

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DA RESERVAÇÃO HIDRÁULICA EM
SISTEMAS DE GERAÇÃO EÓLICA ISOLADOS**

LUCAS MONTADO PASQUALI

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Alexandre Beluco
Co orientador: Paulo Kroeff de Souza

Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques	IPH/UFRGS
Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres	IPH/UFRGS
Prof. Arno Krenzinger	LES/Escola de Engenharia

Porto Alegre, abril de 2006

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Alexandre Beluco da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e co-orientado pelo Prof. Paulo Kroeff de Souza da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

*“Eram dois que se amavam tanto, e tanto queriam um filho, que durante cinco anos tentaram, até
ouvir o primeiro choro.*

Um choro de felicidade, por ser recebido por mãos tão carinhosas, tão dedicadas, tão amadas.

*Vinte anos se passaram, e outro ser surge no seio dessa família tão unida. Um ser predestinado, e
certamente em outras eras amado. Quatro então compunham a família.*

Quatro anos mais se passaram, e veio a separação, cheia de saudades, mas cheia de lembranças.

*Lembranças de carinho, de atenção, de dedicação, de incentivo, de desapego. E outra vez três
compõem a família.*

Muitos anos passarão, regados a carinho, dedicação, amor.

Separações outras virão.

*Mas os reencontros reacenderão a chama do amor, e a certeza virá, de que a eternidade nos espera,
para juntos evoluirmos.”*

Lucas Montado Pasquali

RESUMO

Estudo Sobre a Influência da Reservação Hidráulica em Sistemas de Geração Eólica Isolados

A utilização de fontes de energias renováveis vem a cada dia se destacando como forma de suprir um mundo em constante desenvolvimento tecnológico e crescimento econômico. O crescimento de uma economia é sempre acompanhado por um aumento da demanda de energia, e em tempos de aquecimento global e consciência ecológica, a busca pelo maior uso de fontes de energia renováveis passa a ocupar uma posição de destaque. O fato de mais de 8 milhões de pessoas, ou 5,2% da população, ainda esperarem pela disponibilidade de energia elétrica no Brasil, deve levar ao estudo e desenvolvimento de alternativas que preencham essa lacuna, e proporcionem uma maior qualidade de vida. Programas de incentivo criados pelo governo, como LUZ PARA TODOS, e o PRODEEM, e o potencial apontado pela energia dos ventos no Brasil, motivaram um estudo sobre como a reservação de energia hidráulica poderia afetar o uso da energia eólica em sistemas isolados.

Este trabalho teve por objetivo estudar a influência das diversas variáveis presentes em um sistema de reservação de energia hidráulica, visando explorar o uso da energia eólica, e garantir o atendimento da crescente demanda energética. Através de simulações numéricas, utilizando o programa Visual Basic, variáveis como cotas entre reservatórios, proporção entre demanda e potências instaladas, e diferentes capacidades de reservatórios foram exploradas, e através do uso de reservatórios hidráulicos, foi possível elevar o atendimento de demandas em sistemas isolados de menos de 50% em sistemas convencionais, para 99,6% em sistemas com reservação hidráulica, e obter custos de energia próximos dos US\$90/MWh. Estes dados situam o sistema de geração de energia eólica com reservação hidráulica em sistemas isolados dentro da faixa de atendimento e custos praticados atualmente, e abrem caminho para futuros estudos, avaliando diferentes regimes de ventos, ou aplicando a tecnologia de reservação hidráulica a outras fontes de energia renováveis, como a energia proveniente das ondas, por exemplo.

ABSTRACT

A Study About the Influence of Pumped Storage on Isolated Wind Power Generation Systems

The use of renewable energy sources to supply a world in constant technological and economical development is a growing trend. A growing economy is always followed by an increased demand, and in a time of global warming and ecological awareness, the seeking for major renewable energy use takes a prominent position. In a continental country such as Brazil, the fact that 8 million people, or about 5.2% of population, are still waiting for electric energy, leads to the study and development of alternatives to fill this gap and to provide a better life quality. Incentive programs, by the Brazilian government, as LUZ PARA TODOS, and PRODEEM, and the great potential seen in the wind energy in Brazil, motivated a study about how pumped storage may affect the wind generation for isolated systems.

The main goal of this work is to understand the influence of the several variables present on a pumped storage system, as a way to better use the wind energy, and to ensure the supply of the growing energy demand. Variables as vertical heads, demand to installed power ratio, and different reservoir capacities are studied, and by the use of hydraulic reservoirs, the feasibility of increasing the wind energy supply, from the 50% in conventional systems up to 99.6% on a pumped storage scheme, while obtaining energy costs around US\$90/MWh, is demonstrated. These results place the pumped storage wind power within the expected supply reliability and energy cost levels actually practiced, and suggest future studies, evaluating different wind regimes, or applying the pumped storage technology to other renewable energy sources, such as ocean waves for example.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto do esforço coordenado de muitas pessoas, nas quais pude confiar durante o curso de minha vida.

Dedico esta dissertação aos meus pais, cujos esforços foram fundamentais para qualquer meta por mim alcançada, ou por vir.

À minha querida mãe, Maria do Carmo (*in memoriam*), que durante 50 anos, tantas alegrias trouxe àqueles a seu redor, com seu sorriso encantador, compreensão, paciência, empatia e felicidade.

Ao meu pai, Noeli, eterno exemplo de comportamento, dedicação à família, comprometimento e carinho, e de quem aprendi como proceder nos momentos em que outros precisam de minha ajuda.

À minha eterna amada, Joice, cujo amor e suporte foram fundamentais no decorrer deste trabalho, e que, no momento em que entrou em minha vida, alterou definitivamente seu rumo, alinhando-o um pouco mais ao longo caminho da evolução.

Àquele que dedicou seu tempo para me guiar durante os passos do mestrado, e que mais que um orientador, se tornou um irmão, Alexandre Beluco, o meu obrigado pela dedicação e pela amizade.

Ao grande Professor Paulo Kroeff de Souza, pessoa de incrível conhecimento e experiência, sempre acessível e atencioso, e cujas idéias foram de grande contribuição para este trabalho.

E por fim, agradeço à CAPES pelo suporte financeiro, desde a graduação, até a conclusão deste trabalho, e à UFRGS, cujas instalações foram minha segunda casa durante estes oito anos de graduação e mestrado, e que proporcionou vivências marcantes com colegas e professores.

SUMÁRIO

<i>Resumo</i>	<i>iv</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Agradecimentos</i>	<i>vi</i>
<i>Lista de Tabelas</i>	<i>ix</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>x</i>
<i>Lista de Símbolos</i>	<i>xi</i>
<i>Introdução</i>	<i>1</i>
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Justificativa	3
1.3 Objetivos	4
<i>Energias Renováveis e o Armazenamento de Energia</i>	<i>5</i>
2.1 Considerações Iniciais	5
2.2 Programas de Incentivo	6
2.2.1 PROINFA	6
2.2.2 LUZ PARA TODOS	7
2.2.3 PRODEEM	8
2.2.4 Reserva de Recursos Fósseis	9
2.3 Energia eólica	10
2.3.1 Considerações Iniciais	10
2.3.2 Perspectivas	10
2.4 Sistemas Híbridos	12
2.5 Armazenamento de Energia	13
2.5.1 Armazenamento de Ar Comprimido	13
2.5.2 Baterias	15
2.5.3 Volantes	16
2.5.4 Supercondutores	17
2.5.5 Supercapacitores	18
2.5.6 Usinas Reversíveis	19
2.6 Foco nas usinas reversíveis	21
<i>Sistema proposto</i>	<i>24</i>
3.1 Considerações Iniciais	24
3.2 O sistema	25

3.3	Avaliação do Sistema	26
	<i>Simulação Numérica</i>	28
4.1	Considerações Iniciais	28
4.2	Simulação com Reservação Hidráulica	30
4.2.1	Detalhamento da Simulação com Reservação Hidráulica	31
4.2.2	Estrutura da Simulação com Reservação Hidráulica	34
4.2.3	Considerações	37
4.2.4	Faixa de Potências Adotada	39
4.3	Simulação Sem Reservação Hidráulica	40
4.3.1	Detalhamento da Simulação Sem Reservação Hidráulica	40
4.3.2	Estrutura da Simulação Sem Reservação Hidráulica	42
4.3.3	Faixa de Potências Adotada	42
4.4	Validação da simulação	43
4.5	Análise dos resultados das simulações	45
4.5	Análise de custos	52
4.5.1	Custo de Instalação	52
4.5.2	Custo de Energia	53
4.5.3	Contribuições Para Uma Metodologia de Dimensionamento	54
	<i>Conclusões e Recomendações</i>	60
5.1	Conclusões	60
5.2	Recomendações	61
	<i>Referências Bibliográficas</i>	63
	<i>Outras Fontes Pesquisadas</i>	66

LISTA DE TABELAS

<i>TABELA 1.1. Empreendimentos em Operação</i>	3
<i>TABELA 1.2. Empreendimentos outorgados entre 1998 e 2005</i>	3
<i>TABELA 1.3. Domicílios por atendimento de luz elétrica (%)</i>	4
<i>TABELA 2.1. Resumo das principais características dos sistemas de reservação de energia</i>	21
<i>TABELA 3.1 – Estimativa de custo de componentes</i>	27

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1. Estação de entrega de gás natural da Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A.</i>	2
<i>Figura 2.1. Sistema de reservação de energia por ar comprimido</i>	14
<i>Figura 2.2. Volante moderno de alta rotação</i>	16
<i>Figura 2.3. Representação esquemática da usina reversível de Dinorwig, Reino Unido</i>	19
<i>Figura 2.4. Sistema híbrido eólico-hidrelétrico</i>	23
<i>Figura 4.1. Escolha de tipo de turbina, de acordo com a queda líquida e a vazão</i>	29
<i>Figura 4.2. Funções densidade de probabilidade ($p(v)$) e distribuição cumulativa ($P(v)$) para a série de ventos adotada</i>	32
<i>Figura 4.3. Influência do fator de forma k na distribuição estatística de Weibull, para $C=7,89$</i>	32
<i>Figura 4.4. Comportamento da potência eólica adimensional ao longo de um ano</i>	33
<i>Figura 4.5. Comportamento da demanda adimensional ao longo de um ano</i>	33
<i>Figura 4.6. Simulação eólica com reservação: entrada de dados</i>	34
<i>Figura 4.7. Situação 2, quando o vento não é adequado (continuação da figura 4.6)</i>	36
<i>Figura 4.8. Situação 3, quando o vento não é suficiente (continuação da figura 4.6)</i>	37
<i>Figura 4.9. Potência eólica adimensionalizada</i>	39
<i>Figura 4.10. Simulação eólica sem reservação: entrada de dados</i>	41
<i>Figura 4.11. Série de potências eólicas para aferição da simulação.</i>	44
<i>Figura 4.12. Série de demandas para aferição da simulação.</i>	44
<i>Figura 4.13. Aferição da simulação, confirmando o comportamento para as séries de dados utilizadas..</i>	45
<i>Figura 4.14. Atendimento da Demanda (%)</i>	48
<i>Figura 4.15. Atendimento da demanda generalizado (%)</i>	49
<i>Figura 4.16. Volume total utilizado</i>	50
<i>Figura 4.17. Volume total utilizado (escala logarítmica)</i>	51
<i>Figura 4.18. Custo de Instalação</i>	56
<i>Figura 4.19. Custo de Instalação - Envoltória</i>	57
<i>Figura 4.20. Custo de Energia</i>	58
<i>Figura 4.21. Custo de Energia - Envoltória</i>	59

LISTA DE SÍMBOLOS

h_{BI}	_____	altura da barragem inferior (m)
h_{BS}	_____	altura da barragem superior (m)
i	_____	instante no tempo (h)
k	_____	fator de forma da distribuição de Weibull
n_H	_____	número de bombas ou turbinas
p	_____	fator de multiplicação que relaciona a demanda média com a potência eólica instalada
$p(v)$	_____	função densidade de probabilidade
q_B	_____	vazão bombeada unitária (m^3/s)
q_M	_____	vazão máxima unitária (m^3/s)
q_T	_____	vazão turbinada unitária (m^3/s)
v	_____	velocidade do vento (m/s)
A_D	_____	área desapropriada (ha)
C	_____	índice da distribuição de Weibull (m/s)
CUT	_____	custo unitário do terreno (US\$/ha)
DEM	_____	demanda instantânea (kW)
DEM_A	_____	demanda adimensional
L_{BI}	_____	comprimento da barragem inferior (m)
L_{BS}	_____	comprimento da barragem superior (m)
L_C	_____	comprimento do conduto forçado (km)
L_T	_____	comprimento da linha de transmissão (km)
$P(v)$	_____	função distribuição cumulativa
P_E	_____	potência eólica instantânea (kW)
PEI	_____	potência eólica instalada (kW)
P_{EOLA}	_____	potência eólica adimensional
P_H	_____	potência hidrelétrica (kW)
$P_{MaxTurb}$	_____	potência máxima turbinada (kW)
$P_{MinTurb}$	_____	potência mínima turbinada (kW)
Q_M	_____	vazão máxima total (m^3/s)
V_{BOMB}	_____	volume bombeado (m^3)
V_{TURB}	_____	volume turbinado (m^3)

V_{INCC} _____ Variação do Índice Nacional de Custo da Construção

V_{SUP} _____ volume do reservatório superior (m³)

ΔH _____ queda entre reservatórios (m)

γ _____ peso específico da água (kN/m³)

η _____ rendimento do sistema hidráulico

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o tema de estudo desenvolvido neste trabalho e são discutidas as razões que motivaram essa escolha. São apresentados ainda os objetivos e é detalhada a estrutura da dissertação.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estado de evolução tecnológica alcançado pelo homem não seria imaginável sem a descoberta e o desenvolvimento de fontes de energia abundantes e confiáveis. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o mercado de energia elétrica experimenta um crescimento da ordem de 4,5% ao ano, devendo ultrapassar a casa dos 100 mil MW em 2008. No entanto, cada dia é mais preocupante a escassez de recursos derivados do petróleo, amplamente utilizados, assim como a pressão pela abolição de usinas nucleares em alguns países, e é necessário planejar a utilização racional de fontes energéticas renováveis.

É prevista a necessidade de investimentos da ordem de R\$ 6 a 7 bilhões ao ano para suprir a crescente demanda, de acordo com a ANEEL, e este cenário é favorável ao desenvolvimento e adoção de práticas energéticas diferenciadas daquelas até hoje praticadas. A construção do gasoduto Brasil-Bolívia, por exemplo, e a criação do Programa Prioritário de Termelétricidade criado pelo Ministério das Minas e Energia viabilizaram a construção de

usinas termelétricas, sendo esperada a construção de 56 unidades, segundo dados da Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A. (TBG, 2005).



Figura 1.1. Estação de entrega de gás natural da Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A.
(Fonte: www.tbg.com.br, Acesso em: 29 mar 2005)

A atual capacidade de geração eólica brasileira é de 28,6MW, com turbinas eólicas de médio e grande porte conectadas à rede elétrica, correspondendo a 0,03% da capacidade total instalada no Brasil. Dados do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro apontam que o País tem capacidade para instalar 143.000 MW (AMARANTE *et al.*, 2001). Outras fontes de energia como a solar e de ondas, podem vir a ocupar seu espaço com o passar dos anos.

O Brasil possui um total de 1528 empreendimentos em operação, gerando 94.194.710kW de potência. Está prevista para os próximos anos uma adição de 22.924.508kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 72 empreendimentos atualmente em construção e mais 505 atualmente outorgados. Estes dados podem ser visualizados nas tabelas 1.1 e 1.2.

TABELA 1.1. Empreendimentos em Operação

Tipo	Quantidade	Potência (kW)	% (kW)
EOL	10	28.550	0,03
PCH	264	1.361.363	1,45
SOL	1	20	0
UHE	343	70.487.124	74,83
UTE	908	20.310.653	21,56
UTN	2	2.007.000	2,13
Total	1406	94.194.710	100

Legenda: EOL - Central Geradora Elioelétrica; PCH – Pequena Central Hidrelétrica; SOL - Central Geradora Solar Fotovoltáica; UHE – Usina Hidrelétrica de Energia; UTE - Usina Termelétrica de Energia; UTN - Usina Termonuclear

(Fonte: www.aneel.gov.br, 2006)

TABELA 1.2. Empreendimentos outorgados entre 1998 e 2005

(não iniciaram sua construção)

Tipo	Quantidade	Potência (kW)	% (kW)
EOL	110	4.694.943	20,47
PCH	218	3.416.852	14,90
UHE	82	5.149.551	22,46
UTE	95	9.666.162	42,17
Total	505	22.924.508	100

Legenda: EOL - Central Geradora Elioelétrica; PCH – Pequena Central Hidrelétrica; SOL - Central Geradora Solar Fotovoltáica; UHE – Usina Hidrelétrica de Energia; UTE - Usina Termelétrica de Energia; UTN - Usina Termonuclear

(Fonte: www.aneel.gov.br, 2006)

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar deste cenário de crescimento esperado, o Brasil ainda conta com 5,2% dos domicílios sem energia elétrica sem considerar a população rural de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Pará e Amapá, sendo que na região nordeste 14,2% dos domicílios não possuem luz elétrica, conforme a tabela 1.3. Essa realidade leva à consideração de outras práticas energéticas, como o uso de energias renováveis de soluções alternativas. Esse desenvolvimento não diz respeito apenas à condição de vida, mas também ao desenvolvimento econômico das regiões, pois a chegada da luz elétrica implica também na compra de equipamentos elétricos como eletrodomésticos e outros utensílios, gerando

desenvolvimento social e econômico.

TABELA 1.3. Domicílios por atendimento de luz elétrica (%)

Brasil e Regiões	Luz Elétrica (%)
Brasil	94,8
Norte	97,8
Nordeste	85,8
Sudeste	98,6
Sul	98,0
Centro-Oeste	95,0

(Fonte: www.ibge.gov.br, 2000)

Este trabalho se insere nesse panorama, buscando alternativas técnica e economicamente viáveis para a ampliação do fornecimento de energia elétrica.

1.3 OBJETIVOS

Este estudo visa obter uma visão geral sobre o comportamento de aproveitamentos eólicos com armazenamento hidráulico, visando um melhor entendimento sobre o funcionamento desses aproveitamentos e da influência do armazenamento e fornecendo subsídios para a elaboração de uma metodologia de dimensionamento.

Mais especificamente, os objetivos são: [1] efetuar simulações numéricas dos sistemas propostos, com base nas especificações técnicas de fabricantes e em séries temporais de velocidades de ventos e de vazões, visando obter subsídios para elaboração de critérios de dimensionamento; [2] pesquisar custos de equipamentos de mercado, como turbinas eólicas, bombas, tubulações e barragem, com fabricantes e na literatura especializada, visando complementar os subsídios obtidos no objetivo [1]; e [3] fornecer um conjunto de curvas de custo de instalação, custo de energia e atendimento de demanda, que possam auxiliar em estudos iniciais de sistemas de geração eólicos com armazenamento hidráulico.

Capítulo 2

ENERGIAS RENOVÁVEIS E O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diversas áreas remotas utilizam fontes de energias não renováveis, como usinas termelétricas ou geradores a óleo diesel. Contudo, muitos desses locais estão localizados próximos o suficiente de fontes de energias renováveis, como a hidráulica, solar, eólica e de biomassa. O uso dessas fontes diminui a necessidade de combustíveis fósseis, criando oportunidades de trabalho e melhorando as condições ambientais (Maskey, 2000). Por outro lado, fontes de energia com o perfil dos combustíveis fósseis viabilizam a geração em pequena escala a partir de energias renováveis.

A distribuição temporal do fluxo de energia de praticamente todas fontes renováveis ocorre de maneira intermitente e com variações de intensidade, gerando problemas quanto à sincronia entre a oferta e a demanda de energia, com exceção apenas da energia de biomassa. Isto ocorre em escalas que variam de meses (variações climáticas), dias (intensidade de precipitação) a horas ou segundos (disponibilidade eólica). Dentre as fontes energéticas existentes e em uso no Brasil, a energia hidráulica é a fonte renovável que permite um melhor manejo dos recursos através do acúmulo de água em reservatórios, para uso posterior.

Uma condição econômica para a viabilidade de uma fonte de energia, é o fator de carga do sistema em estudo. O fator de carga é a relação entre a demanda média utilizada por

um consumidor, ou grupo de consumidores, num determinado período de tempo e a demanda máxima ocorrida neste mesmo período. Em sistemas isolados, com grandes variações de carga em horários de pico, os equipamentos devem ser capazes de suprir a demanda nos horários de pico, mas ficam de certa forma sub utilizados em outros períodos. Isso diminui o fator de carga, e implica num crescimento dos custos de implantação e manutenção, acarretando aumentos de tarifa (Ocácia, 2002).

Fatores de carga entre 25 e 20%, elevam o custo do kW médio utilizado, para micro centrais hidrelétricas, em relação ao custo do kW instalado, de 4 a 5 vezes, tornando o custo de geração entre 2 e 2,5 vezes maior do que o custo de geração das unidades interligadas. O fator de carga que torna viável a implantação de uma unidade geradora depende do valor do investimento e do custo admitido para o kWh, além das condições de financiamento (Ocácia, 2002).

2.2 PROGRAMAS DE INCENTIVO

Nos últimos anos, em vista da crescente demanda de energia, e da necessidade de se disponibilizar energia elétrica a todos, sejam quais forem as condições de moradia e acessibilidade, o Ministério de Minas e Energia do Brasil criou três importantes programas de eletrificação, sendo eles PROINFA, LUZ PARA TODOS e PRODEEM. (MME, 2005)

2.2.1 PROINFA

O PROINFA, instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 e revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, tem como objetivo a diversificação da matriz

energética brasileira e a busca por soluções de cunho regional com a utilização de fontes renováveis de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis, a partir do aumento da participação da energia elétrica produzida com base naquelas fontes, no Sistema Elétrico Interligado Nacional - SIN.

O Programa prevê a implantação de 3.300 MW de capacidade, em instalações de produção com início de funcionamento previsto para até 30 de dezembro de 2006, sendo assegurada pela ELETROBRÁS a compra da energia a ser produzida, no período de 20 anos.

Os benefícios esperados com o PROINFA englobam a geração de 150 mil postos de trabalho diretos e indiretos durante a construção e a operação, sem considerar os de efeito-renda, investimentos de R\$ 4 bilhões na indústria nacional de equipamentos e materiais, complementaridade energética sazonal entre os regimes hidrológico/eólico (NE) e hidrológico/biomassa (SE e S). Proporcionalmente, a cada 100 MW médios produzidos por parques eólicos, economizam-se 40m³/s de água no rio São Francisco.

A emissão evitada de 2,5 milhões de tCO₂/ano criará um ambiente potencial de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Kyoto, e serão gerados investimentos privados da ordem de R\$ 8,6 bilhões (MME, 2005).

2.2.2 LUZ PARA TODOS

O programa LUZ PARA TODOS, tem o objetivo de levar energia elétrica para mais de 12 milhões de pessoas até 2008. O programa é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia com participação da Eletrobrás e de suas empresas controladas. A instalação da energia elétrica até os domicílios será gratuita para as famílias de baixa renda e, para os consumidores residenciais, com consumo mensal inferior a 80kWh/mês, as tarifas serão reduzidas. O programa está orçado em R\$ 7 bilhões e será feito em parceria com as

distribuidoras de energia e os governos estaduais.

O mapa da exclusão elétrica no país revela que as famílias sem acesso à energia estão em sua maioria nas localidades de menor Índice de Desenvolvimento Humano e nas famílias de baixa renda. Cerca de 90% destas famílias têm renda inferior a três salários-mínimos e 80% estão no meio rural. (MME, 2005)

Por isso, o objetivo do governo é utilizar a energia como vetor de desenvolvimento social e econômico destas comunidades, contribuindo para a redução da pobreza e aumento da renda familiar. A chegada da energia elétrica facilitará a integração dos programas sociais do governo federal, além do acesso a serviços de saúde, educação, abastecimento de água e saneamento.

O Programa contempla o atendimento das demandas no meio rural através de três alternativas: extensão de Rede, sistemas de geração descentralizada com redes isoladas e sistemas de geração individuais, sendo as duas últimas de importante interesse neste estudo.

2.2.3 PRODEEM

O Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM) é um programa do Governo Federal que foi instituído em dezembro de 1994 e é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia.

O PRODEEM tem por objetivo atender às localidades isoladas, não supridas de energia elétrica pela rede convencional, obtendo essa energia de fontes renováveis locais, de modo a promover o desenvolvimento auto-sustentável, social e econômico, dessas localidades. No entanto, esse projeto se encontra desativado atualmente.

2.2.4 Reserva de Recursos Fósseis

Pode-se dizer que estes três programas de desenvolvimento complementam-se, e abrem possibilidades de estudos quanto a alternativas energéticas.

Em 2004, o Grupo Térmico Operacional da Região Norte consumiu 483.074m³ de óleo diesel para atender a uma área de 45% do território e a cerca de 3% da população nacional, ou seja, a aproximadamente 1,2 milhão de consumidores, em sistemas isolados, de acordo com dados da ELETROBRÁS. A adoção de energias renováveis poderia reduzir drasticamente estes números, reservando os combustíveis fósseis a sistemas de reserva.

Semelhante perspectiva é vista no estudo de KALDELLIS, 2004, que descreve um sistema de geração de energia em ilhas isoladas, com a utilização de combustíveis fósseis como sistema de apoio a energias renováveis. Esta prática resulta em menores custos em combustíveis não renováveis e na diminuição da emissão de poluentes.

2.3 ENERGIA EÓLICA

2.3.1 Considerações Iniciais

Dentre as fontes renováveis presentes no programa PROINFA, está a energia eólica. A energia cinética do vento é uma fonte promissora de energia em grande parte do globo terrestre. As regiões que geralmente apresentam maior disponibilidade de energia eólica são as costeiras, áreas abertas, como descampados e áreas próximas a grandes corpos d'água (lagos, lagoas). Algumas regiões montanhosas também podem oferecer um bom potencial eólico (Rangi *et al.*, 1992 *apud* RETSCREEN).

Apenas durante o ano de 2001, foram instalados aproximadamente 5500MW em energia eólica em todo o mundo, alcançando neste mesmo ano a marca de 24000MW de capacidade eólica (Wind Power Monthly, 2001 *apud* RETSCREEN).

2.3.2 Perspectivas

Apesar desse crescimento mundial no uso da energia eólica, o número de projetos no Brasil ainda é pequeno para ser possível uma idéia da distribuição dos custos de cada etapa envolvida. DUTRA, 2003, adotou uma metodologia que considera o custo total de um empreendimento eólico como sendo uma porcentagem a mais sobre o custo das turbinas eólicas, considerando ainda três cenários, de projetos de baixo, médio e alto custo, correspondendo a 15%, 30% e 40% a mais sobre o custo das turbinas, respectivamente. Uma análise de sensibilidade também foi realizada, para verificar a variação da taxa interna de retorno, variando alguns componentes econômicos, para investimentos com recursos próprios e com recursos externos, com diferentes taxas de juros e diferentes variações na taxa de

câmbio. Esse trabalho é de grande valia para a análise econômica pretendida no presente estudo.

Durante os últimos 10 anos, a potência individual das turbinas eólicas cresceu de aproximadamente 100kW para 1MW ou mais, com alguns projetos sendo executados em alto mar. O resultado deste progresso, a nível mundial, é um custo de energia eólica compatível com as fontes usuais de energia, como a nuclear e térmica.

Projetos de energia eólica dependem de localidades com bom regime de ventos, pois a potência eólica é proporcional ao cubo da velocidade do vento. No entanto, a performance das turbinas eólicas na prática, resulta numa relação menor entre o vento e a potência gerada, podendo essa relação chegar ao quadrado da velocidade do vento. Essa diferença se deve às perdas por atrito, aerodinâmica, conversões mecânicas e elétricas e eficiência da turbina eólica. Isto significa que a energia produzida por uma turbina eólica aumenta aproximadamente 20% para um aumento de 10% da velocidade do vento.

Os sistemas eólicos atuais, com maiores potências, operam automaticamente, em conjunto com um anemômetro, que mede constantemente a velocidade do vento. Quando o mesmo é suficiente para vencer o atrito do sistema mecânico das turbinas, os controles automáticos permitem que as turbinas girem, iniciando a produção de uma pequena quantidade de energia. Essa velocidade mínima é de aproximadamente 2m/s. A energia produzida aumenta rapidamente com o aumento da velocidade do vento. Quando a produção de energia atinge o valor para o qual a turbina foi projetada, os controles automáticos regulam a potência gerada, sendo a velocidade usual de projeto de 15m/s. Acima desta velocidade, a energia produzida não ultrapassa o valor de projeto, sendo mantida constante através de freios e controles aerodinâmicos das turbinas. Eventualmente, as velocidades podem atingir valores maiores do que 25m/s, que poderiam danificar as turbinas e seus componentes. Nestes casos, a turbina é paralisada para evitar maiores danos.

2.4 SISTEMAS HÍBRIDOS

O crescimento da competitividade no ramo da energia eólica, a produção em massa e o continuado desenvolvimento de pesquisas têm diminuído os custos de implantação e produção de energia. O fator de capacidade¹ de usinas eólicas aumentou de 15% para praticamente 30%, para locais com bom regime de ventos, no entanto, para pequenos aproveitamentos em localidades isoladas, este fator de capacidade ainda pode ser proibitivo, devido ao alto custo de implantação, em relação à potência média utilizada (RETSCREEN, 2004).

Uma integração de micro usinas hidrelétricas com outras fontes renováveis faz o sistema híbrido mais eficiente e barato, por eliminar alguns dos problemas inerentes às energias renováveis individualmente. Contudo, a mistura ótima dessas tecnologias é um problema complexo do processo de tomada de decisões. A literatura especializada tem revelado uma lacuna na pesquisa em sistemas híbridos hidrelétricos com outras energias renováveis (Maskey, 2000).

Vários projetos têm sido propostos, particularmente nos EUA, para adicionar a energia eólica a usinas hidrelétricas já existentes, assim como sistemas híbridos de pequeno porte, na Europa e na Ásia. Em locais isolados, sem condições de interligação, e com características topográficas favoráveis, aconselha-se uma análise de viabilidade técnica e econômica da instalação de um sistema híbrido eólico-hidrelétrico (Bueno, 2004). Essa prática tem por finalidade oferecer uma maior confiança ao sistema proposto, aumentar o fator de capacidade da instalação e conseqüentemente diminuir seu custo inicial e os custos com manutenção da fonte renovável inicialmente proposta, visto que a configuração híbrida eólico-hidrelétrica possibilita o aproveitamento de aproximadamente 80% da energia eólica (Wood, 2002).

¹ Fator de capacidade: relação entre a energia gerada em um dado período, e a energia total disponível.

2.5 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Frente a essa situação, o armazenamento pode ser uma alternativa para um melhor aproveitamento de fontes renováveis, podendo desempenhar mais de uma finalidade na rede de distribuição de energia, de forma a gerir eficientemente os recursos disponíveis. Pode-se obter economia em custos de manutenção e operação, garantir uma regulação eficiente da frequência ou ajudar a rede de distribuição a melhor comportar os picos de consumo, reduzindo a pressão por novas linhas, ou sua atualização.

Vários métodos de armazenamento estão atualmente em desenvolvimento, sendo alguns deles baseados em técnicas antigas, aplicadas à tecnologia moderna, como as usinas reversíveis, que utilizam reservatórios de água para armazenar energia potencial gravitacional, e outras completamente novas, como os volantes, que se utilizam da energia cinética como meio de armazenagem.

Existem seis tecnologias diferentes de armazenamento de energia em uso, ou em avançado estágio de desenvolvimento que merecem destaque, sendo elas o armazenamento de ar comprimido, baterias, volantes, supercondutores, supercapacitores e as usinas reversíveis.

2.5.1 Armazenamento de Ar Comprimido

Nesta tecnologia, a energia é armazenada ao comprimir ar em cavernas e instalações subterrâneas. Na medida em que cresce a necessidade de energia, essa reserva de ar é aquecida e utilizada para mover uma turbina, gerando energia. O ar comprimido pode também ser misturado ao gás natural, movendo uma turbina a combustão, sendo este uso mais

eficiente.

Podem ser utilizados como reservatórios aquíferos naturais, minas abandonadas ou cavadas em rocha, sendo estas 60% mais caras do que as escavadas em sal. Isto ocorre porque cavernas artificiais em rocha são criadas escavando formações rochosas, enquanto cavernas de sal, são feitas a partir da diluição do mesmo. Outro fator importante, é a qualidade da vedação oferecida pela rocha. Perdas de pressão podem ocorrer devido a fraturas no maciço rochoso, ou por características de porosidade. O tratamento adequado deve ser estudado caso a caso.

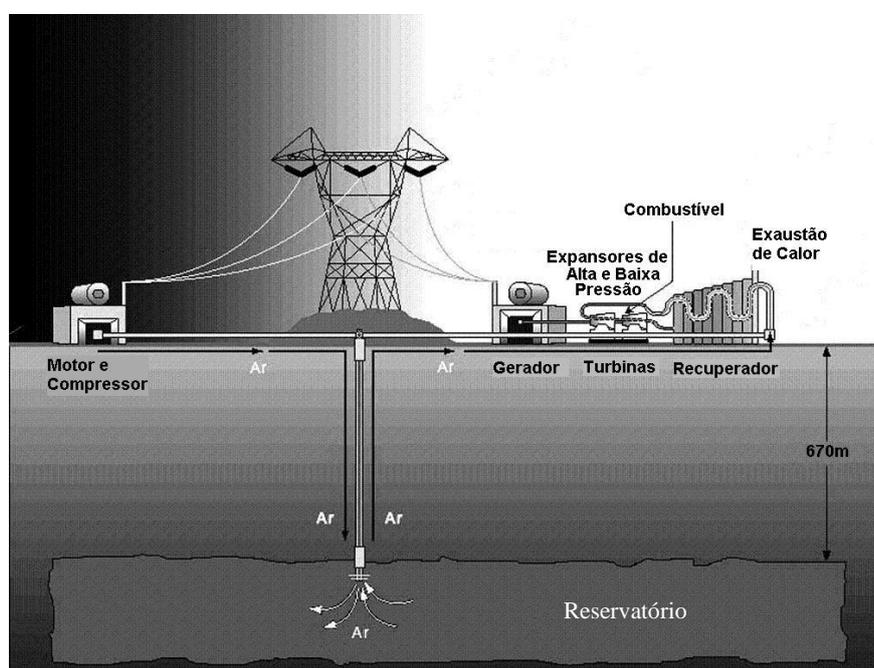


Figura 2.1. Sistema de reservação de energia por ar comprimido

(Fonte: Adaptado de www.sandia.gov, Acesso em: 29 mar 2005)

Aquíferos constituem a opção mais barata e também a mais utilizada. Reservatórios de ar comprimido constituem outra alternativa, compostos por tanques de alta pressão, no entanto essa tecnologia ainda não é viável para grandes quantidades de ar comprimido, devido ao seu elevado custo.

Sistemas de reservação por ar comprimido podem ser utilizados em grandes escalas, compressões atingindo 70atm e capacidades variando de 25 a 350MW. Seu período

de armazenamento pode ser bastante grande, podendo ultrapassar um ano. O tempo de startup, ou seja, o tempo necessário para por o sistema em funcionamento pleno, é outra vantagem do sistema de reservação por ar comprimido, sendo de aproximadamente 9 minutos para situações emergenciais, e de 12 minutos para operações de rotina. A grande desvantagem deste método, é a escassez de formações geológicas compatíveis com as necessidades do sistema, e o custo da construção de reservatórios artificiais.

O custo de instalação para sistemas de reservação por ar comprimido varia entre \$350 e \$500/kW instalado (1US\$ = R\$1,10). (NREL, 2005)

2.5.2 Baterias

Nos últimos anos, grande parte dos esforços no desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia foi despendido em baterias. Há uma grande variedade de baterias comercialmente disponíveis, e muitas outras em fase de desenvolvimento. Em uma bateria química, a carga elétrica causa reações eletroquímicas que armazenam energia de um gerador. Reações químicas inversas restituem a energia elétrica, de acordo com a demanda exigida.

Sistemas de baterias são fabricados em uma ampla faixa de potências, variando de pouco menos de 100W, a sistemas com vários megawatts, sendo utilizadas principalmente em sistemas de segurança (*backup*) em instalações de uso prioritário (hospitais, bancos, etc.) e em pequenas redes de distribuição isoladas.

Sua grande desvantagem diz respeito à disposição final de resíduos de baterias sem mais utilidade, por possuírem em sua composição metais pesados e outras substâncias nocivas ao meio ambiente.

O custo de instalação para grandes sistemas de baterias varia de 400 a

600US\$/kW para sistemas de 2MW e tempo de descarga entre 10 e 20s e 750 a 1000US\$/kW para sistemas de 20 a 40MW com tempo de descarga de 2h (1US\$ = R\$1,10). (NREL, 2005)

2.5.3 Volantes

Os volantes eram utilizados em motores a vapor, moinhos de vento e em turbinas hidrelétricas de eixo horizontal de pequeno porte, como forma de suavizar seu funcionamento. Há aproximadamente 20 anos, os volantes passaram a ser estudados como forma de armazenamento de energia cinética.



Figura 2.2. Volante moderno de alta rotação

(Fonte: www.beaconpower.com, Acesso em: 29 mar 2005)

Um volante é basicamente um disco girante, que armazena energia cinética, para posterior conversão em energia elétrica. A tecnologia atual substituiu pesados volantes de aço por materiais como a fibra de carbono, e outros compostos cerâmicos, criou os rolamentos magnéticos, com perdas por atrito nulas, e invólucros selados a vácuo, para eliminar o atrito do ar.

Os volantes podem ser desenhados para fornecer grandes quantidades de energia em curtos períodos de tempo, ou pequenas quantidades de energia em períodos de tempo maiores.

Ainda não existem instalações de reservação de energia utilizando volantes, sendo

que os sistemas existentes prestam-se somente a estudos e desenvolvimento de tecnologias. Sua faixa de potências varia na escala dos quilowatts, e seu custo é de aproximadamente US\$500/kW instalado, para volantes de aço, com potência de 1MW, e tempo de fornecimento de energia de 15 segundos, e de US\$6000/kW instalado para potências de 1kW com discos de materiais cerâmicos (1US\$ = R\$1,10). (NREL, 2005)

2.5.4 Supercondutores

Um sistema de armazenamento de energia magnética em supercondutores tem por finalidade o armazenamento e descarga instantânea de grandes quantidades de energia. A energia é armazenada através do fluxo de uma corrente elétrica constante em uma bobina supercondutora, mantida a baixas temperaturas.

Estes sistemas tem sido utilizados há anos para melhorar sistemas industriais de energia, e fornecer energia de alta qualidade a consumidores sujeitos a flutuações de energia, suprimindo rápidos picos de demanda, e corrigindo falhas na tensão ou frequência fornecidos.

Os sistemas de armazenamento de energia magnética em supercondutores carregam-se em minutos, e podem repetir as seqüências de carga/descarga milhares de vezes, sem acarretar nenhum dano aos seus componentes.

Um grande destaque para os sistemas de armazenamento de energia magnética em supercondutores é a ausência de reações químicas, não gerando toxinas.

A faixa de trabalho de sistemas de armazenamento de energia magnética em supercondutores vai de 1MW a 100MW, com um custo aproximado de US\$1000/kW instalado, para potências de 1 a 2MW, e tempo de fornecimento de 1 segundo (1US\$ = R\$1,10). (NREL, 2005)

2.5.5 Supercapacitores

Os capacitores são um dos componentes mais importantes em aplicações eletrônicas para armazenar energia e liberá-la sob tensões elétricas constantes. Baseado no mesmo princípio, capacitores podem ser utilizados para armazenar energia por períodos extensos de tempo. No entanto, até há pouco tempo os capacitores eram capazes de armazenar apenas pequenas quantidades de energia, em comparação às baterias.

Supercapacitores eletroquímicos possuem componentes comuns às baterias e aos capacitores comuns, no entanto não ocorrem reações químicas durante armazenamento ou durante o fornecimento de energia, como ocorre com as baterias. Capacitores convencionais possuem uma densidade de energia de aproximadamente 0,5Wh/kg, mas supercapacitores podem armazenar quatro vezes mais energia.

Dentro de seu campo de aplicações, destaca-se o controle de flutuações de tensão em redes elétricas isoladas, submetidas a grandes variações de demanda. Supercapacitores possuem potências que variam de 7W a 20kW, e são utilizados apenas na manutenção de energia de pequenos dispositivos. (NREL, 2005)

2.5.6 Usinas Reversíveis

As usinas reversíveis têm sido utilizadas desde 1929, sendo a tecnologia de armazenamento de energia mais antiga que existe. De fato, era a única opção até os anos 70, quando se tratava de geração de energia em grande escala.

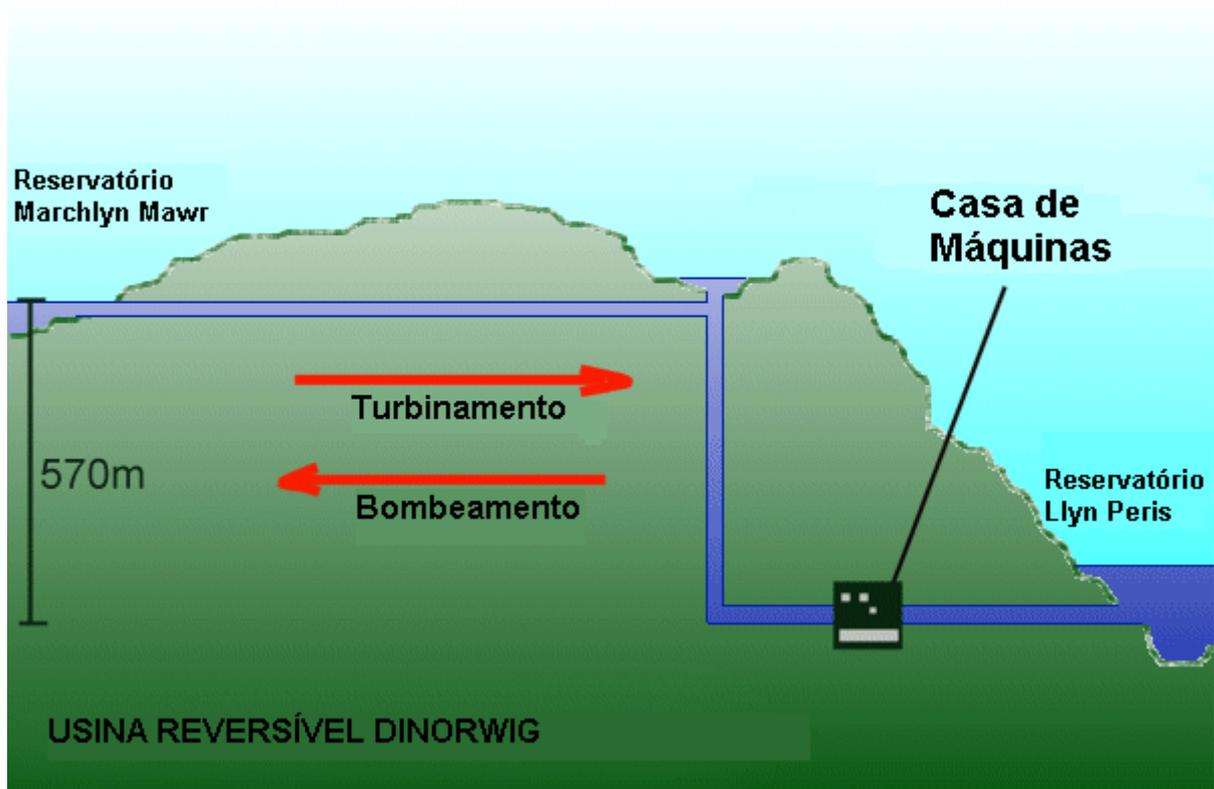


Figura 2.3. Representação esquemática da usina reversível de Dinorwig, Reino Unido
(Fonte: Adaptado de www.sandhurst.bracknell-forest.sch.uk, Acesso em: 29 mar 2005)

As usinas reversíveis são utilizadas para suprir picos de demanda, bombeando água a um reservatório superior em momentos de baixa demanda. Quando há demanda, a água é turbinada, suprimindo a demanda de energia. Os últimos avanços tecnológicos permitem a estas máquinas operarem em modo síncrono quando gerando energia, e em modo assíncrono quando bombeando.

Um novo conceito é a associação da energia eólica com usinas reversíveis, onde as variações da potência eólica podem ser niveladas usando o vento para bombear água ao

reservatório superior, e gerando eletricidade através das turbinas hidrelétricas.

Um estudo em andamento, conduzido por D'Agostini, 2005, avalia a possibilidade de melhor aproveitar o potencial eólico no litoral norte do Rio Grande do Sul, através do armazenamento em reservatórios situados na região da Serra Geral, com opções de volumes entre 18 e 130hm³. As potências situam-se na faixa dos 150MW, tanto das turbinas eólicas quanto das máquinas hidráulicas. Estima-se que este sistema possa elevar o fator de capacidade do sistema, dos 30% indicados pela bibliografia, para perto de 90%.

É possível atingir potências de até 2,1GW, com um custo aproximado entre US\$500 e US\$1600/kW instalado (1US\$ = R\$1,10). (NREL, 2005). Um resumo das informações de cada tecnologia de armazenamento é apresentado na tabela 2.1.

Sistemas de pequena potência demandam soluções simples, passíveis de serem construídas pelas comunidades interessadas, por cooperativas ou por empresas de pequeno porte. De todos estes sistemas, o mais viável para sistemas de pequeno porte, e períodos de armazenamento da ordem de alguns dias é a usina reversível, por sua simplicidade de construção em relação a sistemas de ar comprimido, por exemplo.

Todas as outras tecnologias necessitam de sistemas avançados de manufatura e controle, mão de obra especializada e possuem alto custo de implantação. Usinas reversíveis, por outro lado, possuem uma operação baseada em pequenas centrais hidrelétricas, sendo que estas vêm sendo utilizadas desde a segunda metade do século XIX, tanto em sistemas de grande potência, quanto em pequenas instalações (A ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, 1977).

TABELA 2.1. Resumo das principais características dos sistemas de reservação de energia

Tecnologia	Capacidade	Vantagens	Desvantagens	Custo de instalação
Ar comprimido	25MW a 350MW	-período de armazenamento -tempo de inicialização	-escassez de formações geológicas compatíveis -custo de reservatórios artificiais	350 – 500US\$/kW
Baterias	100W a 20MW	-disponibilidade imediata de utilização	-disposição final	400 – 600US\$/Kw (2MW, 10-20s) 750 – 1000US\$/kW (20-40MW, 2h)
Volantes	1kW a 1MW	-grandes potências em curtos períodos	-alto custo	6,000US\$/kW (1 kW) 500 US \$/kW (1 MW, 15 segundos)
Super Condutores	1MW a 100MW	-descargas imediatas de grandes potências	-uso restrito a indústrias e grandes sistemas	1000 US \$/Kw (1 – 2MW, 1 segundo)
Super Capacitores	7W a 20kW	-regulação de flutuações de energia	-pequenas potências	-
Usinas Reversíveis	até 2,1GW	-grande período de armazenamento -grandes potências	-necessidade de condições topográficas favoráveis	500 – 1600 US \$/kW

(Fonte: NREL, 2005)

2.6 FOCO NAS USINAS REVERSÍVEIS

As usinas reversíveis baseiam-se no armazenamento de energia gravitacional, através do bombeamento de água a um reservatório, estando este a uma altura relativa maior que a inicial. Ao contrário de sistemas de armazenamento de energia em baterias ou volantes, a água armazenada pode ser utilizada a qualquer momento, na quantidade necessária. São três os principais componentes do sistema, os reservatórios superior e inferior, o sistema de

bombeamento e turbinamento além dos condutos hidráulicos.

A variação da carga durante as 24h do dia pode ser atendida com bom rendimento econômico através do uso de usinas reversíveis, quando os reservatórios têm volume útil suficiente para acumular a água durante os períodos de pequena carga, e turbiná-la durante as cargas altas. Essa compensação pode ser diária ou semanal, aproveitando-se da carga reduzida durante finais de semana, para acumulação d'água (Schreiber, 1977).

Os reservatórios podem ser construídos independentes de um rio, de modo que certo volume oscila entre os dois reservatórios e é necessário apenas um pequeno afluxo para restituir as perdas por evaporação e infiltração; ou podem ser construídos no leito de um rio, sendo utilizados como uma usina hidrelétrica normal durante o dia, e bombeando todo o excedente de energias renováveis durante a noite (Schreiber, 1977).

A energia imposta à água pelas bombas não pode ser recuperada completamente, devido às perdas mecânicas, elétricas e por atrito na operação de motores, bombas, tubulações, etc., e da mesma forma durante o turbinamento. O fator de rendimento em instalações era de cerca de 70% em 1977 (Schreiber, 1977). Apesar desta perda de energia, a grande variação nos preços de energia em horários de base e pico, e a possibilidade de bombeamento noturno utilizando energias renováveis faz desta uma alternativa viável.

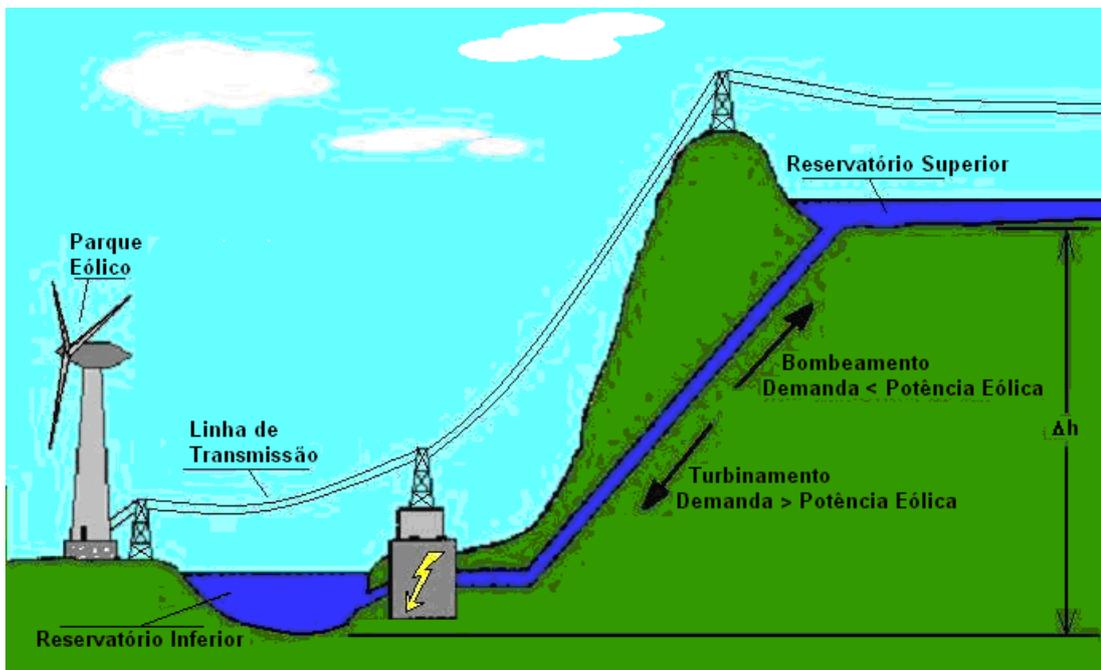


Figura 2.4. Sistema híbrido eólico-hidrelétrico

Usinas reversíveis de grande porte utilizam principalmente turbinas Francis reversíveis, que atuam tanto como turbinas quanto como bombas e motores-geradores, mas a bibliografia indica outras configurações, como sistemas com uma bomba e uma turbina acoplados ao mesmo motor-gerador, sistemas de bombeamento e turbinamento independentes, ou como propôs Allan (2001), um sistema utilizando bombas funcionando como turbinas acoplado a um motor e a um gerador, ou a apenas um motor-gerador.

Capítulo 3

SISTEMA PROPOSTO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Partindo do trabalho desenvolvido por D'AGOSTINI (2005), foi proposto um sistema de geração eólico com reservação hidráulica para estudo do comportamento das variáveis de interesse, em função da combinação de valores entre demanda média, potência eólica instalada e queda entre reservatórios. O sistema proposto por DAGOSTINI (2005) situa-se na faixa entre a Serra Geral e o litoral do Rio Grande do Sul, sendo o parque eólico localizado no litoral, e os reservatórios na topografia favorável da Serra Geral.

Esta localização favorece as grandes quedas, que podem atingir 900m, e possui grandes possibilidades de reservatórios, com pouca área ocupada no entorno ou dentro destes, e há boa proximidade com linhas de transmissão de energia elétrica, e o trabalho de DAGOSTINI (2005) analisa o efeito sobre o atendimento de diferentes capacidades de reservatórios, em um sistema interligado à rede elétrica nacional. A potência instalada utilizada foi de 150MW, coincidentemente, a mesma que atualmente está sendo instalada no município de Osório, RS.

3.2 O SISTEMA

O sistema proposto é constituído basicamente por um ou mais geradores eólicos, por um sistema gerador hidrelétrico reversível, por dois reservatórios e por um conjunto de cargas.

O gerador hidrelétrico reversível consiste de uma usina hidrelétrica dotada de um conjunto de turbinas reversíveis, que podem operar tanto em modo de turbinamento como de bombeamento, com potência instalada variando entre 250kW e 16MW.

O gerador eólico consiste de um conjunto de turbinas eólicas com potência total variando entre 250kW e 16MW, de forma a suprir o pico de consumo, em conjunto com o equipamento hidrelétrico. Este parque eólico tem sua localização teórica em um local com regime de ventos semelhante ao da região de onde provêm os dados de velocidade do vento utilizados.

Os reservatórios arbitrados possuem 200m de profundidade e possuem diferenças de cotas de 100m, 350m, 600 ou 850m, com capacidades máximas de armazenamento de água de 25hm³.

Para uma boa caracterização das cargas consumidoras, optou-se por adimensionalizar uma série de dados com duração de um ano, proveniente de medições do litoral norte do estado do Rio Grande do Sul, em uma faixa que vai do município de Mostardas até o município de Torres. Através desta série, pôde-se obter o comportamento do consumo esperado, e estes valores adimensionais foram multiplicados pelo valor médio para o qual cada faixa de análise foi realizada.

Tendo este panorama como idéia inicial, decidiu-se não limitar a capacidade dos reservatórios, e estudar quanto da demanda é possível atender com uma determinada potência eólica instalada, comparando estes dados com o atendimento possível para um sistema eólico de mesma potência instalada, sem armazenamento de energia.

A análise realizada consistiu em uma simulação de um sistema de geração eólica, utilizando séries anuais de dados de vento e demanda, com e sem armazenamento de energia. Um estudo completo deveria englobar uma análise econômica, e este foi o dado que indicou com que faixa de potências e dimensões trabalhar, pois as curvas de custos encontradas na literatura são geralmente aplicadas a micro ou pequenas centrais hidrelétricas, ou seja, abaixo de 30MW instalados.

3.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA

Como meio de avaliar o funcionamento do sistema, optou-se por contabilizar o tempo durante o qual a demanda é atendida. Entende-se por falha, todos os instantes em que não há disponibilidade eólica ou água suficiente armazenada nos reservatórios e portanto a demanda não é atendida.

Pequenas diferenças entre a potência disponível e a demanda poderiam ser não consideradas como falhas, visto que são admissíveis pequenas variações na tensão disponibilizada, e dependendo do uso, as mesmas são aceitáveis. Para que o sistema simulado fosse simples, optou-se por considerar como falhas toda situação em que os equipamentos eletromecânicos não são capazes de produzir uma potência igual ou superior à demandada, e esta abordagem torna os resultados a favor da segurança.

A fim de analisar economicamente o sistema proposto, foi feita uma pesquisa entre os autores que disponibilizam custos para sistemas de geração hidrelétrica e eólica de, e com fabricantes de equipamentos. Todos os custos foram estimados utilizando o dólar americano como moeda, e são detalhados na tabela 3.1.

Através desses dados, foi criado um fluxograma básico de funcionamento do sistema, e por meio dele, realizada a programação numérica, como descrito no próximo

capítulo.

TABELA 3.1 – Estimativa de custo de componentes

Item	Custo (US\$)	Fonte
Barragem de Terra	$CBT = (43,88 \times h_B^2 + 82,6) \times L_B$	[1]
Bombas Centrífugas	$CBC = 80 \times P_H$	[2]
Turbinas Eólicas	$CTE = 995,23 \times P_E + 46273$	[3]
Turbinas Hidráulicas	$CTH = (200,3 - 0,003 \times P_H) \times P_H$	[4]
Conduto Forçado	$CCF = (5260,2 \times Q_M^2 + 51,8 \times Q_M + 221650) \times L_C$	[5]
Apoios Conduto Forçado	$CAC = (1821,6 \times q_M^2 + 8847,3 \times q_M + 105244,8) \times (1 + V_{INCC}) \times L_C$	[6]
Casa de Máquinas	$CCM = 35,13 \times P_H \times (1 + V_{INCC})$	[6]
Comportas e grades	$CCG = 4,2 \times Q_M^2 + 73 \times Q_M + 304,3$	[6]
Válvulas	$CV = 7,62 \times P_H$	[6]
Ponte Rolante	$CPR = 4,49 \times P_H$	[6]
Gerador	$CG = 1149,72 \times \left(\frac{P_H}{100} \right)^{0,74} \times \left(\frac{P_H}{100} \right)^{1,35}$	[4]
Quadros de Comando	$CQC = 15,95 \times P_H$	[6]
Dispositivos de Proteção	$CDP = 5,5 \times P_H$	[6]
Subestação	$CSE = 31,12 \times P_H$	[6]
Linhas de transmissão	$CLT = (3842,9 + 3,3 \times P_H - 0,0001 \times P_H^2) \times L_T$	[6]
Terrenos	$CTR = CUT \times A_D$	[6]

Sendo $Q_M = q_M \cdot n_H$; Fontes: [1] BALARIM; [2] BELUCO, 1994; [3] WTIC, 2005; [4]

ELETROBRÁS, 2000; [5] SAINT GOBAIN, 2005 e [6] SOUZA, 1992

Capítulo 4

SIMULAÇÃO NUMÉRICA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em um sistema eólico isolado tradicional, quando há demanda, mas não há vento disponível ocorre uma falha no sistema, caso não haja um sistema de reservação adequado, ou caso o mesmo exista, mas não haja energia suficiente armazenada. E da mesma forma, quando a demanda é baixa, ou inexistente, e há vento suficiente para acionar as turbinas eólicas, a energia eólica excedente é desperdiçada.

Visando estudar o comportamento de um sistema de geração eólico com reservação hidráulica, foi criado um programa de simulação numérica de um sistema composto por um parque eólico e de um sistema de armazenamento hidráulico, dotado do tipo de turbina escolhido a partir da figura 4.1, e que utiliza a energia potencial gravitacional como meio para armazenar o excedente de energia eólica, bombeando água do reservatório inferior para o superior, para posterior utilização turbinando a água de volta ao reservatório inferior.

Adotou-se uma faixa de quedas entre 100m e 850m, contabilizadas a partir da cota inferior dos reservatórios. De acordo com a publicação Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (ELETROBRÁS, 2000), para esta faixa de quedas, pode-se utilizar turbinas do tipo Pelton ou Francis, em função da vazão turbinada.

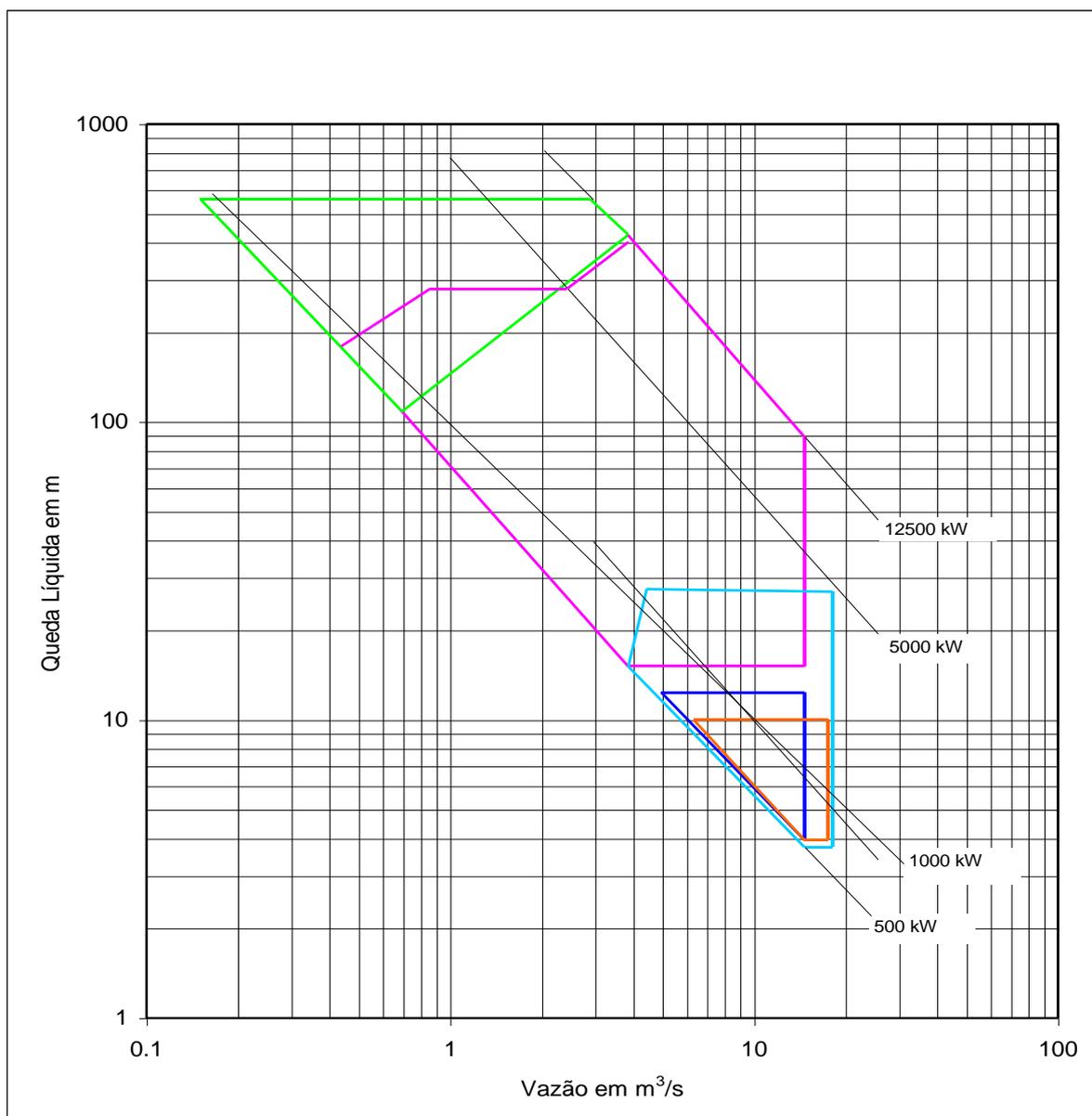


Figura 4.1. Escolha de tipo de turbina, de acordo com a queda líquida e a vazão
(Fonte: ELETROBRÁS, 2000)

Adotou-se neste trabalho um sistema isolado da rede interligada, onde fatores como redes interligadas ou preços diferenciados de energia não afetam o funcionamento do sistema. Por se tratar de um sistema isolado, a operação não leva em consideração horários de pico ou base para determinar o custo da energia. Em sistemas conectados, é possível desviar

parte ou toda energia para reservação em horários de baixo consumo, e conseqüentemente baixo preço, para utilização em horários de maior demanda e também maior preço, visando aliviar a operação do sistema interligado, não exigindo de outras fontes de energia que supram os picos de demanda. Não foram levadas em consideração limitações de volumes nos reservatórios superior e inferior, para que fosse possível analisar o efeito da variação desses valores no sistema. No entanto, esta consideração pode gerar dimensões de barragens inviáveis economicamente e sistemas de reservação hidráulica reais contarão com limitações geográficas e questões de uso do solo e, neste caso, devem ser avaliadas diferentes combinações de potências instaladas e posicionamentos de reservatórios.

4.2 SIMULAÇÃO COM RESERVAÇÃO HIDRÁULICA

O objetivo desta simulação é fornecer a porcentagem de tempo em que a demanda é atendida, o volume máximo utilizado pelos reservatórios e as vazões máximas. Estes dados serão posteriormente analisados economicamente, considerando os custos de turbinas eólicas e hidráulicas, bombas, tubulação, sistemas hidráulicos, controladores eletromecânicos, linhas de transmissão, barragens, custos administrativos, de engenharia, mão de obra e operação e manutenção.

A simulação numérica foi criada a partir do fluxograma das figuras 4.4, 4.5 e 4.6, utilizando como interface gráfica o programa Microsoft Excel, e como ferramenta de simulação e de processamento de dados o programa Visual Basic, operando como macro interna ao Excel e utilizando como base a plataforma Windows XP SP2. O equipamento utilizado é composto por uma placa mãe ASUS A8N SLI Premium equipada com processador AMD64 3,2+, 1024Mb de memória RAM e HD de 200Gb.

4.2.1 Detalhamento da Simulação com Reservação Hidráulica

Os dados iniciais da simulação são os perfis de demanda e velocidade do vento, com duração de um ano e discretização de uma hora, curvas chave dos reservatórios superior e inferior, as potências eólica e hidráulica instaladas e as curvas de funcionamento das turbinas eólicas. Os sistema de bombeamento e turbinamento foram simulados fixando um rendimento médio de 81%, para toda faixa de funcionamento.

Para descrever o comportamento do vento ao longo de um ano, utilizou-se uma série de ventos obtida por D'AGOSTINI (2005), aplicada ao comportamento esperado de uma turbina eólica do fabricante JACOBS, com duração de um ano. Esta série de potências foi adimensionalizada, dividindo cada valor pela potência adotada inicialmente, e pode ser visualizada na figura 4.4. Esta série é discretizada em intervalos de tempo de uma hora, e correspondente a uma estação meteorológica situada no litoral norte gaúcho. Cada valor de potência eólica instalada escolhido é multiplicado pela série adimensional acima descrita, a fim de determinar a série de potências eólicas disponível. A distribuição estatística desta série de ventos pode ser vista na figura 4.2, onde estão desenhadas a função densidade de probabilidade ($p(v)$) e a função distribuição cumulativa ($P(v)$).

Como forma de descrever uma série temporal de ventos, AMARANTE (2001) utiliza os índices k e C da distribuição estatística de Weibull. O índice C está relacionado com a velocidade média do vento, e o índice k é o fator de forma adimensional, e quando o mesmo assume maiores valores, os ventos ocorrem com maior constância, como indicado na figura 4.3.

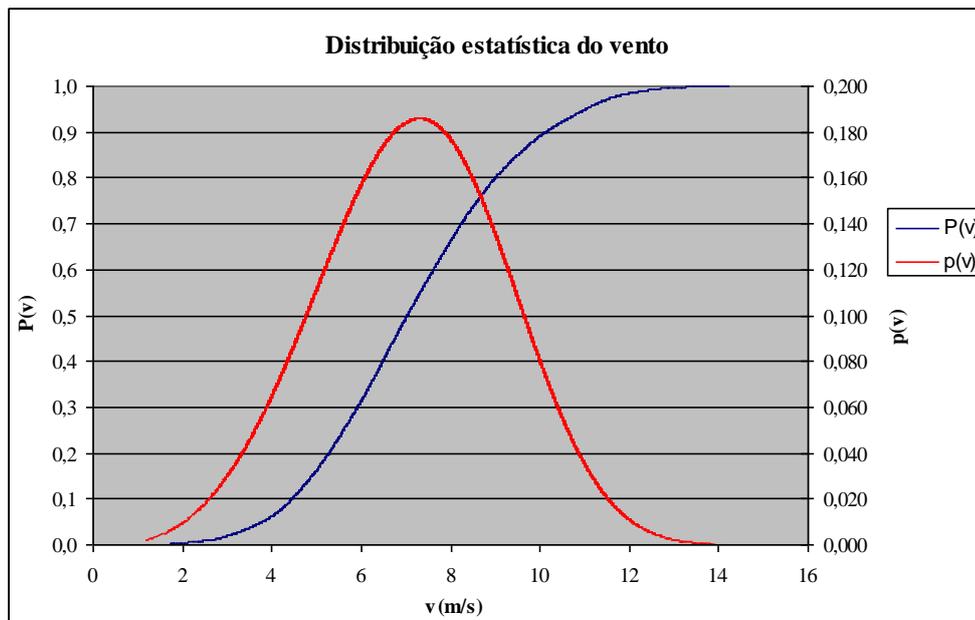


Figura 4.2. Funções densidade de probabilidade ($p(v)$) e distribuição cumulativa ($P(v)$) para a série de ventos adotada

Da mesma forma, o comportamento da demanda foi atribuído a uma série fornecida pela CEEE (D'AGOSTINI, 2005), para uma faixa de consumidores situados entre os municípios de Mostardas e Torres, e pode ser visualizada na figura 4.5. A série original de demanda foi adimensionalizada, dividindo a mesma por sua média e a cada caso estudado, multiplicada pela nova média adotada e mantendo sua distribuição temporal original.

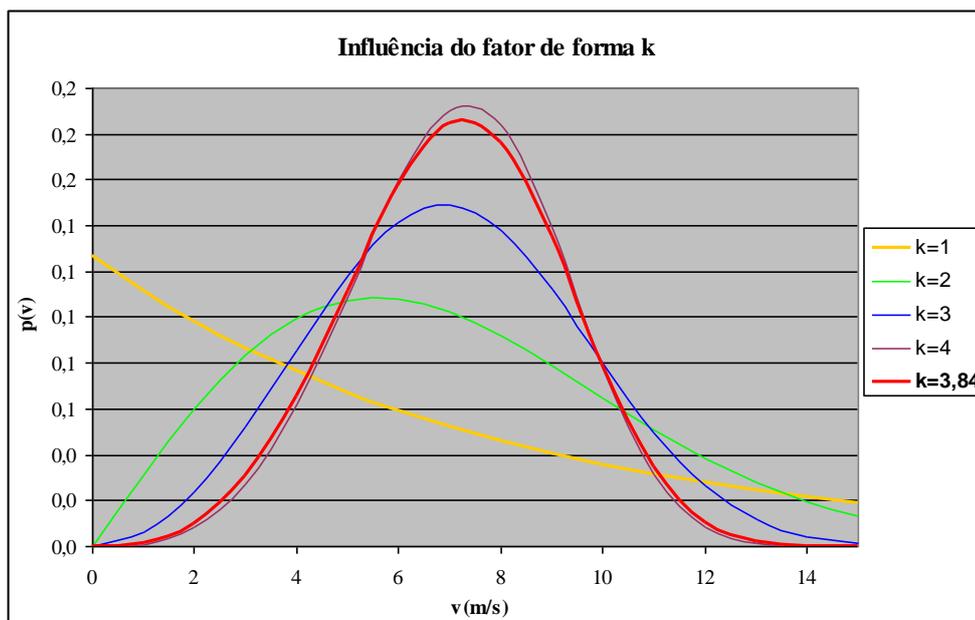


Figura 4.3. Influência do fator de forma k na distribuição estatística de Weibull, para $C=7,89$

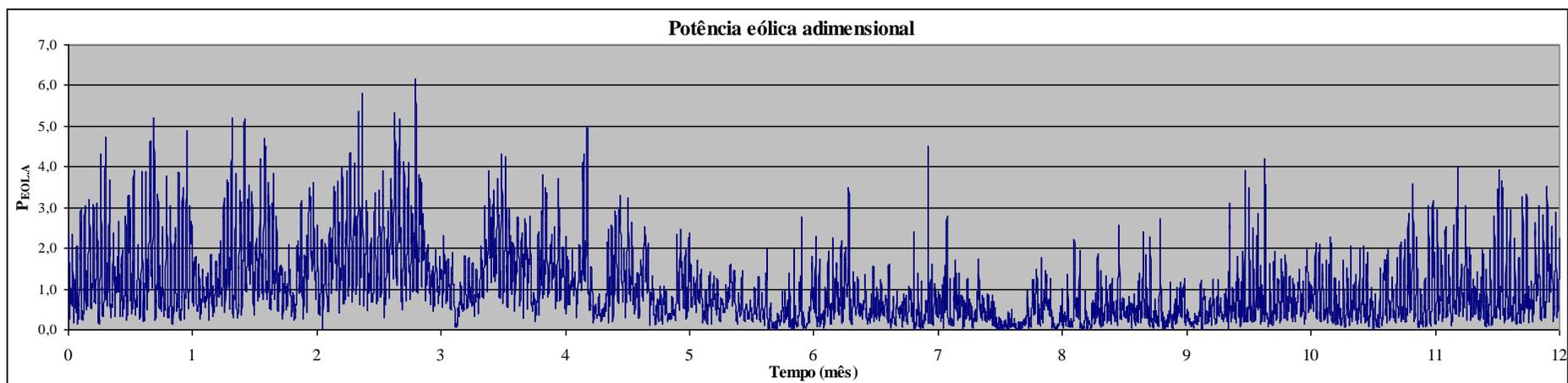


Figura 4.4. Comportamento da potência eólica adimensional ao longo de um ano
(Fonte: D'AGOSTINI, 2005)

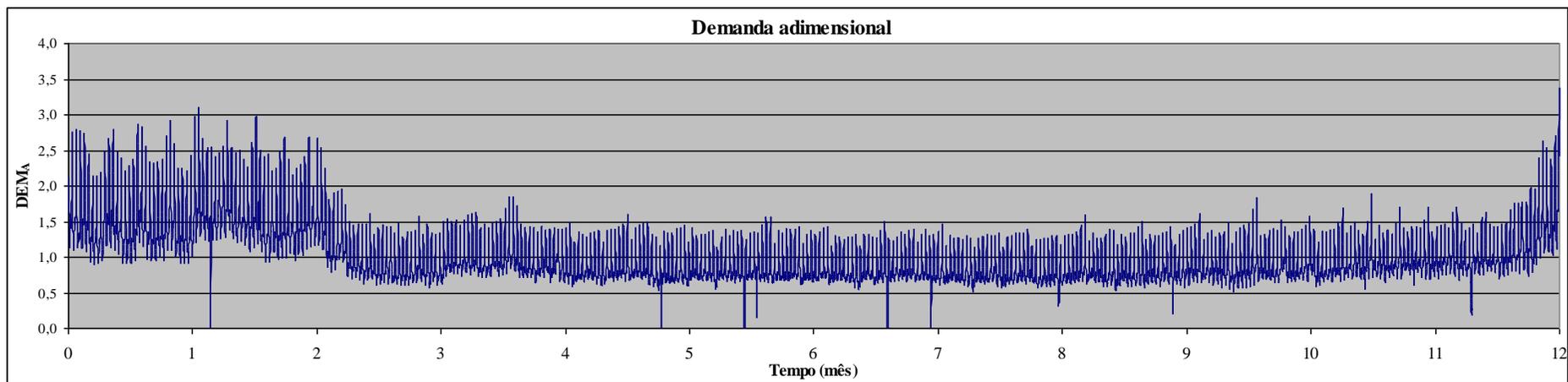


Figura 4.5. Comportamento da demanda adimensional ao longo de um ano
(Fonte: D'AGOSTINI, 2005)

4.2.2 Estrutura da Simulação com Reservação Hidráulica

Seguindo o fluxograma da figura 4.6, a entrada dos dados de velocidade de vento ocorre no instante i . Esse dado é verificado quanto ao seu enquadramento nos limites de velocidade estabelecidos pelo fabricante da turbina eólica, sendo essa condição denominada condição um (C1). Se o resultado da condição um for negativo, ou seja, se a velocidade do vento estiver fora dos limites estabelecidos, a simulação passa à situação denominada situação dois (S2). Caso contrário, os dados são utilizados para calcular a potência eólica correspondente, de acordo com a curva de funcionamento fornecida pelo fabricante.

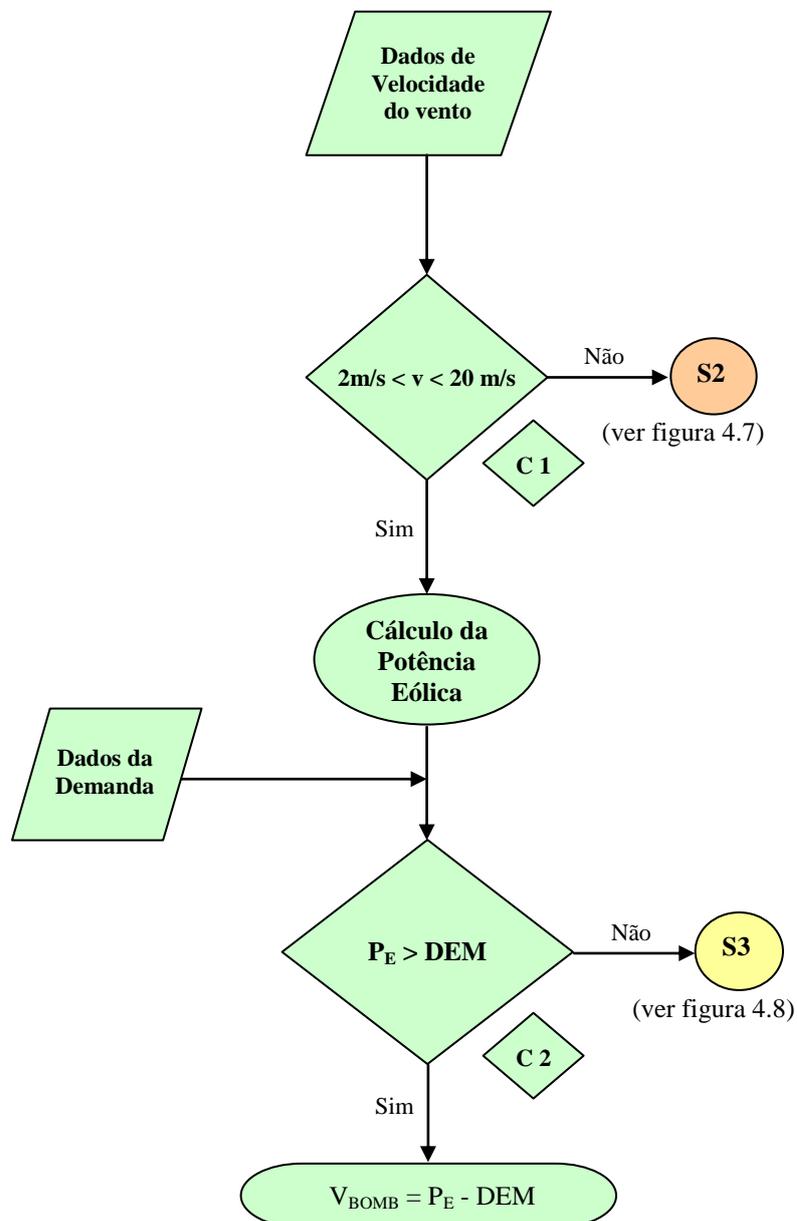


Figura 4.6. Simulação eólica com reservação: entrada de dados

Após esse cálculo, são inseridos os dados de demanda horária e ambos são comparados, na condição dois (C2), que julga se a potência eólica disponível no instante i é maior que a demanda no mesmo instante. Se essa comparação for negativa, passa-se à situação três (S3). O caso contrário resulta no cálculo do excesso de energia eólica disponível, que é utilizado para bombear água ao reservatório superior. Esse dado é também submetido aos parâmetros fornecidos pelo fabricante das bombas.

A situação dois (S2), visualizada na figura 4.7, ocorre quando o vento está fora dos padrões estabelecidos pelo fabricante e leva à condição cinco (C5), que analisa se há água disponível no reservatório superior. Se a resposta for negativa, então ocorre uma falha de atendimento equivalente à demanda instantânea. Se o resultado da condição cinco for positivo, ocorre a condição seis (C6), que compara se a potência e a faixa de funcionamento das turbinas hidráulicas são compatíveis com a demanda instantânea. Se a condição seis resultar negativa, então ocorre uma falha de valor igual à demanda instantânea. Caso contrário, é turbinada a potência equivalente à demanda naquele instante.

A situação três (S3), visualizada na figura 4.8, ocorre quando o vento está dentro dos padrões estabelecidos pelo fabricante e a demanda é maior que a potência eólica disponível e levando à condição três (C3), que analisa se há água disponível no reservatório superior. Se a resposta for negativa, então ocorre uma falha, equivalente à demanda instantânea. Se o resultado da condição três for positivo, ocorre a condição quatro (C4), que compara se a potência e a faixa de funcionamento das turbinas hidráulicas são compatíveis com a diferença entre a potência eólica disponível e a demanda instantâneas. Se a condição quatro resultar negativa então ocorre uma falha, de valor igual à demanda instantânea. Caso contrário, é turbinada a potência equivalente à diferença entre a potência eólica disponível e a demanda instantâneas.

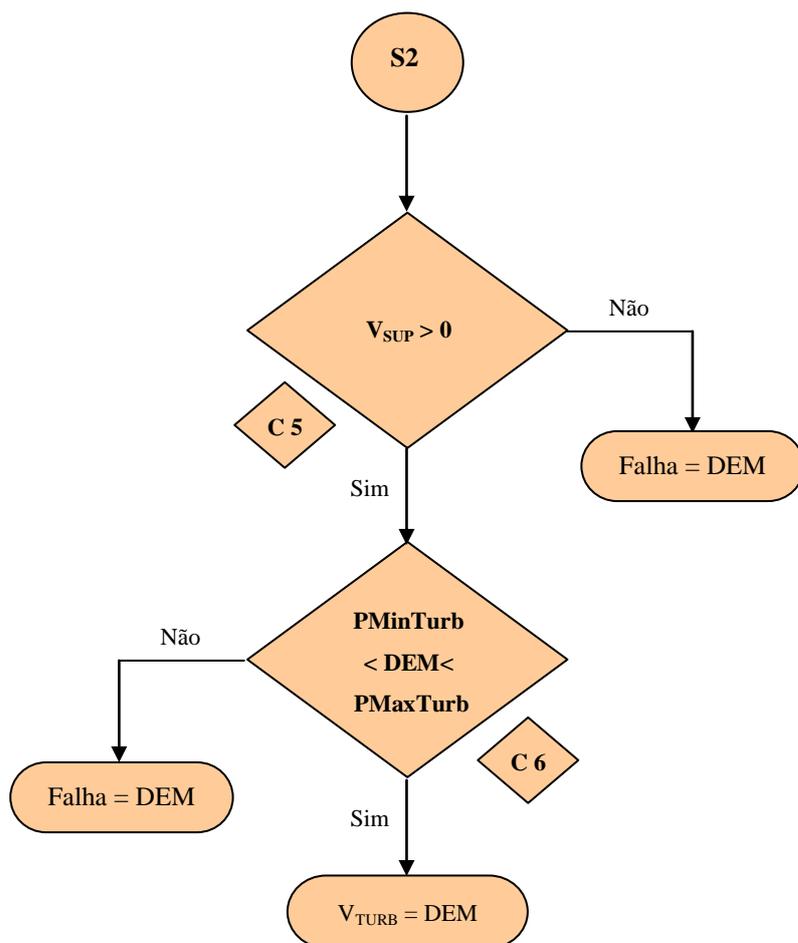


Figura 4.7. Situação 2, quando o vento não é adequado (continuação da figura 4.6)

Após este ciclo da simulação, os dados de falhas, bombeamento ou turbinamento são armazenados e os volumes de água deslocados são acrescidos ou decrescidos dos reservatórios correspondentes.

Este ciclo é repetido oito mil setecentos e sessenta vezes (8760), correspondendo às vinte e quatro horas do dia durante um ano de trezentos e sessenta e cinco dias. Após o término deste ciclo de um ano, são exportados para a planilha eletrônica: os dados de volume máximo de água armazenado pelo reservatório superior, a porcentagem de atendimento da demanda e as máximas vazões do sistema.

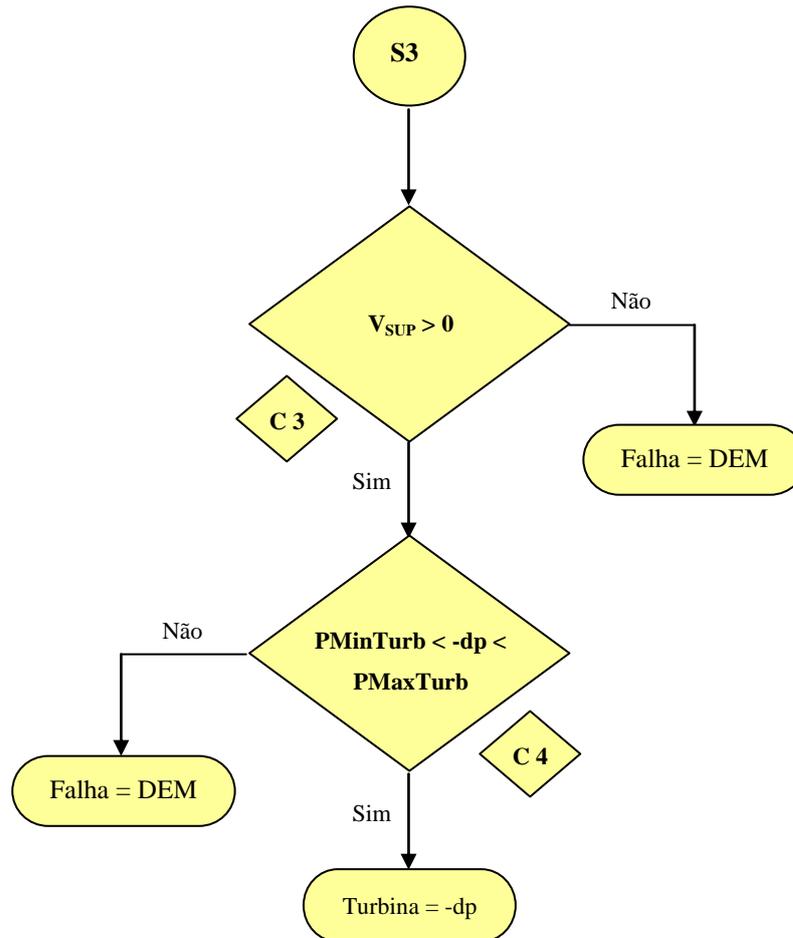


Figura 4.8. Situação 3, quando o vento não é suficiente (continuação da figura 4.6)

4.2.3 Considerações

Para determinar o volume de água deslocado durante a operação em um ciclo de um ano, dois métodos foram analisados. O primeiro consiste em fixar um volume máximo inicial e acompanhar a evolução do nível d'água no reservatório superior durante o ciclo de um ano, procurando por “planaltos”, ou seja, por longos períodos em que o nível do reservatório superior permanece inalterado, correspondendo à sua máxima capacidade, e demonstrando que foi desperdiçada uma parcela da energia proveniente do vento. O segundo consiste em fixar um volume acima do esperado, e simular durante vários ciclos. A cada nova simulação, com um valor inicial de água maior do que o necessário, uma menor parcela deste

volume é utilizada e este valor tende para o de real necessidade do sistema para uma dada situação. Utilizou-se, como volume inicial padrão, vinte e cinco milhões de metros cúbicos, que corresponde ao volume máximo para o qual o reservatório inferior atinge a cota inferior do reservatório superior. Este método foi adotado por não demandar uma análise de gráficos a cada simulação, para cada uma das combinações estudadas.

Para a maioria das combinações de demanda, potência instalada e queda, este volume foi muito maior que o necessário e o nível do reservatório inferior oscilou pouco, sendo efetuadas novas simulações, utilizando como valor inicial de volume de água contido no reservatório inferior um valor igual ao estabelecido pela primeira simulação, para que oscilações significativas do nível d'água no reservatório inferior pudessem ser computadas e utilizadas nas avaliações de vazões bombeadas ou turbinadas.

Durante a simulação, a perda de carga foi considerada constante, tendo sido a velocidade da água no conduto forçado mantida igual a $5\text{m}^3/\text{s}$ para todas as potências instaladas. Este valor, calculado inicialmente, é utilizado para todas condições de vazão seguintes, que são de igual ou menor velocidade do que a inicialmente calculada, e portanto, de igual ou menor perda de carga.

A curva de funcionamento das turbinas eólicas foi usada para todas as combinações como sendo igual à fornecida pelo fabricante das turbinas JACOBS (2005), a qual foi adimensionalizada e utilizada para todas as potências instaladas, reproduzindo assim o mesmo comportamento, como visto na figura 4.9.

A evaporação causa uma depleção no nível de ambos os reservatórios, e deve ser contabilizada nos cálculos, ou de alguma forma balanceada. Se em um estudo real de aplicação deste sistema, algum dos dois reservatórios estiver localizado próximo ou sobre um leito de rio, a perda por evaporação poderá ser retirada da vazão do rio, preservando obviamente a vazão ecológica e sendo realizados os estudos de impacto ambiental necessários.

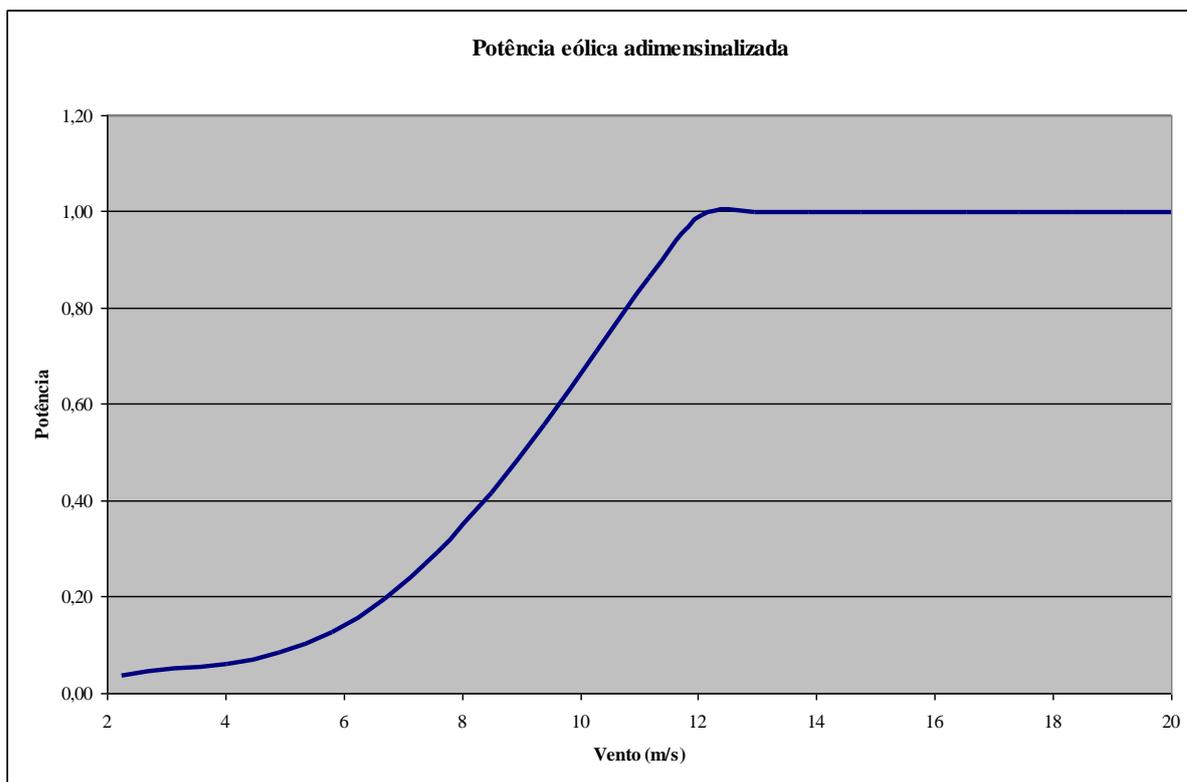


Figura 4.9. Potência eólica adimensionalizada
(Fonte: JACOBS, Consulta em: 10 abr 2005)

Pode-se determinar a eficiência média de um ciclo de reservação para o sistema proposto, como sendo igual ao quociente entre a potência disponível ao turbinar um dado volume de água e a potência necessária para bombear o mesmo volume. As eficiências médias adotadas foram de 0,96 para o sistema adutor e 0,92 para turbinas hidráulicas, bombas centrífugas, motores e geradores. O produto destes rendimentos resulta no rendimento médio de um ciclo de bombeamento ou turbinamento, igual a 0,81, e o quadrado do mesmo é igual à eficiência média de um ciclo de reservação, de 0,66. Este valor está de acordo com a faixa de eficiências de ciclos de reservação de SORENSEN (2004), entre 0,65 e 0,8.

4.2.4 Faixa de Potências Adotada

Foram adotadas demandas médias (DEM) com valores iguais a 125kW, 250kW, 500kW, 1000kW, 2000kW e 4000kW. As potências eólica e hidrelétrica instaladas (PEI) são

idênticas para cada caso, e variam em função da demanda média, entre duas e quatro vezes o valor da mesma, sendo chamado de p o fator de multiplicação que relaciona a potência instalada e a demanda média. Sendo assim,

$$PEI = p \times DEM , \quad [4.1]$$

para $2 < p < 4$, e as diferenças de cota entre os reservatórios superior e inferior adotadas foram 100m, 350m, 600m e 850m.

4.3 SIMULAÇÃO SEM RESERVAÇÃO HIDRÁULICA

Buscando um ponto de referência e comparação, foi criado um programa de simulação similar ao anteriormente apresentado, mas dirigido a sistemas de geração eólica sem armazenamento. Os resultados obtidos confirmaram os resultados já conhecidos para a porcentagem de atendimento, de RETSCREEN (2005), correspondente a 30% nas instalações atuais. Este valor situa-se dentro da faixa de valores obtidos, entre 20% e 50%, como visto adiante.

4.3.1 Detalhamento da Simulação Sem Reservação Hidráulica

A simulação numérica foi criada a partir do fluxograma da figura 4.10 e utilizou os mesmos recursos apresentados na descrição da simulação anterior. Os dados iniciais da simulação foram os perfis de demanda e velocidade do vento, com duração de um ano e

discretização de uma hora, curvas chave dos reservatórios superior e inferior, a potência eólica instalada e a curva de funcionamento das turbinas eólicas.

O objetivo desta simulação foi fornecer apenas a porcentagem de tempo em que a demanda é atendida. Estes dados foram posteriormente analisados economicamente, utilizando os mesmos critérios da simulação anterior, mas considerando desta vez apenas os custos de turbinas eólicas, controladores eletromecânicos, linhas de transmissão, custos administrativos, de engenharia, mão de obra e operação e manutenção.

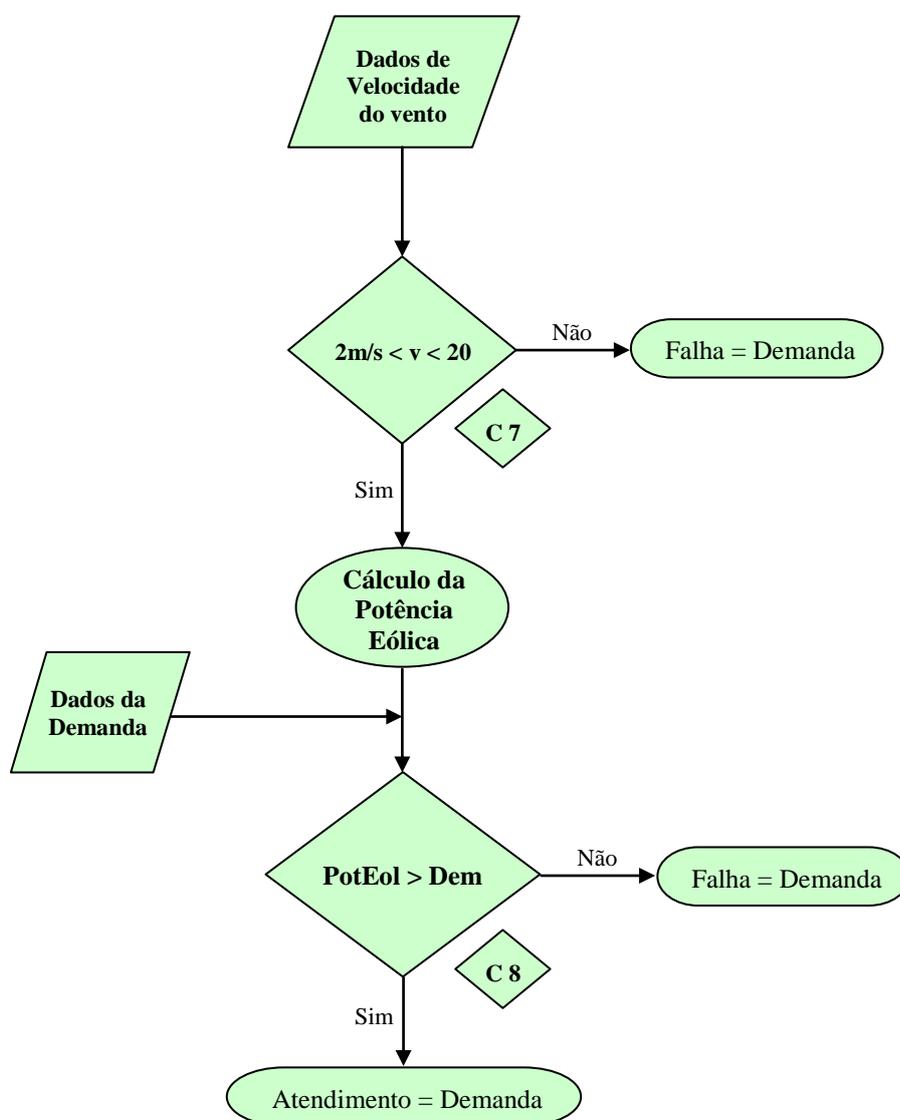


Figura 4.10. Simulação eólica sem reservação: entrada de dados

4.3.2 Estrutura da Simulação Sem Reservação Hidráulica

Seguindo o fluxograma da figura 4.10, a entrada dos dados de velocidade do vento ocorre no instante i . Esse dado é verificado quanto ao seu enquadramento nos limites de velocidade estabelecidos pelo fabricante da turbina eólica, sendo essa a condição sete (C7). Se o resultado da condição for negativo, ou seja, a velocidade do vento estiver fora dos limites estabelecidos, ocorre uma falha, correspondente à demanda instantânea. Caso contrário, os dados são utilizados para calcular a potência eólica correspondente, de acordo com a curva de funcionamento fornecida pelo fabricante.

Após esse cálculo, são inseridos os dados de demanda instantânea, e ambos são comparados, na condição oito (C8), que julga se a potência eólica disponível no instante i é maior que a demanda no mesmo instante. Se o resultado dessa comparação for negativo, ocorre outra falha, também correspondente à demanda instantânea. O caso contrário resulta no atendimento da demanda instantânea pelas turbinas eólicas e este dado é também submetido aos parâmetros fornecidos pelo fabricante das bombas. Neste último resultado da simulação sem reservatório, fica clara a desvantagem de um sistema puramente eólico quando comparado a um sistema com reservação por bombeamento, pois a diferença entre a potência eólica disponível e a demanda no instante i não pode ser reservada para utilização posterior.

Este ciclo é repetido e após o término do mesmo, os resultados são exportados para a planilha eletrônica a informação de porcentagem de atendimento da demanda.

4.3.3 Faixa de Potências Adotada

As demandas médias adotadas são iguais às adotadas para a simulação com reservação hidráulica, assim como a potências instalada eólica, que varia em função da

demanda média, entre duas e quatro vezes o valor da mesma, sendo chamado de p o fator de multiplicação que relaciona a potência instalada e a demanda média. Sendo assim,

$$PEI = p \times DEM , \quad [4.1]$$

para $2 < p < 4$.

4.4 VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Depois de escrito o código da simulação, foi realizada uma aferição da mesma, utilizando uma série de ventos e demandas com a qual foi possível prever e confirmar o comportamento do sistema.

A série de valores de vento foi ajustada para que resultasse em uma série constante de potências eólicas, iguais a 50kW, durante a primeira metade do período de um ano analisado, e igual a zero no período seguinte. Da mesma forma, a demanda foi mantida nula na primeira metade do período, e constante e igual a 50kW no segundo período. Os dados de entrada são demonstrados nas figuras NN1 e NN2.

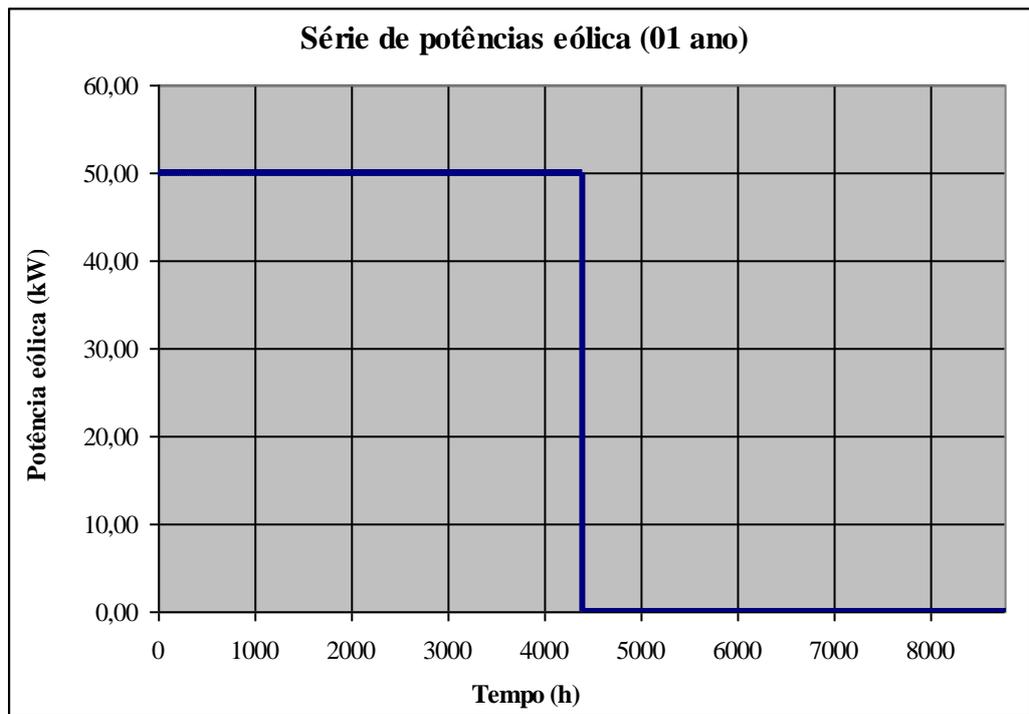


Figura 4.11. Série de potências eólicas para aferição da simulação.

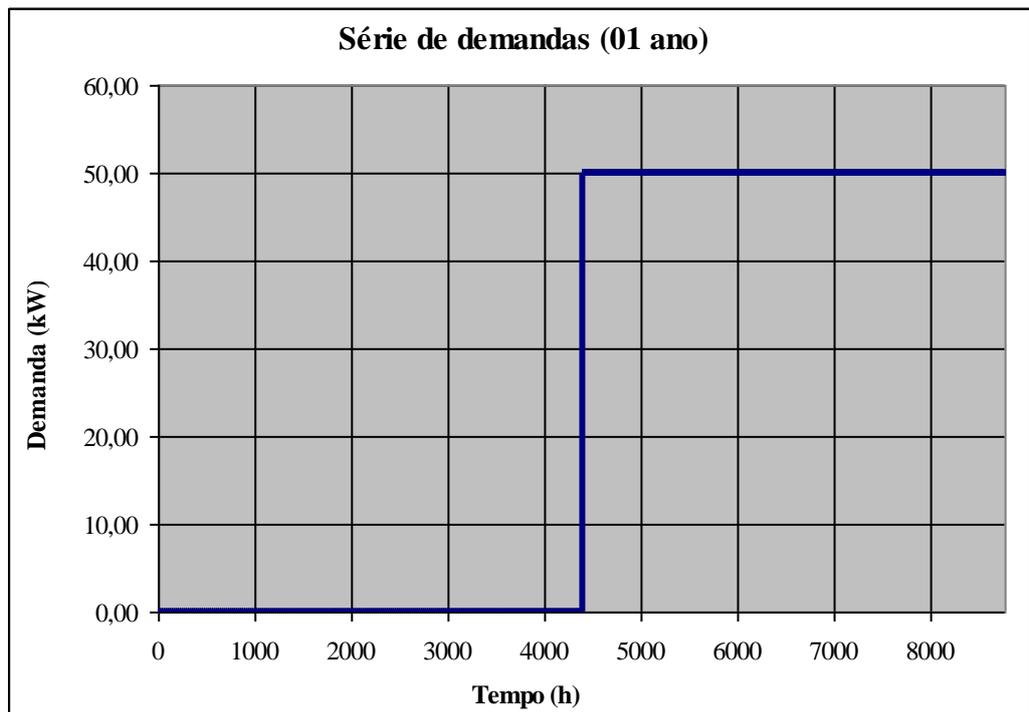


Figura 4.12. Série de demandas para aferição da simulação.

Desta forma era esperado um crescimento constante do volume de água armazenado no reservatório superior durante a primeira metade do período, desde que não

houvesse restrições de volume máximo. No segundo período, esperava-se um decréscimo constante deste volume.

Estes dados são confirmados pela figura NN3, com a qual é possível confirmar o comportamento esperado, e aferir o funcionamento da simulação utilizada. O atendimento da demanda foi igual a 100%, visto que a energia armazenada na primeira metade do período foi igual à demandada no segundo.

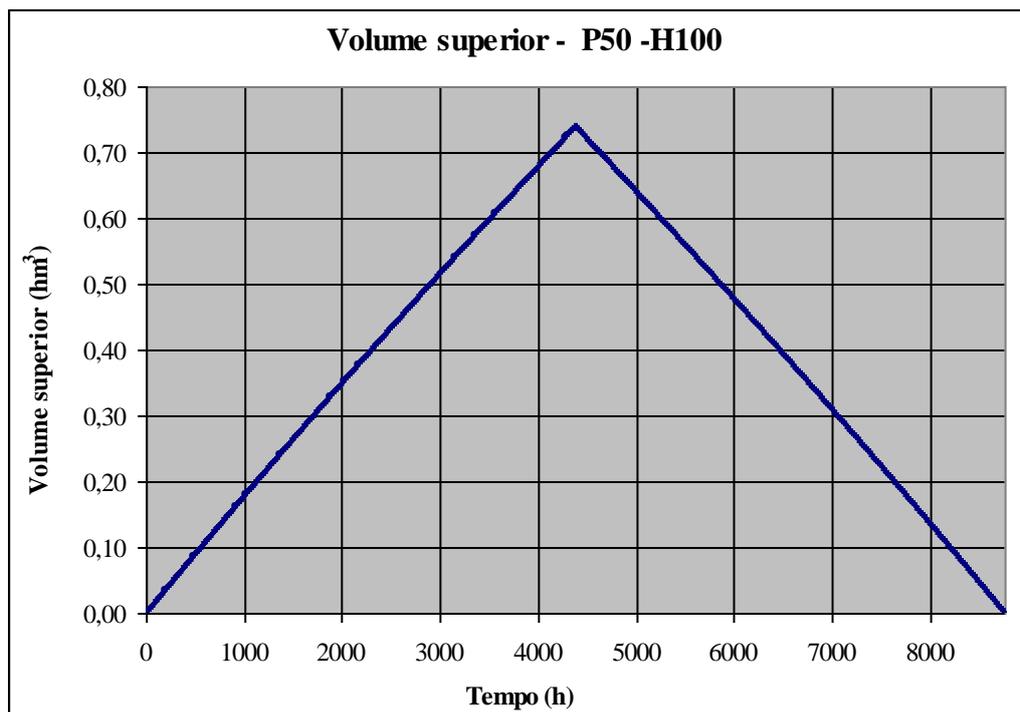


Figura 4.13. Aferição da simulação, confirmando o comportamento para as séries de dados utilizadas..

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Quatro dados principais foram gerados a partir da simulação de cada uma das combinações, sendo eles a porcentagem de tempo em que a demanda é atendida; o volume total utilizado, expresso em hectômetros cúbicos (hm^3); o custo de instalação do sistema, expresso em US\$/kW; e o custo de energia, expresso em US\$/MWh. Outros dados também poderiam ser extraídos, como áreas dos reservatórios para cálculo de evaporação e quantidade

de energia por faixa de horários, caso sejam consideradas diferentes tarifas de venda de energia.

A figura 4.13 ilustra as porcentagens de atendimento da demanda para todas as combinações, tanto para sistemas com reservação hidráulica quanto para sistemas eólicos sem reservação. É interessante observar que as curvas de mesma demanda estão sobrepostas, ou seja, o comportamento da função atendimento é igual para todas as combinações de demanda média e quedas entre reservatórios, e pode ser extrapolada para qualquer outra situação, em função do fator p , sendo este comportamento ilustrado na figura 4.15.

A porcentagem de atendimento para sistemas puramente eólicos, dada por ASR, atendimento sem reservação, varia de acordo com a equação [4.2], e possui $R^2 = 0,9955$, para $2 < p < 4$.

$$ASR = 14,6 \times p - 9,8 \quad [4.2]$$

Para sistemas com reservação hidráulica, a porcentagem de atendimento, dada por ACR, atendimento com reservação, se comporta de acordo com a equação [4.3], e $R^2 = 0,9996$, para $2 < p < 4$.

$$ACR = 16,1 \times p^5 - 239,1 \times p^4 + 1383,4 \times p^3 - 3918,1 \times p^2 + 5484,7 \times p - 302 \quad [4.3]$$

Este resultado pode indicar a necessidade de uma futura avaliação da influência de séries de vento com diferentes fatores de forma k , vistas na figura 4.3, de forma a determinar como o sistema proposto pode funcionar em outras regiões, com diferentes distribuições temporais de vento.

Nas figuras 4.16 e 4.17 estão ilustrados os volumes máximos atingidos nos reservatórios ao longo de um ano de simulação. Cada conjunto de curvas de uma dada

demanda média, corresponde a uma queda entre reservatórios diferente e assume valores maiores com a diminuição da queda, estando de acordo com a equação [4.4], onde, para uma dada potência, um aumento na queda resulta numa diminuição da vazão, e conseqüentemente, no volume total deslocado. Nota-se um grande crescimento no volume máximo atingido para os conjuntos de curvas com $\Delta H=100\text{m}$, a partir da demanda média de 500kW.

$$P_H = \gamma \times Q \times \Delta H \times \eta \quad [4.4]$$

Este comportamento tem especial importância na avaliação econômica dos sistemas propostos, como será visto posteriormente, e destaca a importância de uma correta avaliação das condições topográficas, procurando por opções que minimizem as dimensões das barragens necessárias.

Fica visível na figura 4.17 um comportamento ordenado de crescimento do volume máximo utilizado, e este comportamento pode ser futuramente estudado, a fim de determinar um método de avaliação geral de volumes de reservatórios necessários. Esta avaliação pode ser feita para outras opções de reservação de energia, calculando-se durante a simulação apenas a energia armazenada, para posteriormente relacionar os valores máximos atingidos com as grandezas e dimensões correspondentes à opção de reservação escolhida, e desta forma criar uma metodologia de avaliação de sistemas de reservação que abranja outras tecnologias.

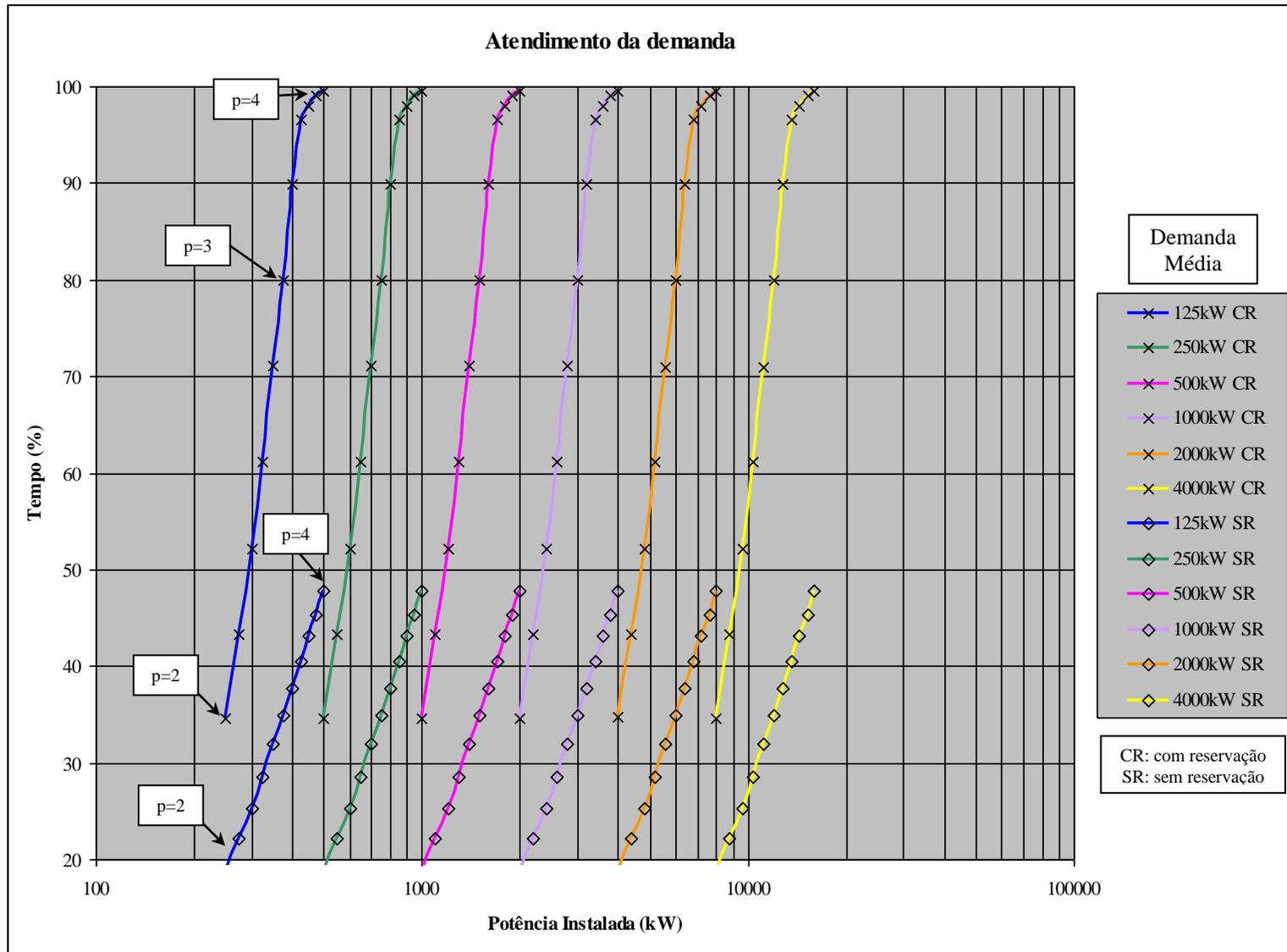


Figura 4.14. Atendimento da Demanda (%)

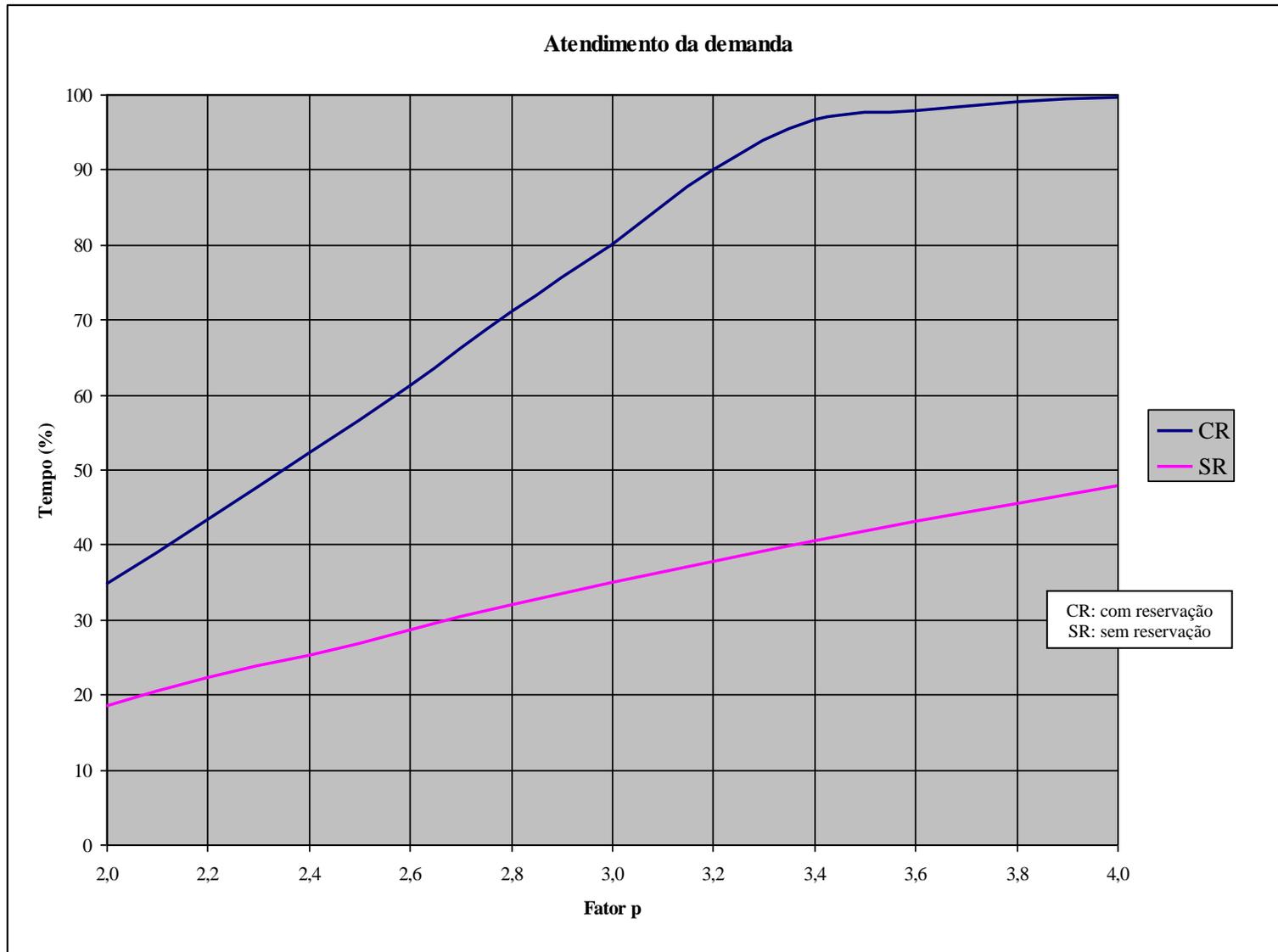


Figura 4.15. Atendimento da demanda generalizado (%)

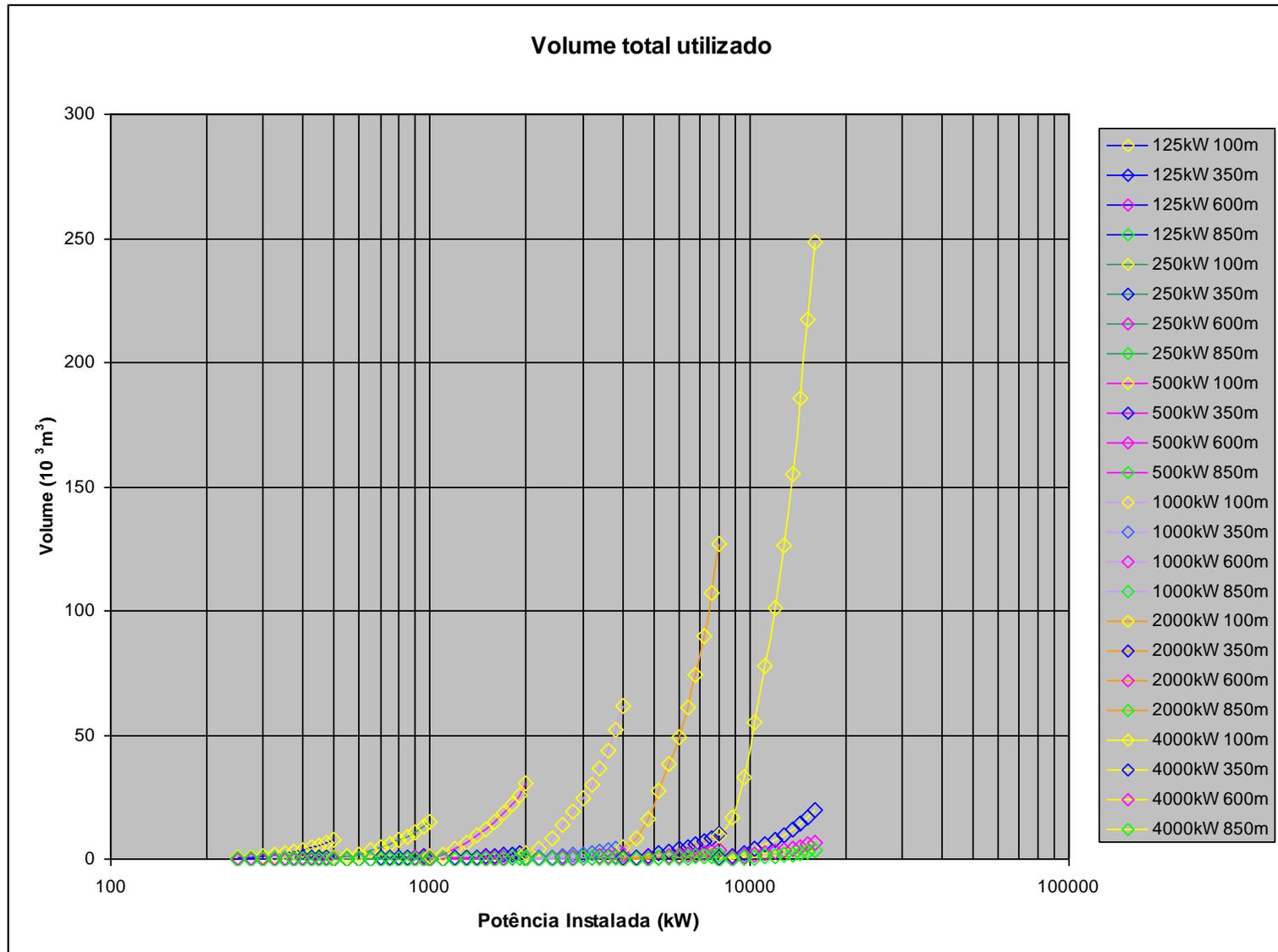


Figura 4.16. Volume total utilizado

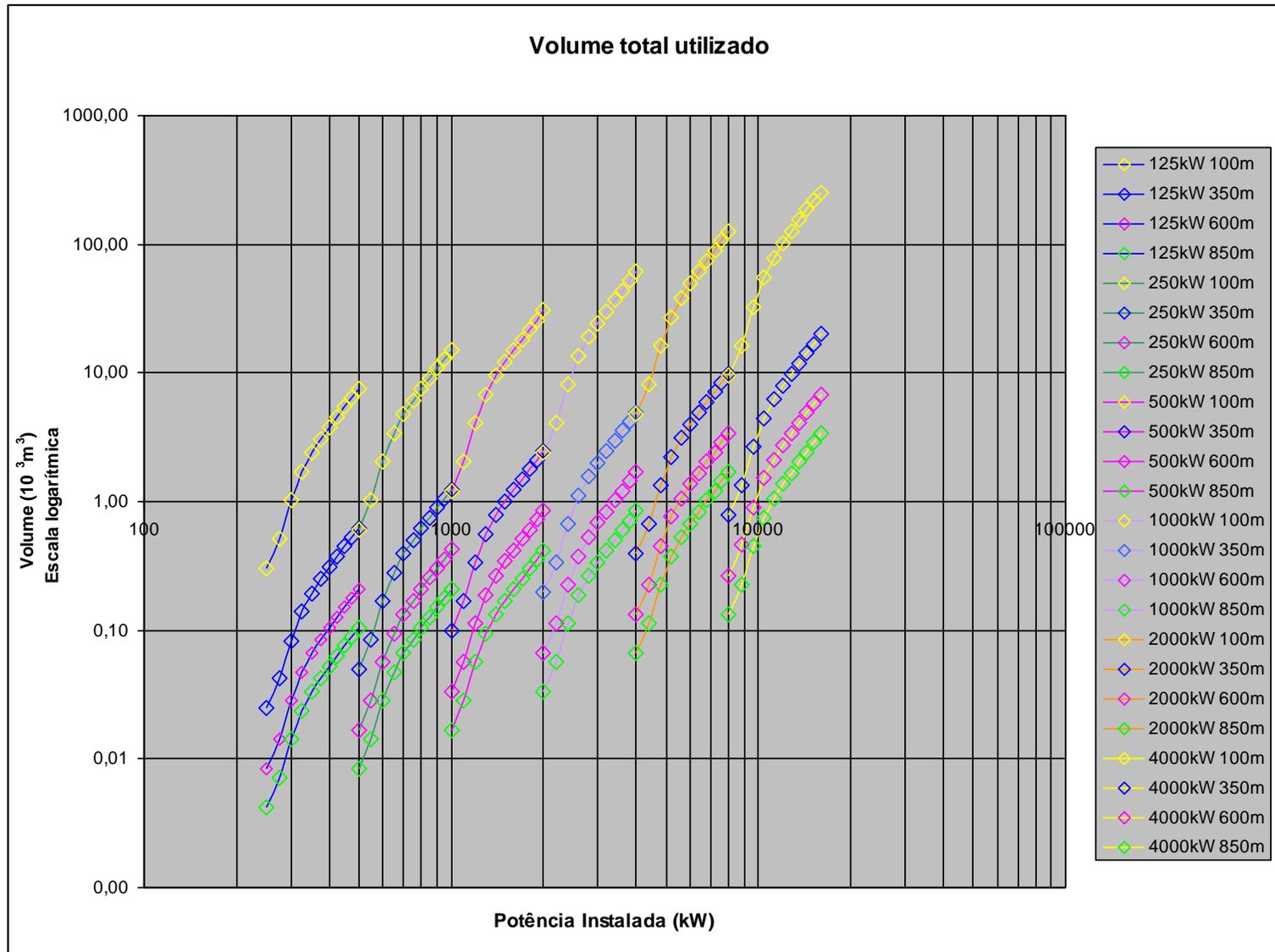


Figura 4.17. Volume total utilizado (escala logarítmica)

4.5 ANÁLISE DE CUSTOS

Foi realizada uma análise econômica dos sistemas propostos, com dados de custos de equipamentos, mão-de-obra e operação e manutenção, obtidos através da literatura, de fabricantes e de referências pessoais. Através destes custos, obteve-se o custo de instalação de cada combinação de demandas, potências e quedas. Estes dados foram expandidos no tempo, considerando um tempo de operação de trinta anos, seis meses de carência, juros iguais a zero durante a fase de construção e doze por cento (12%) de juros para o resto do período. Utilizou-se como base para a amortização o Sistema Price, com prestações constantes. Estes dados foram adotados com base na experiência anterior do autor.

O produto da porcentagem de atendimento pela demanda média resulta na energia total que foi gerada, ao longo de trinta anos. Dividindo o custo total ao longo do tempo de operação e somando este valor ao custo de operação e manutenção anual e às taxas e impostos anuais, obtém-se o custo total anual. O quociente da energia total gerada pelo custo total fornece o custo de energia, expresso em US\$/MWh. O custo de instalação é igual ao quociente entre o investimento total e a potência instalada, e é expresso em US\$/kW.

4.5.1 Custo de Instalação

A figura 4.18 apresenta o comportamento do custo de instalação do sistema, para todas as combinações de demanda, potência instalada e queda, e é possível perceber uma tendência, para o sistema de geração eólica com reservação hidrelétrica, para um valor de aproximadamente US\$1550/kW, e para os sistemas de geração eólica sem reservação, de US\$1150/kW.

Confirmando a indicação feita na seção anterior, quando da análise dos volumes máximos atingidos nos reservatórios, os valores correspondentes às maiores demandas médias e quedas de 100m tornam estas opções relativamente mais caras, situando as mesmas fora do envelope de custos de instalação esperado, e indicado na figura 4.19. É visível o comportamento ordenado dos valores assumidos pelo custo de instalação, o que sugere que se pode aprofundar seu estudo, de forma a generalizar seu cálculo a outras combinações de potências instaladas e demandas.

4.5.2 Custo de Energia

A figura 4.20 ilustra os custos de energia obtidos através da aplicação dos resultados da simulação para sistemas com e sem reservação. A faixa de custos obtida situa-se entre US\$ 94,3/MWh e US\$ 321,4/MWh e para todas combinações de demanda, potência instalada e queda há um ponto de mínimo, que está fortemente relacionado ao atendimento da demanda, ao volume máximo armazenado e ao comprimento da tubulação que, por sua vez, variam com a queda. Para todos os pontos de menor custo de energia, o valor de p é igual a 3,4, que corresponde a uma potência instalada 340% maior do que a demanda média. Nota-se também um deslocamento da posição relativa das curvas de diferentes quedas para uma mesma demanda média. Para demandas médias baixas, de 125kW e 250kW, o menor custo de energia é obtido com a queda de 100m. Já para uma demanda média de 500kW, o menor custo é obtido para a queda de 350m, e para as maiores demandas médias, de 1000kW, 2000kW e 4000kW, o menor custo é obtido com a queda de 600m. Este resultado está fortemente ligado ao da figura 4.16, onde é possível observar o grande crescimento do volume armazenado para a queda de 100m, que é, para todos os casos, oitenta e sete vezes maior que o volume correspondente para a queda de 800m. Como o atendimento da demanda é igual

para todas combinações de demandas, potências instaladas e quedas, e o valor de menor custo de energia é atingido sempre para p igual a 3,4, o atendimento da demanda correspondente a este custo mínimo é de 96,6%, para todos os casos.

Neste gráfico é possível também analisar o comportamento do custo de energia eólica sem sistema de reservação. Este não atingiu nenhum ponto de mínimo para a faixa de potências estudada. Para a demanda de 125kW, o custo da energia puramente eólica está inserida entre os valores de energia de sistema com reservação. Percebe-se, no entanto, que este sistema se torna imediatamente mais caro para sistemas de maiores proporções, sendo menor apenas no caso da combinação de demanda igual a 4000kW, queda de 800m e potência instalada de 16MW, mas mesmo assim, atendendo a apenas 47,7% da demanda, contra 99,6% do sistema com reservação.

Da mesma forma que os volumes máximos utilizados e o custo de instalação, nas figuras 4.16, 4.17 e 4.18, o custo de energia possui um comportamento coerente, que pode ser futuramente estudado, de forma a criar uma metodologia de dimensionamento de sistemas de reservação hidráulica.

Assim como nas análises anteriores, a combinação de queda de 100m, demanda média de 4000kW e p maior que 3,4 projeta-se para fora da envoltória de custos de energia ilustrada na figura 4.21, devido às grandes dimensões atingidas pelo reservatório hidráulico, elevando seu custo.

4.5.3 Contribuições Para Uma Metodologia de Dimensionamento

Os gráficos gerados neste trabalho podem ajudar na tomada de decisões visando dimensionamento indicando o custo de instalação do sistema, custos de energia e dimensões do reservatório necessário. Se já se dispõe de uma série de dados do local a ser implantado o

sistema e os comportamentos da demanda e do vento são similares aos utilizados neste trabalho, um critério para determinação destas variáveis pode ser a escolha de um nível de atendimento da demanda e obtenção da proporção entre a demanda média a ser atendida e a potência eólica e hidrelétrica a ser instalada da figura 4.15. Com esse valor e tendo escolhido um local para a construção do reservatório, determina-se a queda (ΔH) e obtém-se da figura 4.16 ou da figura 4.17 a capacidade necessária de reservatório. Da mesma forma, obtém-se das figuras 4.18 e 4.20 os custos de instalação e de energia.

Essa metodologia é válida para as séries de ventos e demanda aqui estudadas, e como citado na seção 4.2.1, deve ser estudada a influência de diferentes séries de ventos, visando a proposição de uma metodologia de dimensionamento que sirva a qualquer situação. Como alternativa, para estudos de casos práticos em zonas de diferentes regimes de vento e demanda, deve-se realizar um conjunto de dados referente ao vento e à demanda, de modo a recriar a simulação desenvolvida neste trabalho e a partir dos novos gráficos gerados determinar a configuração mais adequada.

Outra variável a ser levada em consideração é a limitação da capacidade dos reservatórios. Neste estudo, foi determinado o volume máximo utilizado, sem aplicar nenhuma restrição. No entanto, em situações reais, pode se tornar difícil dispor de uma topografia sem limitações físicas ou habitações, por exemplo, na área de interesse. Um estudo sobre a influência de diferentes capacidades sobre o comportamento do sistema de armazenamento hidráulico se mostra como uma boa continuação deste assunto.

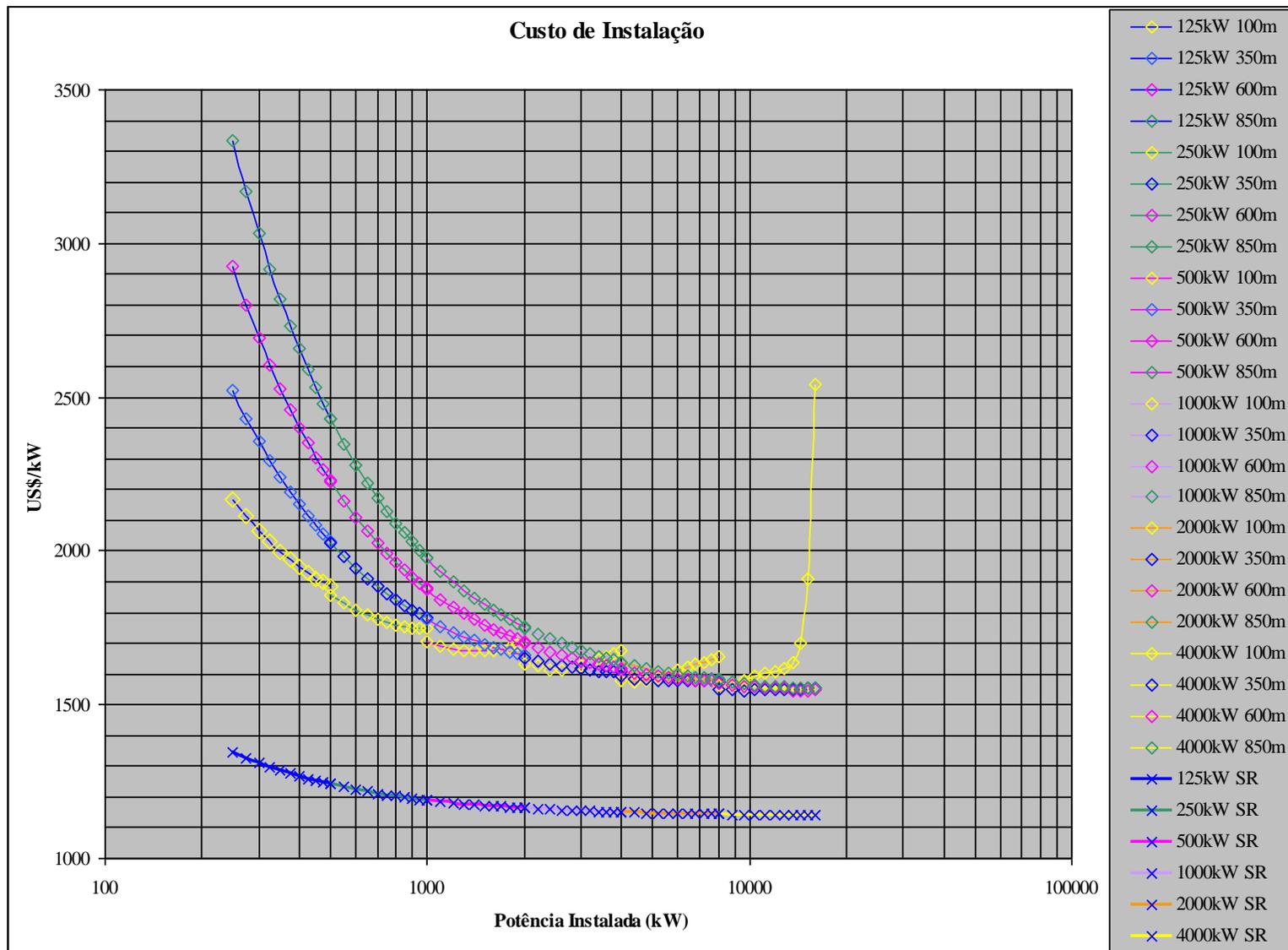


Figura 4.18. Custo de Instalação

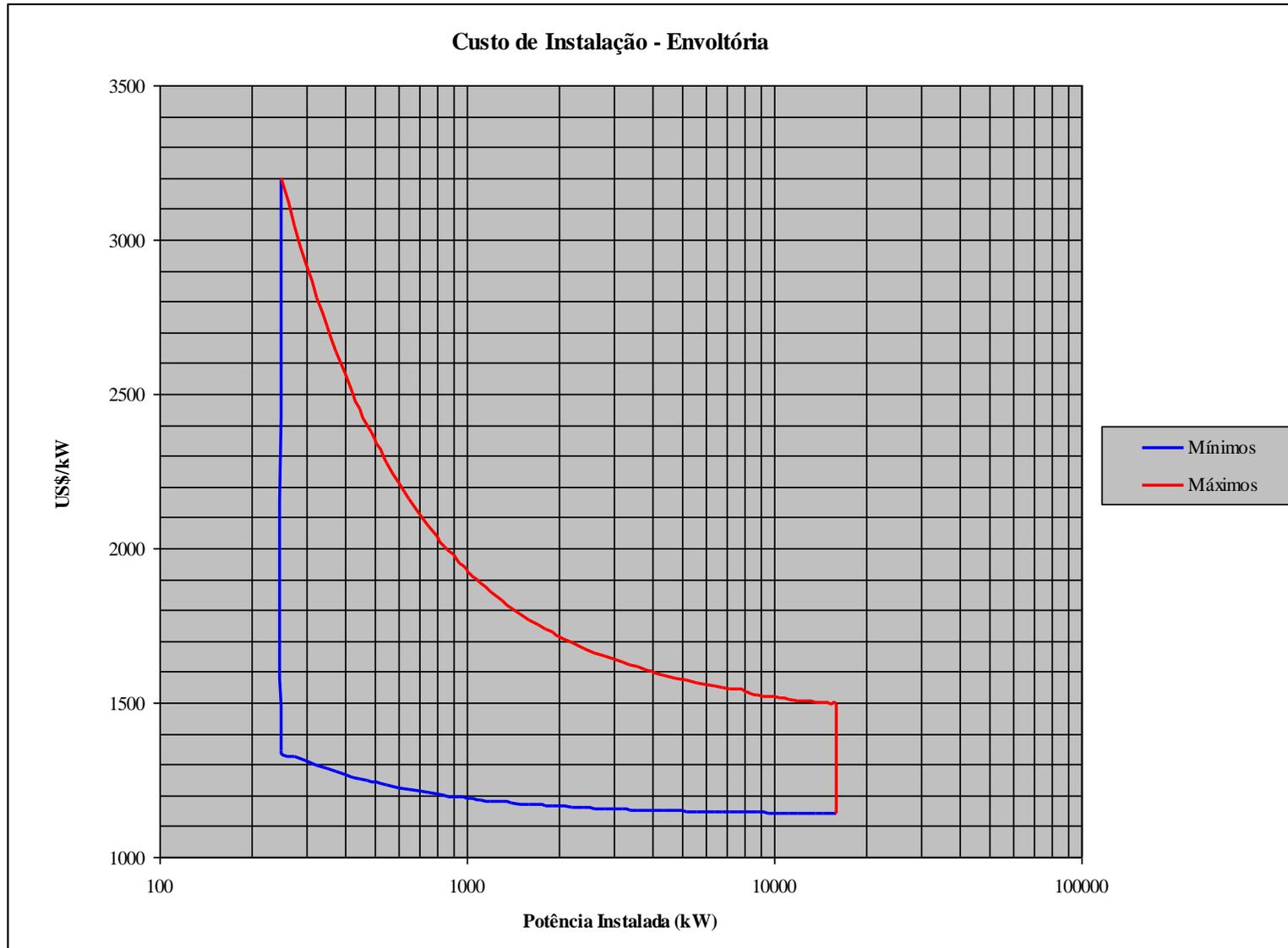


Figura 4.19. Custo de Instalação - Envolvória

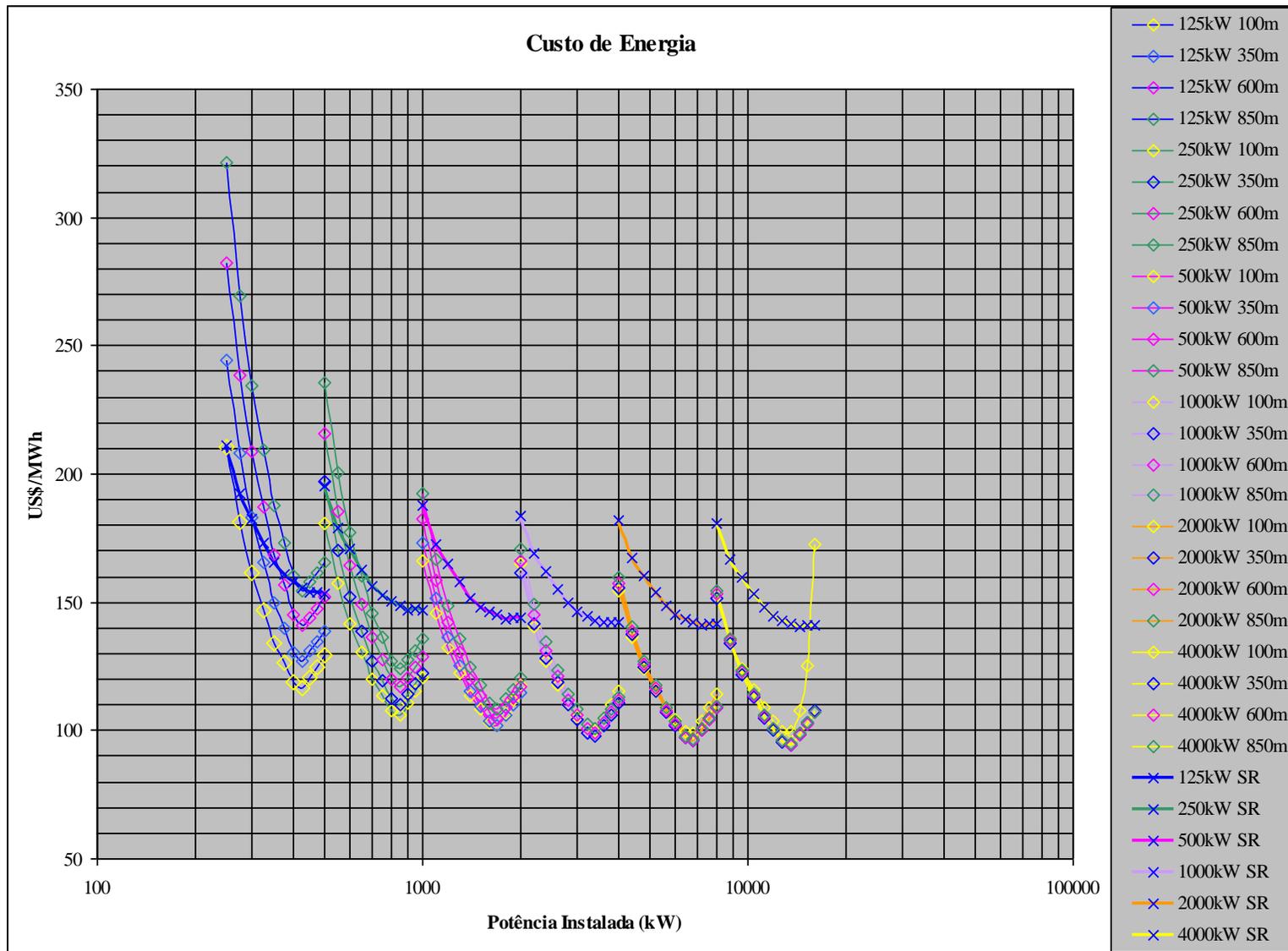


Figura 4.20. Custo de Energia

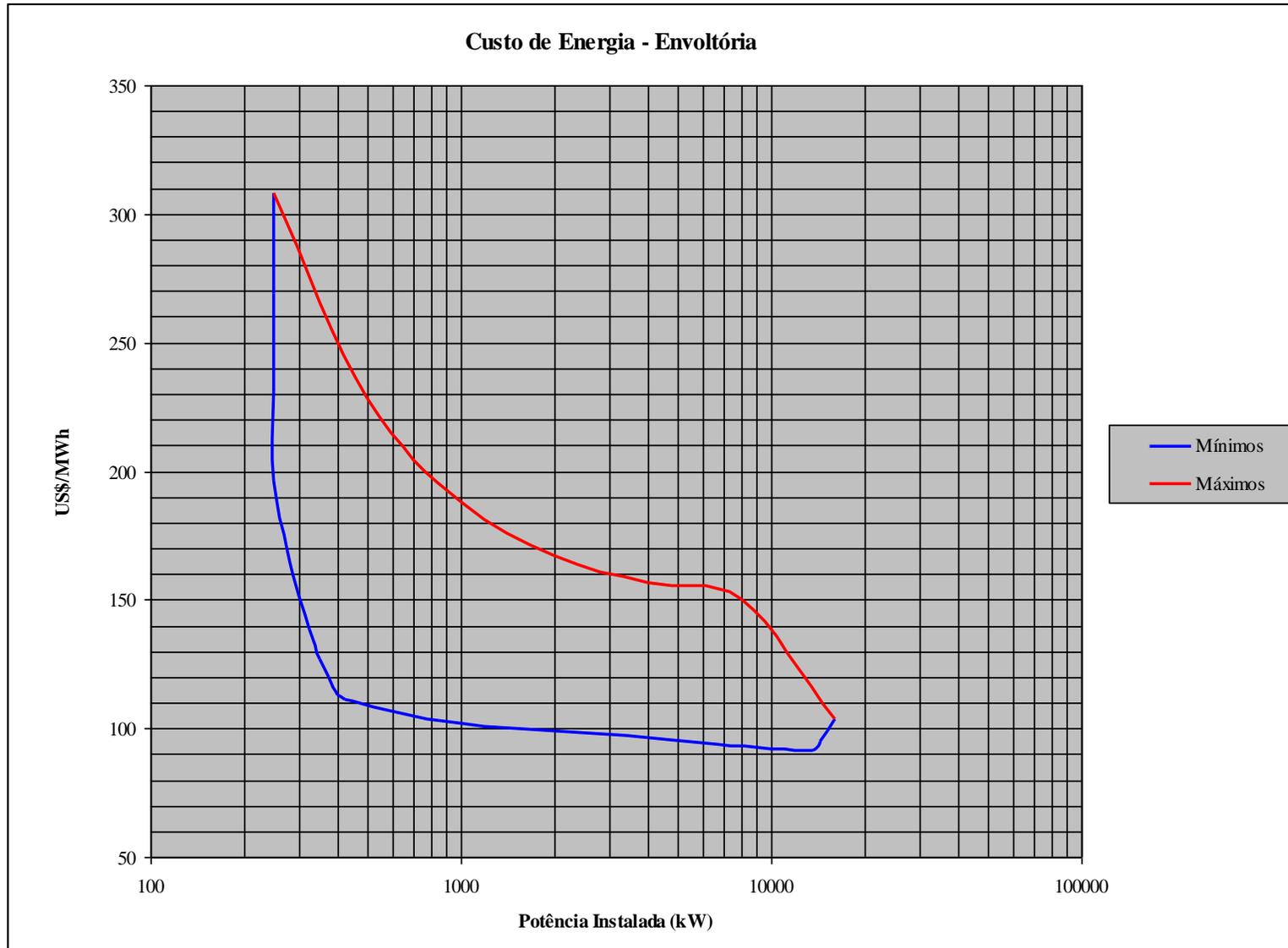


Figura 4.21. Custo de Energia - Envoltória

Capítulo 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e sugeridos alguns temas que merecem ser avaliados de uma forma mais detalhada em trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

A metodologia aqui aplicada mostrou-se eficiente no entendimento da influência da reservação hidráulica sobre sistemas de geração eólica, apontando tendências de custos de instalação, pontos de custo mínimo de energia, e ganhos na garantia de atendimento da demanda com a adoção da reservação de energia.

O ganho no tempo de atendimento da demanda para sistemas com armazenamento varia entre 1,87 e 2,39 vezes o atendimento para sistemas sem armazenamento, e o ponto de máximo ganho corresponde a p igual a 3,4, para os perfis de demanda e de vento considerados neste trabalho, coincidindo com o ponto de menor custo de energia obtido.

O custo de instalação para sistemas com armazenamento tende para um valor aproximado de US\$1500/kW, que está de acordo com a faixa superior de custos de instalação citado por NREL, 2005, e um estudo de potências maiores pode apontar para valores menores, como os indicados, de até US\$500/kW.

Deve-se ter em mente que as limitações impostas pela topografia do local em estudo podem levar a situações como a que ocorreu para uma demanda de 4GW, $p=4$ e $\Delta h=100\text{m}$, em que o reservatório se tornou demasiadamente grande, elevando seu custo desproporcionalmente.

As curvas de atendimento da demanda mostram um comportamento que depende somente do fator p . Outros estudos podem se valer deste comportamento, simulando o sistema proposto para um número menor de situações, e ampliando a curva obtida para outras demandas médias.

Apesar do maior custo de instalação para sistema de geração eólica com armazenamento, em relação a sistemas sem armazenamento, o custo de energia é menor, em praticamente todas situações, e o ganho em termos de confiabilidade do sistema pode ser interpretado como de maior importância. Esta confiabilidade é aqui vista como a maior garantia de atendimento da demanda, reduzindo períodos de falta de energia elétrica e seus inconvenientes, como prejuízos a indústrias e consumidores domésticos ou falta de abastecimento de água, por exemplo.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Trabalhos futuros devem incorporar uma análise econômica ao longo do tempo, levando em consideração diferentes taxas de juros, e condições de cobrança da energia gerada, como ocorre em sistemas interligados, com diferentes taxas de cobrança em horários de pico de demanda. Essa diferença pode chegar a cinco vezes em relação à taxa cobrada nos períodos de base.

Outros perfis de demanda e vento devem ser estudados, de forma a criar uma metodologia de dimensionamento aplicável a qualquer região com suas características de

vento e demanda particulares. Da mesma forma, sugere-se o estudo da influência de limitações na capacidade dos reservatórios, como se pode esperar em situações reais, onde o terreno disponível pode não permitir a construção de um reservatório como aquele sugerido pelos resultados deste trabalho. Pode-se criar conjuntos de curvas para diferentes porcentagens de capacidade de reservação em relação aos valores sugeridos neste trabalho.

Tendo em vista a regularidade de comportamento apresentada pelas relações entre as variáveis volume, custo de instalação e custo de energia, pode ser estudada uma metodologia de simplificação da descrição deste comportamento, para permitir a extrapolação a outras combinações de demandas médias, potências instaladas e desnível entre reservatórios. Esta simplificação pode ser estudada através da adimensionalização do sistema, criando uma curva para cada variável, como custos, volumes e atendimento, por exemplo.

Da mesma forma, outras fontes de energia renovável devem ser estudadas em conjunto com o sistema de reservação hidráulico, e um paralelo traçado. Energias como as provenientes das ondas ou marés têm sido estudadas, e podem tirar proveito do armazenamento de energia. Esta análise pode levar a um maior entendimento das potencialidades da reservação hidráulica, e viabilizar sua adoção tanto em locais isolados como em sistemas interligados à rede nacional, como já ocorre em alguns países, em que sistemas de reservação hidráulica são utilizados para adequar a entrega constante de energia de usinas nucleares às variações impostas pela demanda.

Por fim, sugere-se para novos estudos, a aplicação da metodologia aqui explicada a outras opções de reservação de energia, substituindo-se o cálculo dos volumes armazenados pelo cálculo apenas da energia armazenada, sendo esta posteriormente relacionada com as grandezas e dimensões correspondentes à opção de reservação escolhida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A ENERGIA elétrica no Brasil, (da primeira lâmpada à Eletrobrás). Biblioteca do Exército, 1977. 244 p.

ALLAN, M. R. **Modelling of Pumped Storage and Hydropower potential Within Water Supply Networks**. UK: Centre for Renewable Energy Systems Technology, Loughborough university, 2001. 10p. Publicação interna.

ANEEL. Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica. Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 28 mar. 2005.

AMARANTE, O.C.; BROWER, M.;SÁ, A. L.; ZACK, J. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. MME/ELETOBRÁS/CEPEL. Brasília: 2001. CD-ROM

BALARIM, C. R. **Uma Contribuição ao Estudo de Custo de Micro Centrais Hidrelétricas Brasileiras**.

BELUCO, A. **Viabilidade de Microcentrais Hidrelétricas Baseadas no Emprego de Equipamentos de Mercado**. Porto Alegre, 1994. 170p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PROMECA), UFRGS

BUENO, C.; CARTA, J. A. Wind Powered Pumped Hydro Storage Systems, A Means of Increasing the Penetration of Renewable Energy in the Canary Islands. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 4, p. 312-340, 2006.

D'AGOSTINI, J. **Estudo De Caso Para Implantação De Um Sistema Híbrido Eólico Hidrelétrico No Litoral Norte Do Estado Do Rio Grande Do Sul**. Porto Alegre, 2005. Dissertação em andamento. UFRGS

DUTRA, R. M.; TOLMASQUIM, M. T. Estudo de Viabilidade Econômica para Projetos Eólicos com Base no Novo Contexto do Setor Elétrico. **Coletânea de artigos: Energias Solar e Eólica** – CRESESB, Rio de Janeiro, p. 189-201, 2003.

ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**, Brasília: 2000, Disponível em: <www.eletronbras.gov.br> Acesso em 02 abr. 2005.

IBGE. Brasil, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 28 mar. 2005.

JACOBS. Fabricante de Turbinas Eólicas.EUA: 2005. Disponível em: www.windturbine.net Acesso em 10 abr. 2005.

KALDELLIS, J. K. Parametrical investigation of the Wind-hydro Electricity Production Solution for Aegean Archipelago. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 16, p. 2097-2113, 2002.

LOPES, R. E.; HOLDER, R. P.; OLIVEIRA, A. E.; MARTINEZ, C. B.. O Uso de Bombas Funcionando como Turbinas Acionando Geradores de indução. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2., 2003, Bahia. **Anais...** Disponível em: <http://citenel.aneel.gov.br>. Acesso em 27 mar. 2005.

MASKEY, R. K.; NESTMAN, F. **Hydro Based Renewable Hybrid Power System for Rural Electrification: A Concept Paper**. Germany: Institute of Water Resources Management: University of Karlsruhe, (2000), 10p. Disponível em: www.mtnforum.org/apmn/hybridconcept.htm. Acesso em: 29 mar. 2005, 09:18

MME. Brasil, Ministério das Minas e Energia. Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços. Disponível em: www.mme.gov.br. Acesso em: 29 mar. 2005.

NREL. EUA, Laboratório Nacional de Energias Renováveis. Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços. Disponível em: www.nrel.gov. Acesso em: 30 mar. 2005.

OCÁCIA, G. C.; JORGE, R. R.; BRISTOTI, A.; BALBINOT, A. O Fator de Carga no Custo do kWh em Micro Centrais Hidrelétricas Isoladas. **PCH Notícias & SPH News**. 4p. Seção de Artigos Técnicos, 4p. (200_).

RANGI, R.; TEMPLIN, J.; CARPENTIER, M.; ARGUE, D., **Canadian Wind Energy Technical and Market Potential**, EAETB, Energy, Mines and Resources Canada, 1992. In: RETSCREEN

RETSCREEN. Canadá, Clean Energy Decision Support Centre, 1996-2000. Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços. Disponível em: www.retscreen.net. Acesso em: 18 jan. 2005.

SCHREIBER, G. P. **Usinas hidrelétricas**. São Paulo: Edgar Blücher; Rio de Janeiro: Engevix, 1977. 242p.

SORENSEN, B. **Renewable Energy - Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects**. Rio de Janeiro: Elsevier Science, 2004. 945p.

TBG. Brasil, Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia-Brasil S.A. Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços. Disponível em: <http://www.tbg.com.br>. Acesso em: 28 mar. 2005.

WOOD, J. Working Together. **International Water and Power & Dam Construction**. p.38-39. Jul. 2002.

SOUZA, Zulcy de. **Centrais Hidrelétricas - Dimensionamento de Componentes**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1992. 197 pg.

OUTRAS FONTES PESQUISADAS

BELUCO, A.; MAESTRI, R. D. Uma sugestão para aproveitamento da energia eólica, no Litoral Norte do RS, por meio de um sistema híbrido eólico hidrelétrico. **ABRH Notícias**, n. 8, p.16, jun. 2002.

KALDELLIS, J. K.; KAVADIAS, K. A. Optimal Wind-hydro Solution for Aegean Sea Islands' Electricity-demand Fulfilment. **Applied Energy**, v. 70, n. 4, p. 333-354, 2001.

PORTO, L.; CARVALHO, C. H.; FRANÇA, G.; OERTEL, L. C. Política de Energias Alternativas Renováveis no Brasil. **Coletânea de artigos: Energias Solar e Eólica** – CRESESB, Rio de Janeiro, p. 181-187, 2003.

PUMPED STORAGE: PROCEEDINGS, 1990, London. **Resumos...** London: Thomas Telford, 1990. 449 p.

RAMOS, H.; BORGA, A. **Pumps Yelding power**. Portugal: Civil Engineering Department of IST: Technical university of Lisbon, 11p. (200_).

SAINT GOBAIN. Brasil. Fabricante de Tubos, válvulas e conexões de ferro fundido. Disponível em: www.saint-gobain.com.br. Acesso em: 16 abr. 2005.

TWIDELL, J. K.; WIER, A. D. **Renewable Energy Resources**. Cambridge: Univeristy Press, 1990. 439p.

WIKIPEDIA. USA, The Free Encyclopedia. Enciclopédia virtual de acesso livre, com informações sobre cultura, geografia, história, vida, matemática, ciência, sociedade e tecnologia. Disponível em: en.wikipedia.org/wiki/Hydroelectric_energy_storage. Acesso em: 29 mar. 2005.

WIND POWER MONTHLY, **The Windicator-operational Wind Power Capacity Worldwide**, 2001. In: RETSCREEN

WTIC. USA, Wind Turbine Industries Corporation. Fabricante de turbinas eólicas e acessórios. Disponível em: www.windturbine.net. Acesso em: 16 abr. 2005.