tempo real, não se revela eficaz no controle de potência destas máquinas. A opção por uma forma de regulação de potência, em princípio, não tem relação com o tipo de gerador e sim com a tecnologia e relação custo/benefício praticada pelo fabricante (CBEE - UFPE, 2003).

## B.7 Sistema de Controle

As turbinas eólicas, têm um sistema de controle principal que monitora, otimiza e protege a turbina de operações indevidas. O sistema de controle monitora as principais grandezas mecânicas da máquina, bem como as elétricas. Nele estão instalados as proteções individuais para cada turbina como, por exemplo, pára-raios, protetores contra sobre corrente e curto-circuito, protetores contra sub e sobre tensão e contra sub e sobre frequência.

No Sistema de Controle também são instalados capacitores para compensação de energia reativa de vazio ou o sistema de conversão de potência, quando existe. Seja qual for o tipo de turbina, estas dispõem necessariamente de um sistema de controle para a sua correta e estável operação.

# Apêndice C

## Banco de Baterias

Banco de baterias é um conjunto de baterias agrupadas sob uma determinada configuração série-paralela, com o objetivo de poder armazenar uma grande quantidade de energia para utilização posterior. A quantidade de baterias em série determinará o nível de tensão do conjunto. Enquanto que a quantidade de baterias interligadas em paralelo determinará o valor total da corrente. A solução portanto é construir um banco de baterias que satisfaça o projeto em termos de tensão e corrente disponível.

Entretanto, é importante conhecer as limitações intrínsecas das baterias. Só assim poderá ser feita sua correta instalação e uso no sistema, prolongando sua vida útil e aumentando o grau de confiabilidade. Este tópico aborda as características das baterias de chumbo ácido em geral, também apresenta detalhes próprios das mesmas.

A quantidade de tipos possíveis de baterias é muito grande (Ni-Fe, Ni-Zn, Zn-Cl, etc.). Entretanto, a disponibilidade do mercado reduz a possibilidade de escolha dos tipos a serem empregados em sistemas híbridos. Assim sendo, as baterias de chumbo-ácido e níquel-cádmio tornaram-se algumas das poucas opções para os projetistas de sistemas alternativos. O preço da bateria de níquel-cádmio é de quatro à cinco vezes o preço da de chumbo-ácido. Em resumo, a maioria dos acumuladores utilizados em sistemas híbridos de energia, são baterias recarregáveis de chumbo-ácido (MACêDO, 2002).

### C.1 Tipos de Bateria e suas Aplicações

Existem diversos tipos de baterias ou acumuladores de energia, e as mais relevantes são: estacionárias, automotivas e tracionárias. Cada aplicação exige o tipo de bateria apropriada.

Baterias estacionárias, também chamadas de baterias de ciclo profundo, são especialmente adequadas para condições que requerem descargas por longos períodos, aliados a baixa manutenção, sendo aplicáveis em sistemas de energia de corrente contínua para: telecomunicações, centrais telefônicas, subestações, repetidoras de microondas, estações geradoras e distribuidoras de energia, aeroportos, hospitais, sistemas de emergência, energia solar e eólica.

Baterias de ciclo profundo são projetadas para fornecer uma pequena corrente por um longo período de tempo com uma tensão relativamente estável. Podem ser descarregadas de 50 a 60% de sua capacidade nominal (BATERIAS MOURA, 2004), e são usadas principalmente para armazenamento de energia solar, alimentação de veículos industriais elétricos e aplicações chamadas "estacionárias" (iluminação de emergência, *no-breaks*, centrais telefônicas, etc.)

As baterias automotivas são projetadas para fornecer uma grande corrente em um pequeno intervalo de tempo (tipo 200 à 400 A em 5 à 15 *seg.*), em compensação não podem ser descarregadas mais que 10% de sua capacidade nominal (BATERIAS MOURA, 2004). Este tipo de uso é exigido pelos automóveis e veículos pesados, durante a partida do motor à combustão.

Baterias tracionárias são construídas para fornecer uma constante e relativamente pequena corrente durante uma jornada inteira de trabalho. Elas são utilizadas para tracionarem veículos, trens, barcos, empilhadeiras, etc. e devem ser recarregadas por um período de 8 a 16 horas antes de serem novamente utilizadas.

Neste trabalho serão utilizadas baterias estacionárias devido ao tipo de aplicação, onde se terá, pequenas e médias descargas durante um tempo longo, com a consequente descarga profunda depois de um determinado tempo de uso.

## C.2 Processo de Carga-Descarga

A tensão fornecida por uma bateria recarregável é contínua (CC). Para carregá-la necessita-se de um gerador de corrente contínua que deverá ser conectado com a polaridade correta: positivo do gerador ao positivo da bateria e negativo do gerador ao negativo da bateria. Para poder forçar uma corrente de carga, a tensão deverá ser superior à da bateria.

Se o gerador for desconectado e conectada uma carga elétrica à bateria, circulará uma corrente através desta, em direção oposta à de carga. Em princípio, o "ciclo" de carga-descarga pode ser repetido indefinidamente. Na prática, existem limitações para o número máximo de "ciclos", uma vez que os eletrodos perdem parte do material com cada descarga, através de processos químicos que ocorrem nos eletrodos da bateria, durante a carga-descarga. As sucessivas descargas traduzem-se em uma diminuição progressiva da capacidade da bateria, como consequência da perda de material ativo da mesma. Naturalmente, essa perda é tanto mais intensa quanto maior for o número de ciclos e a profundidade de descarga. A diferença de funcionamento entre os diversos tipos de bateria está relacionada aos diferentes eletrólitos e eletrodos metálicos (MACêDO, 2002).

Quando um tipo de energia é convertido em outro, a eficiência nunca alcança 100%, tendo em vista que sempre existem perdas (calor). A dupla conversão energética que ocorre dentro da bateria obedece a essa lei física. portanto haverá perdas de energia durante o processo de carga e ou descarga.

Três características definem uma bateria recarregável: a quantidade de energia que ela pode armazenar, a máxima corrente que pode entregar (descarga) e a profundidade de descarga a que pode submeter-se. A quantidade de energia que pode ser acumulada por uma bateria é dada pelo número de watt-horas ( $Wh$ ) da mesma. A capacidade ( $C_B$ ) de uma bateria de submeter-se a um dado regime de descarga é dado pelo número de ampères-horas ( $Ah$ ) (MACêDO, 2002).

### C.3 Como Calcular as Baterias

A capacidade das baterias é medida em Ampère x Hora, ou seja, a corrente que pode ser fornecida durante determinado tempo até que a bateria esteja completamente descarregada. Usualmente esta medida é feita em um período de 20 horas, embora alguns fabricantes apresentem valores medidos em outros intervalos. Assim uma bateria de ciclo profundo de 100  $Ah$  fornecerá uma corrente de 5 Ampères por 20 horas até a descarga completa. Como uma bateria não deve ser completamente descarregada, elas têm uma capacidade nominal e uma capacidade efetiva (utilizável). No caso anterior, a capacidade nominal é 100  $Ah$ , a capacidade efetiva será 50  $Ah$  (50%) ou 60  $Ah$  (60%) (DELPHI FREEDOM, 2004). A energia nominal acumulada é de:

$$12V \times 100Ah = 1.200Wh (1,2kWh).$$

A profundidade de descarga (PD) representa a quantidade de energia que pode ser extraída de uma bateria. Esse valor é dado em forma percentual. Se a bateria do exemplo anterior entregar 600 $Wh$ , a profundidade de descarga será de 50% (MACêDO, 2002).

### C.4 Tensão de Saída das Baterias

A tensão de saída de uma bateria de chumbo-ácido não permanece constante durante a carga ou descarga. Duas variáveis determinam seu valor: o estado de carga e a temperatura do eletrólito. As curvas das Figuras C.1 e C.2 mostram essas variações na tensão por elemento, tanto para o processo de carga quanto para o de descarga. Os valores dados pelas curvas correspondem a uma bateria de 12V nominais. Se o banco de baterias tem um valor que é múltiplo de 12V, os valores lidos deverão ser multiplicados pelo valor do múltiplo. Para compreender o efeito que a temperatura tem no comportamento da bateria, é útil recordar que qualquer reação química é acelerada quando a temperatura aumenta e é retardada quando esta diminui (MACêDO, 2002).

Para a carga, a tensão correspondente a um dado estado e corrente de carga é sempre menor quando a temperatura diminui. É conveniente carregar uma bateria com nível de corrente que não exceda o máximo dado pelo fabricante. O tempo de carga, multiplicado pela corrente de carga deve ser uns  $\pm 15\%$  maior do que o número de  $Ah$  da bateria, para compensar as perdas durante o processo de carga.

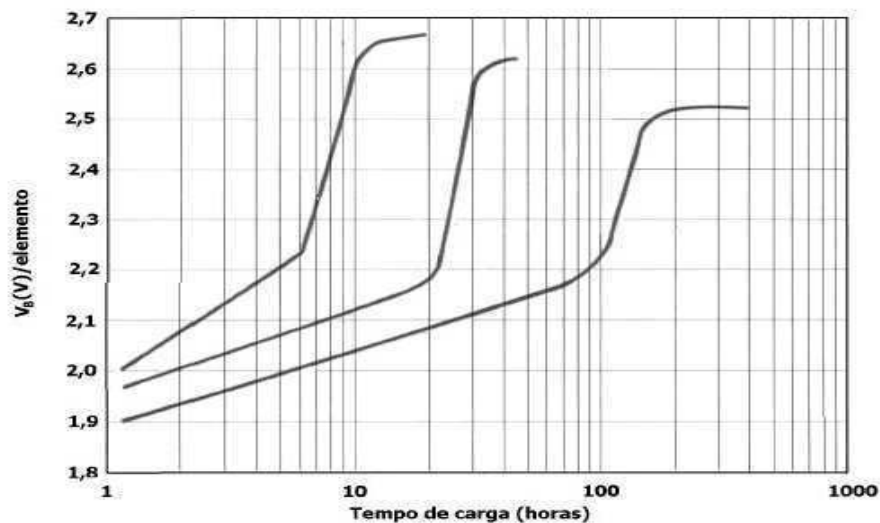


Figura C.1: Evolução da tensão durante um processo de carga a corrente constante, em função do tempo e do regime de carga, para uma temperatura de  $25^{\circ}C$ .

## C.5 Estado de Carga das Baterias

Como conhecer o estado de carga de uma bateria? Uma bateria é considerada 100% carregada quando apresentar uma tensão de  $2,25 V_{cc}$  por célula ( $13,5 V_{cc}$  para 6 elementos) e completamente descarregada quando apresentar  $1,75 V_{cc}$  por célula ( $10,5 V_{cc}$  para 6 elementos), medidas estas efetuadas sob carga nominal. Uma maneira de se confirmar o estado de carga de uma bateria é através da medição da densidade do eletrólito feita através de um densímetro. As medições de tensão devem ser feitas com voltímetro digital, com precisão melhor que 5%, com carga nominal, ou seja,  $1/20$  da capacidade nominal da bateria. Os valores de tensão são valores médios e devem ser ajustados através das informações técnicas do fabricante.

Até onde se pode descarregar a bateria de ciclo profundo? Esta informação consta do manual do fabricante. Porém, na falta desta, usar 50% de descarga é sempre um valor seguro (BATERIAS MOURA, 2004).

O gráfico da Figura C.3 ilustra bem o valor de se usar uma bateria de forma adequada, seguindo as recomendações do fabricante. Este gráfico se refere a uma bateria estacionária de  $12 V$ , capacidade nominal de  $185 Ah$  de fabricação Delphi Freedom (DELPHI FREEDOM, 2004).

Para a bateria de  $185 Ah$  fornecer toda a sua energia seria necessário que fosse retirada da mesma uma corrente de  $1,85 A$  durante 100 horas. Se for preciso retirar desta bateria uma corrente de  $17,5 A$ , durante 10 horas, a capacidade da mesma diminui para  $175 Ah$ , e assim por diante.

Será feito um arranjo do banco de baterias, série-paralelo, de modo a fornecer a tensão e a corrente necessária ao sistema, ou seja, para a tensão do barramento de corrente contínua de  $24 V_{cc}$ , as baterias farão conjuntos de duas à duas em série. Para baterias de  $194 Ah$  nominal,

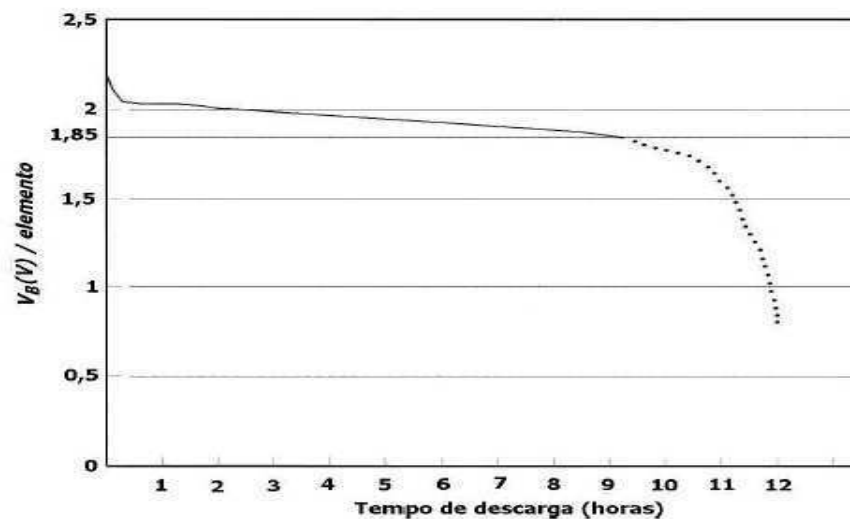


Figura C.2: Evolução da tensão durante um processo de descarga a corrente constante.

pode-se retirar das mesmas uma corrente constante de  $9,7 \text{ Ah}$ , durante 10 horas, obtendo-se 50% da profundidade de descarga. É recomendável dimensionar um banco de baterias que garanta uma autonomia ao sistema de quatro dias de funcionamento para o caso de faltar geração de energia por parte das fontes alternativas de energia.

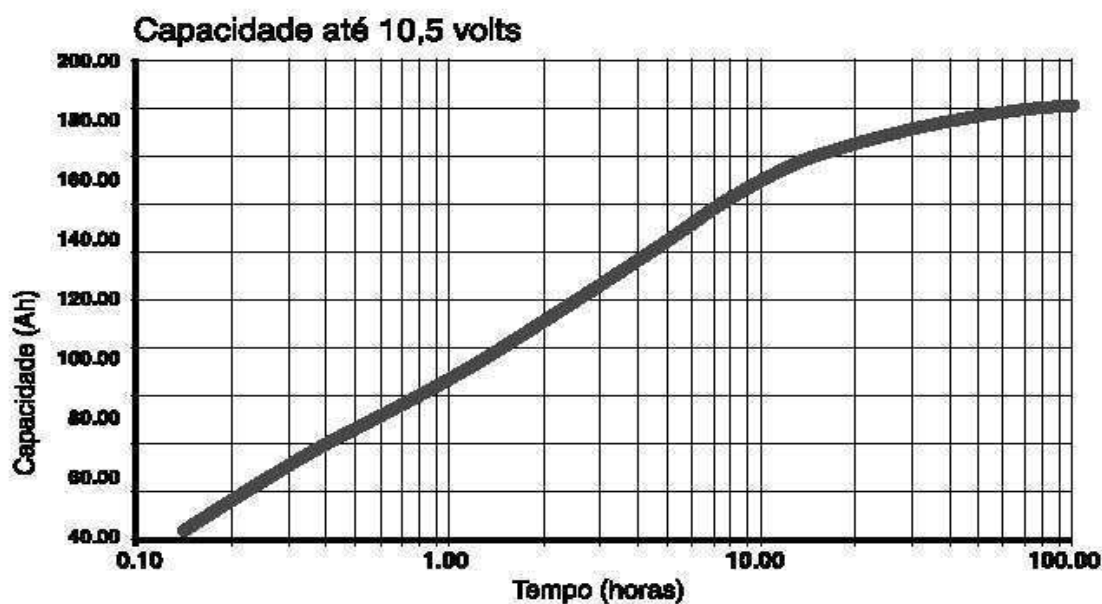


Figura C.3: Capacidade da bateria em relação ao tempo de descarga.

# Referências Bibliográficas

A1-SUM, E.; SATTER, A.; AZIZ, M. A. Automation of water treatment plants and its application in power and desalination plants. *Elsevier, Desalination*, v. 92, p. 309–321, 1993.

AKBARZADEH, T.; KUMBLE, K. Intelligence control of desalination plants: Ga-fuzzy approach. *2nd World Congress on Desalination, MontpeUier, France*, 1996.

AMJAD, Z. *Reverse Osmosis - Membrane Technology, Water Chemistry, and Industrial Applications*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993.

AVLONITIS, S. et al. Pc based scada system and additional safety measures for small desalination plants. *Elsevier, Desalination*, v. 165, p. 165–176, 2004.

BADREDDIN, E.; GAMBIER, A.; ABOUL-FOTOUH, F. Laboratory set-up for education and research on automation of reverse osmosis plants employing a sustainable energy source. *Desalination - Institute of Computer Engineering, University of Mannheim, Germany*, v. 166, p. 307–314, 2004.

BARROSO, G. C. *Uma Nova Abordagem para Síntese de Supervisores de Sistemas a Eventos Discretos*. Tese (Tese de Doutorado para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica) — UFPB, Campina Grande - PB., Agosto 1996.

BATERIAS MOURA. *A bateria estacionária*. [www.moura.com.br/baterias.pdf](http://www.moura.com.br/baterias.pdf). [S.l.], 2004.

BLASQUES, L. C. M. *Estudo da Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade*. Dissertação (Dissertação para obtenção do Título de Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFPB, Campina Grande-PB, Agosto 1999.

CASTRO, R. M. G. *Introdução à Energia Fotovoltaica*. 1. ed. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2004.

CBEE. *Panorama da Energia Eólica*. [www.eolica.com.br/index/por](http://www.eolica.com.br/index/por). [S.l.], 2004.

CBEE - UFPE. *Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas*. 1. ed. [S.l.], 2003.



- CHERKASOVA, L.; KOTOV, V.; ROKICKI, T. On net modeling of industrial size concurrent systems. *14th International Conference on Application and Theory of Petri nets, Chicago-Illinois, USA*, p. 552–561, 1993.
- DAMM, W. *Mismatch Verluste in Photovoltaik - Generatoren*. Germany: Universitat Oldenburg, 1994.
- DARWISH, M. et al. Manageable automation systems for power and desalination plants. *Elsevier, Desalination*, v. 92, p. 211–251, 1993.
- DARWISH, M.; AI-GOBAISI, D. Conceptual specifications for improved automation and total process care in large desalination plants of the future. *Elsevier, Desalination*, v. 95, p. 287–297, 1994.
- DELPHI FREEDOM. *A bateria marine*. [pss.delphi.com/sa/por/news.asp](http://pss.delphi.com/sa/por/news.asp). [S.l.], 2004.
- FILHO, A. B. de L. *Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Dessalinização via Osmose Inversa para Pequenas Comunidades Fazendo Uso de Painéis Fotovoltaicos*. Dissertação (Dissertação para obtenção do Título de Mestrado em Engenharia Química) — UFCG, Campina Grande-PB, Março 2000.
- FOUST, A. S. et al. *Princípio das Operações Unitárias*. 2a. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1982.
- HANISCH, H.-M. Coordination control modelling in batch production systems by means of petri nets. *Computers and Chemical Engineering*, 16, p. 1–10, 1992.
- HANISCH, H.-M. Analysis of place/transition nets with timed arcs and its application to batch process control. *14th International Conference on Application and Theory of Petri nets, Chicago-Illinois, USA*, p. 282–299, 1993.
- JAFAR, M. et al. Design and evaluation of intelligent control methodology for reverse osmosis plants. *ADA Biannual Conference, Williamsburg, Virginia*, 1998.
- JENSEN, K. *Coloured Petri Nets - Basic Concepts, Analysis Methods and Pratical Use*. Second. Denmark: Springer, 1997.
- KAHDIM, A. S.; ISMAIL, S.; JASSIMB, A. A. Modeling of reverse osmosis systems. *Elsevier, Desalination*, v. 158, p. 323–329, 2003.
- MACÊDO, W. N. *Estudo de Sistemas de Geração de Eletricidade Utilizando as Energias Solar Fotovoltaica e Eólica*. Dissertação (Dissertação para obtenção do Título de Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFPA, Belém-PA, Fevereiro 2002.

- MONTEITH, J. L. *Vegetation and Atmosphere - Principles*. London: Academic Press, 1975.
- MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. *Engenharia de Automação Industrial*. São Paulo - Brasil: LTC, 2001.
- MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), p. 541–580, 1989.
- OLIVEIRA, A. R. de. *Desempenho de um Sistema de Dessalinização via Osmose Inversa, em Escala Piloto, Alimentado por Painéis Fotovoltaicos*. Dissertação (Dissertação para obtenção do Título de Mestrado em Engenharia Química) — UFCG, Campina Grande-PB, Novembro 2002.
- SCIELO BRASIL. *Revista de Economia e Sociologia Rural*. www.scielo.br. [S.l.], 2003.
- SHALIMOVA, K. V. *Física de los Semiconductores*. Moscou, URSS: MIR, 1975.
- SILVA, V. P. da. *Uma Abordagem para a Síntese de Supervisores de Sistemas a Eventos Discretos a partir de Modelo Temporizado*. Dissertação (Dissertação para obtenção do Título de Mestrado em Engenharia Elétrica) — UFPA, Belém-PA, Abril 2005.
- TSIOURTIS, N. X. *Desalination and Environment*. *Desalination* 141. [S.l.: s.n.], 2001.
- ZHOU, M.; DICESARE, F. *Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems*. USA: Kluwer Academic, 1993.
- ZILOUCHIAN, A.; JAFAR, M. Automation and process control of reverse osmosis plants using soft computing methodologies. *Elsevier, Desalination*, v. 135, p. 51–59, 2001.